

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

**ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ У СТВОРЕННІ
МОБІЛЬНИХ ПОЖЕЖНИХ СИСТЕМ НА БАЗІ
ПЕРСОНАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ
(СІГВЕЇВ)
*Монографія***

Харків 2025

Рекомендовано Вченою радою Національного університету Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка. Протокол № 9 від 19.06.2025 р.

Рецензенти:

КЛЮЧКА Юрій Павлович – професор кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова, доктор технічних наук, с. н. с.;;

БАЛЛО Ярослав Вячеславович – заступник начальника відділу нормативно-технічного забезпечення науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту доктор технічних наук, старший дослідник.

Інноваційні рішення у створенні мобільних пожежних систем на базі персонального електротранспорту (сігвеїв): монографія / А.А. Хижняк, О.В. Кириченко, Р.Б. Мотрічук – Харків: «Діса плюс», 2025. – 198 с.

ISBN 978-617-8688-11-0

У монографії розглядається обґрунтування параметрів і характеристик нового типу мобільних пожежних установок, основою яких є платформа на базі сігвею. Розроблено комплекс математичних моделей, що описують ключові процеси в елементах установки, з урахуванням етапу доставки вогнегасної речовини та її впливу в осередку горіння, а також участі оператора.

Згідно з класифікацією мобільних засобів пожежогасіння (повітряні, водні, наземні), встановлено, що перспективним напрямом є розробка наземних автономних установок на базі сігвею. Вони мають низку переваг – компактність, маневреність, можливість застосування широкого спектру вогнегасних речовин, особливо у приміщеннях та на початковій стадії пожежі. Проте для таких систем досі відсутнє належне наукове обґрунтування їх параметрів.

Для подачі вогнегасної речовини на вогнище горіння побудовано модель, що враховує опір повітря та дозволяє визначати максимальну дальність та час доставки речовини. Процес описується передаточною функцією запізнюючої ланки з затримкою до однієї секунди. Отримано частотні та часові характеристики пожежної установки, які дозволяють враховувати її динамічні властивості при проектуванні систем гасіння.

Час гасіння пожежі класу В за допомогою системи на базі сігвею включає сталу складову 0,5 с і змінну, що залежить від геометричних і реологічних параметрів системи. Реактивне навантаження на форсунку не перевищує 60 Н. Для підвищення ефективності запропоновано незалежне управління кутовим положенням форсунки.

Розроблено рекомендації для створення тренажерів з підготовки операторів та алгоритми контролю їх дій. Запропоновано алгоритми діагностики технічного стану установок на основі аналізу геометрії струменя та моделювання осередку горіння.

Монографія орієнтована на наукових і практичних працівників органів та підрозділів служби цивільного захисту, підрозділи місцевої та добровільної пожежної охорони, викладачів, ад'юнктів і здобувачів вищої освіти.

© А. А. Хижняк, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук,
© НУЦЗУ

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ РУХОМИХ МОДЕЛЕЙ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ	8
1.1. Розподіл рухомих моделей гасіння пожеж на види	8
1.2. Авіаційні моделі пожежогасіння	9
1.3. Засоби пожежогасіння, що пересуваються водою.....	15
1.4. Наземна техніка та засоби пожежогасіння.....	16
1.5. Технічні особливості рухомих компактних засобів гасіння пожеж..	31
1.6. Висновки за розділом 1.....	33
РОЗДІЛ 2. ПОЖЕЖІ КЛАСУ В. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ.....	34
2.1. Хімічна реакція. Її швидкість. Побудова загального рівняння процесу гасіння пожежі.	34
2.2. Характеристики та динамічні моделі пожежі	42
2.3. Визначення періоду ліквідації пожежі.....	49
2.4. Вогнегасна речовина та її критична концентрація	50
2.5. Висновки за розділом 2.....	55
РОЗДІЛ 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПАКТНОЇ РУХОМОЇ УСТАНОВКИ ПОЖЕЖОГАСІННЯ. МОДЕЛІ ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ	57
3.1. Витікання газу із балону.....	57
3.2. Рух газу в пневмомагістралі.....	62
3.3. Рух вогнегасної речовини в ємності.....	63
3.4. Рух вогнегасної речовини по гнучкій магістралі.....	65
3.5. Рух вогнегасної речовини в просторі.....	70
3.6. Характеристики компактної рухомої установки в динаміці під час гасіння пожежі	90
3.7. Висновки за розділом 3	95

РОЗДІЛ 4. ВОГНЕГАСНА РЕЧОВИНА НА ДІЛЯНЦІ ЇЇ ПОДАЧІ ДО ОСЕРЕДКУ ГОРІННЯ. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПАРАМЕТРИ.....	97
4.1. Витрати вогнегасної речовини	97
4.2. Швидкість руху вогнегасної речовини	102
4.3. Спрощення диференційного рівняння по визначенню розподілу потоку вогнегасної речовини по його радіусу	112
4.4. Графічні залежності для оцінки геометричних характеристик струменя вогнегасної речовини	123
4.5. Практичне вивчення геометричних параметрів вогнегасної речовини.....	129
4.6. Висновки за розділом 4	131
РОЗДІЛ 5. КОМПАКТНА РУХОМА УСТАНОВКА ПОЖЕЖОГАСІННЯ. ЗАГАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ. СИТЕМА УПРАВЛІННЯ. ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	132
5.1. Показники тривалості дії.....	132
5.1.1. Термін ліквідації загорання	132
5.1.2. Параметри часових показників закінчення вогнегасної речовини в ємностях	134
5.2. Режими подачі вогнегасної речовини.....	137
5.3. Показники роботи оператора установки	143
5.4. Параметри системи управління кутовим положенням форсунок	153
5.5. Основні експлуатаційні характеристики компактних рухомих установок на базі сігвеїв.....	166
5.6. Висновки за розділом 5	182
ВИСНОВКИ	184
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	186

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій

НУЦЗУ – Національний університет цивільного захисту України

ДПД – Добровільна пожежна дружина

МПО – Місцева пожежна охорона

ICAO – International Civil Aviation Organization, Міжнародна організація цивільної авіації;

NFPA – National Fire Protection Association, Національна асоціація протипожежного захисту (США);

CE – Conformité Européenne, Європейське маркування відповідності;

CAFS – Compressed Air Foam System, Система подачі піни стисненим повітрям;

LUF-60 – Назва пожежної установки (Австрія);

Rail-Kit – Модуль для тунельного використання пожежної установки;

LRZNT – Модель пожежного потяга (Швейцарія);

EHZ – Модель пожежного потяга (Німеччина);

MANTGM 13.290 – Модель пожежного автомобіля;

Scania P380 – Модель пожежного автомобіля;

Renault Midlum 300 – Модель пожежної автоцистерни;

Panther CAS – Crash Airport System, Аеродромний пожежний автомобіль;

Colossus – Роботизована пожежна установка (Франція);

BMW R1200RT – Модель пожежного мотоцикла;

Fireexpress – Система мілкорозпиленого водяного гасіння;

PM 250 FHL-7 – Модель пожежного квадроциклу;

УПТВ 50/50 – Установка пожежогасіння тиску високого;

ВСТУП

Розвиток і розширення виробництва, розробка та впровадження нових технологій, використання нових матеріалів, реконструкція підприємств, а також впровадження у державі розповсюдженій галузі місцевої та добровільної пожежної охорони – все це обумовлює необхідність в удосконаленні систем виявлення та гасіння пожеж. При виникненні пожежі необхідно за мінімальний час забезпечити доставку достатньої кількості кваліфікованого персоналу, технічних засобів та вогнегасної речовини для евакуації потерпілих та гасіння пожежі. Вирішення цієї задачі забезпечується за допомогою мобільних засобів пожежогасіння.

Різні аспекти, пов'язані із розробкою та використанням мобільних засобів пожежогасіння, розглядалися в роботах С.Г. Цариченка, А.В. Долговидова, А.А. Хижняка, В.В. Теремнова, О.В. Сабініна, В.П. Бабурова, В.В. Бабутина, В.В. Севрікова, Ю.О. Абрамова, В.П. Ольшанського, а також D. Burgess, P. Fuchs, D. Rasbash, P. Nash, N. Ramsdem та ін.

Оновлення сучасних технічних засобів пожежогасіння вимагає не лише удосконалення традиційних стаціонарних систем, а й пошуку нових мобільних рішень, здатних забезпечити оперативне реагування на пожежі у складних умовах: обмеженого простору, високої динаміки розвитку надзвичайної ситуації, критичної віддаленості від джерел централізованого постачання вогнегасної речовини. У науковій літературі окреслено низку підходів до проектування мобільних пожежних установок, однак переважна більшість досліджень зосереджується на автомобільній або переносній техніці, залишаючи поза увагою потенціал новітніх компактних платформ на кшталт сігвей.

Сігвей, як засіб персональної мобільності, має ряд характеристик, які ідеально підходять для вирішення задач швидкого реагування у тісних або завантажених просторах (наприклад, вокзали, аеропорти, торговельно-

розважальні комплекси, промислові об'єкти з ускладненим доступом). Проте на сьогодні відсутнє системне наукове обґрунтування можливості та доцільності використання таких платформ як бази для мобільних пожежних установок. Зокрема, недостатньо вивчені: особливості динаміки подачі вогнегасної речовини з рухомої малоформатної платформи; поведінка струменя в умовах обмеженої маневреності; питання керованості та стабільності системи «оператор – установка – вогнегасна речовина» в динаміці; взаємодія установки з вогнищем пожежі на ранніх етапах його розвитку.

Таким чином, існує очевидний науково-технічний розрив між сучасними вимогами до мобільності систем пожежогасіння і рівнем теоретичного та прикладного опрацювання таких рішень у науковій літературі. Особливо це стосується: математичного моделювання взаємодії між елементами мобільної установки на базі сігвею; розробки алгоритмів управління системою подачі вогнегасної речовини; вивчення людини-оператора як динамічного компонента системи управління; узагальнення експериментальних даних щодо ефективності використання компактних установок для гасіння пожеж класу В.

Монографія спрямована на заповнення даного наукового вакууму шляхом створення комплексу математичних моделей, проведення системного аналізу елементів установки та її динаміки, а також обґрунтування конструктивно-функціональних параметрів мобільної пожежної установки на базі сігвею. Застосування такого підходу дозволить сформулювати наукову та інженерну основу для розробки принципово нових рішень у сфері протипожежного захисту. Практичне застосування запропонованого рішення можливе у аеропортах, торговельно-розважальних комплексах, промислових об'єктах з ускладненим доступом, заготівельно-

складських об'єктах, для виконання ДПД заходів з ліквідації пожеж, а також фахівцями МПО.

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ РУХОМИХ МОДЕЛЕЙ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ

1.1. Розподіл рухомих моделей гасіння пожеж

Усі мобільні засоби пожежогасіння можна розділити на три групи [1]:

- авіаційні (повітряні);
- водні;
- наземні.

До першої групи відносяться дирижаблі (аерольоти), літаки, вертольоти, квадрокоптери, які обладнані засобами пожежогасіння. До другої групи відносяться катери та кораблі, що оснащені засобами пожежогасіння.

Найбільш різноманітною за технічними рішеннями є третя група, до якої відносяться автоматичні та автоматизовані, а також ручні засоби пожежогасіння. До першої підгрупи відносяться рейкові та безрейкові мобільні засоби пожежогасіння. Рейкові засоби пожежогасіння діляться та пожежні потяги, тунельні та естакадні. Безрейкові мобільні засоби пожежогасіння реалізуються у гусеничному або колісному варіантах. Колісні засоби пожежогасіння розділяються на автомобільні, мотоциклетні, квадроциклетні та сігвейні.

Ручні засоби пожежогасіння розділяються на возимі та носимі. Розглянемо типові мобільні засоби пожежогасіння відповідно до наведеної класифікації.

1.2. Авіаційні моделі пожежогасіння

Дирижаблі є найбільш ефективними засобами при гасінні лісових пожеж. Фірма AdvancedTechnologiesGroup[2] виробляє дирижаблі із вагопідйомністю до 10^3 т. В [3] наведена інформація стосовно нового покоління повітряних засобів пожежогасіння, яке є подальшим розвитком дирижаблів – аерольотів. Аерольоти мають вагопідйомність $(100 \div 150)$ т, швидкість руху $150 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$. При нормі дощевання 20 мм, запасів води в 100 т є достатнім для того, щоб полити водою площу в $5 \cdot 10^3 \text{ м}^2$. Аерольоти можуть висіти на достатньо великій висоті і контролювати площу території в радіусі 100 км.

Серед повітряних засобів пожежогасіння найбільш широко використовуються пожені літаки [4]. Наприклад, в Канаді широко використовуються літаки – танкери «Канада СЛ-215» та СЛ-415, які є літаками амфібіями [5].

В Україні створений та використовується пожежний літак АН-32 П (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Пожежний літак –АН-32 П

При збросі 8 т вогнегасної рідини із двох груп баків з висоти $(40 \div 50)$ м на швидкості $(240 \div 260)$ км·год⁻¹ на поверхні землі утворюється пляма із концентрацією 1 л/м² довжиною $(120 \div 160)$ м та шириною $(10 \div 35)$ м. Крейсерська швидкість такого літака складає 500 км·год⁻¹, а дальність дії – 330 км.

Найбільшим пожежним літаком у світі є літак ИЛ-76ТДП [1,6] (рис. 1.3). Такий пожежний літак оснащений двома баками ВАП-2, кожний із яких вміщує 21 т вогнегасної рідини. Заправка літака вогнегасною рідиною займає $(10 \div 12)$ хв.



Рис. 1.2. Пожежний літак – ІЛ-76 ТДП

Площа поверхні зрошення при послідовному зливі вогнегасної рідини із двох баків складає $(600 \times 80) \text{ м}^2$ (при швидкості польоту $280 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$ та висоті зливу 80 м). При залповому зливі одночасно із двох баків площа зливу складає $(400 \times 100) \text{ м}^2$. Концентрація рідини на землі складає $5,2 \text{ л/м}^2$.

Серед пожежних вертольотів можна виділити чотири версії [7].

УН-60/S-70 фірми «Sikorsky» – один із найбільш масових пожежних вертольотів. В модифікації «Firehawk» забір води масою 3,875 т здійснюється за 60 с. Вертольот S-64F «Helitanker» із баком ємністю 9,5 т багато років експлуатується в Південній Кореї, Австралії, Мексиці та США. Заповнення бака здійснюється за 4,5 с. В Україні створений пожежний вертольот Мп-14 ПЖ, який має бак ємністю 4 т та систему забору води (час забору води складає $(1,5 \div 2,0) \text{ хв}$).

Пожежно-рятувальний вертольот Ка-32А забезпечує забір води до 3,0 т за 80 с в режимі зависання. До води може додаватись піноутворювач із додаткового баку ємністю 300 л, що дозволяє одержати $2 \cdot 10^5 \text{ л}$ піни.

Гасіння пожеж за допомогою вертольотів може здійснюватись трьома способами:

- шляхом самовитікання (рис.1.3);
- із використанням водозливних пристроїв (рис. 1.5.);
- із використанням системи горизонтального гасіння – пожежних гармат (рис. 1.6).

Водозливний пристрій типу ВСУ-15 має діаметр 3,1 м та довжину 10,0 м. Висота ємності складає 3,5 м. Відкриття клапана здійснюється за 8 с, а злив води з висоти 30 м забезпечується за 17 с [1].



Рис. 1.3. Гасіння пожежі шляхом самовитікання вогнегасної речовини



Рис. 1.4. Використання водозливного пристрою



Рис. 1.5. Гасіння пожежі пожежною гарматою

Для системи горизонтального гасіння пожеж фірма IFEX розробила пожежну гармату для вертольотів Eurocopter та Kamov із швидкістю подачі води, яка складає 120 мс^{-1} [7].

Деякі роки тому з'явилися нові розробки повітряних засобів пожежогасіння – пожежні квадрокоптери. В 2018 р. в Латвії [8,9] пройшов випробування пожежний дрон, який оснащений 28 електричними двигунами та має 16 хімічних джерел живлення. Гасіння пожежі здійснюється за допомогою пожежного рукава (рис. 1.7), який кріпиться до квадрокоптера. Такий пожежний квадрокоптер може здійснювати гасіння пожеж на висоті 300 м, в той час як висота пожежної драбини не перевищує 70 м.



Рис. 1.6. Гасіння пожежі пожежним квадрокоптером

В іншому варіанті застосування пожежного квадрокоптера він використовується автономно (рис. 1.7). Прикладом такого варіанту роботи пожежного квадрокоптера є варіант, наведений в [10]. В джерелі інформації наведені дані стосовно використання пожежного квадрокоптера в Китаї і наголошується, що навіть при часі прибуття пожежних підрозділів до пожежі, який відповідає нормативним вимогам, час розгортання спеціальної

техніки, особливо при гасінні багатоповерхових будівель, набагато перевищує час введення пожежного квадрокоптера в дію.



Рис. 1.7. Автономний пожежний квадрокоптер

Тобто, автономні пожежні квадрокоптери особливо ефективні при використанні в приміщеннях на початковій стадії розвитку пожежі.

1.3. Засоби пожежогасіння, що пересуваються водою

Водні засоби пожежогасіння призначені для гасіння пожеж на плавзасобах та берегових об'єктах. Основним засобом пожежогасіння на пожежному судні є високопродуктивні (до 10^4 м³/с) насоси, що подають воду до лафетних стволів або до рукавних ліній. Лафетні стволи (2 ÷ 8), як правило, розміщуються на носі, кормі, над надстройкою і забезпечують виліт струменю вогнегасної рідини до 200 м та висоту до 80 м (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Пожежне судно

Для гасіння нафти та нафтопродуктів використовуються засоби хімічного пожежогасіння – піноутворючі речовини та диспергенти.

Серед пожежних катерів слід виділити катер «L.A. Fireboat-2»[11], на палубі якого змонтовані 10 лафетних стволів, що можуть подавати 143 м^3 води за хвилину на відстань 100 м. При інтенсивності подачі води $680 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ має місце силовий вплив струменя води, величина якого складає $7 \cdot 10^4 \text{ м}$.

Швидкість переміщення водних засобів пожежогасіння складає $(14 \div 20)$ вузлів.

1.4. Наземна техніка та засоби пожежогасіння

Найбільшими серед цього класу засобів пожежогасіння є пожежні потяги [12, 13]. Слід зазначити, що кращі технічні характеристики мають пожежні потяги LRZNT (Швейцарія) та ENZ (Німеччина) рис.1.9.



Рис. 1.9. Пожежний потяг ENZ

Вагон пожежогасіння потягу LRZNT є бойовою одиницею пожежогасіння із запасом води 50 м^3 . На вагоні розміщений насос із продуктивністю $6 \cdot 10^3 \text{ л} \cdot \text{хв.}^{-1}$ із тиском 10 атм, що дозволяє подавати воду за допомогою лафетного ствола на 70 м, а пінного розчину – на 60 м. На вагоні розміщений пінобак ємністю 100 л та пристрій для подачі піни за технологією CAFS.

Вагон пожежогасіння потягу ENZ включає ємність із водою загальним об'ємом 20 м^3 , бак із піноутворювачем об'ємом $1,0 \text{ м}^3$ та два насоси продуктивністю $1,6 \cdot 10^3 \text{ л} \cdot \text{хв.}^{-1}$

В США та Канаді пожежні потяги представляють набір вагонів – цистерн (рис. 1.10) та технічних засобів подачі вогнегасної речовини. Такі потяги можуть вивозити 120 т води та $2 \cdot 10^3 \text{ л}$ піноутворювача [13].

В Україні в експлуатації знаходяться 54 пожежних потяги, які за технічними характеристиками є кращими ніж пожежні потяги США [12].



Рис. 1.10. Пожежний потяг США

В [14] наведено схему побудови системи охолодження та пожежогасіння резервуарів в резервуарній групі. На цій схемі зображено: 1 – резервуари; 2 – монорейка, що виконана у вигляді кола; 3 – модулі із рідиною для охолодження резервуарів; 4 – опори; 5 – трубопроводи; 6 – запірні пристрої; 7 – порожниста стійка; 8 – пожежний монітор. Монорейка 2 встановлена на опорах 4, на яких також встановлені трубопроводи 5. На одних кінцях трубопроводів 5 встановлено запірні пристрої 6, другі кінці цих трубопроводів з'єднані із трубопроводом (на схемі не показаний), який встановлений в порожнині стійки 7 та з'єднаний із стаціонарною гідромагістраллю. Порожниста стійка 7 встановлена в геометричному центрі розміщення резервуарів 1, а на ній встановлений пожежний монітор 8, який

має лінійний ступінь свободи по вертикалі та кутовий ступінь свободи по азимуту.

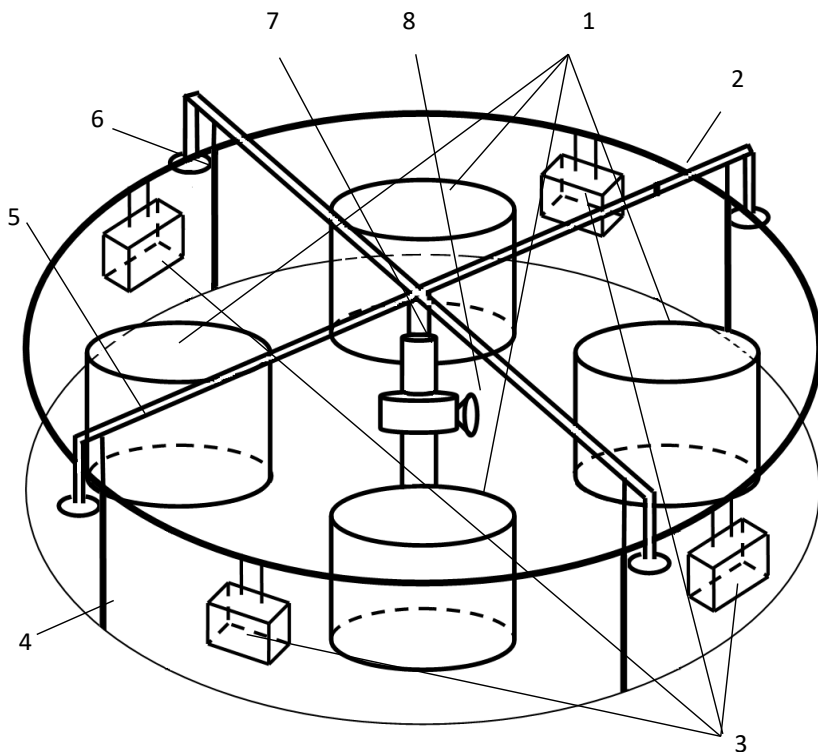


Рис. 1.11. Схема системи охолодження та пожежогасіння резервуарів в резервуарній групі

Модулі 3 із вогнегасною рідиною є мобільними засобами як охолодження, так і пожежогасіння [14].

Для тунелів та на складах доцільно використовувати пожежні роботи, що встановлені на болідах і рухаються по монорейці вздовж магістрального

водоводу [15]. Такі роботи в автоматичному режимі підключаються до водоводу в вузлах забору вогнегасної рідини.

Для гасіння пожеж в тунелях в метрополітенах використовується мобільна пожежна установка LUF-60 компанії RECHNERS Loschsusteme GESMBH (Австрія) спільно із пристроєм Rail-Kit[16]. Установка включає пожежний ствол із продуктивністю $(7 \div 40) \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$, який забезпечує подачу води на відстань до 80 м або піноутворювача із продуктивністю $14 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$ на відстань до 35 м. Швидкість руху складає до $40 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$.

Найбільш поширеним класом такого типу засобів пожежогасіння є пожежні автомобілі [17]. Для гасіння пожеж використовуються пожежні автомобілі загального та цільового використання [1, 17]. Перші використовуються для гасіння пожеж в містах та інших населених пунктах, а другі – для гасіння пожеж на нафтобазах, аеродромах та інших спеціальних об'єктах. Серед пожежних автомобілів загального використання найбільш поширені пожежні цистерни (рис.1.12).



Рис. 1.12. Пожежна цистерна

Пожежний автомобіль MANTGM 13.290 може транспортувати $2 \cdot 10^3$ л води та 200 л піноутворювача, а пожежний автомобіль Scania P380 – $9,5 \cdot 10^3$ л води та 10^3 л піноутворювача. Автоцистерна, зображена на рис. 1.13 – Renault Midlum 300, може транспортувати $2,5 \cdot 10^3$ л води та 250 л піноутворювача [18].

Серед пожежних автомобілів цільового призначення слід виділити аеродромний пожежний автомобіль. Пожежні автомобілі цього класу найбільш стрімко розвиваються. На рис. 1.13 наведено зображення суперпожежного автомобіля Panther 6×6 CAS виробництва австрійської компанії Rosenbauer International AG [19].



Рис. 1.13. Аеродромний пожежний автомобіль

Такий пожежний автомобіль забезпечує досягнення швидкості 80 км·год⁻¹ за 30 с, його максимальна швидкість складає 115 км·год⁻¹. Цей

автомобіль має бак для води ємністю $1,25 \cdot 10^4$ л та бак для піноутворювача ємністю $1,5 \cdot 10^3$ л, а також установку для гасіння CO_2 . Продуктивність насосу складає $6 \cdot 10^3$ л·хв⁻¹. Загальна маса такого пожежного автомобіля складає 34,8 т.

Серед безрейкових засобів пожежогасіння на гусеничному ході слід виділити роботизовану установку «Colossus» розробки фірми Sharks Robotics (Франція) (рис. 1.14). Цей засіб пожежогасіння був ефективно використаний при гасінні пожежі у соборі Нотр-Дам (квітень 2019 р.).



Рис. 1.14. Пожежна установка «Colossus»

Установка має два електричних двигуни потужністю $4 \cdot 10^3$ Вт, які забезпечують швидкість руху $6 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$ [20]. Час роботи складає 5 годин. Установка має бездротовий канал управління в радіусі $(300 \div 1000)$ м.

Враховуючи бойові дії, які ведуться на території України, слід виділити роботизовану установку Wolf R1 розробки компанії Alpha Robotics

(Німеччина), представлену на ринку України компанією Magirus (Рис. 1.15). Дана роботизована система має наступні технічні характеристики: два електричних двигуни потужністю 7,5 кВт кожен, швидкість руху до 15 км/год, розміри 1500 x 1200 x 1300 мм, до 900 кг спорядженої ваги. Система гасіння включає: водяну гармату з продуктивністю до 2000 л/хв при тиску 10 бар, дальність подачі води — до 65 м. Робот забезпечений чотирма статичними камерами та опціонально двома динамічними камерами для передачі теплових і звичайних зображень. Час роботи складає до 8 годин. Дистанційне управління здійснюється у радіусі до 250 м, або до 2500 м через систему Magirus TacticNet [94].



Рис. 1.15. Роботизована установка Wolf R1

Роботизована установка Wolf R1 активно застосовується підрозділами ДСНС під час війни. Зокрема, вона застосовується для гасіння пожеж в районах з високим ризиком вибухів боєприпасів, а також для ліквідації загорянь військової техніки. Активного залучення система зазнала при масованих ракетно-дронових ударах. Робот здійснює гасіння пожеж у місцях можливих повторних ударів, що виключає людські втрати серед рятувальників. Дистанційність забезпечує безпеку операторів, дозволяючи безпечно керувати процесом гасіння.

До представників наземних засобів пожежогасіння відносяться і пожежні мотоцикли [21]. В 1920÷1930 -х роках в різних країнах були поширені важкі пожежні мотоцикли із коляскою та насосом. Прикладом такого рішення був радянський пожежний мотоцикл Л-600.

Пожежні мотоцикли використовуються в Великобританії, Японії, Індії на ранній стадії пожежі [22]. Наприклад мотоцикл BMW R1200RT має дві 25-літрових ємності із водою та піною, що з'єднані із балоном зі стиснутим повітрям ємністю 6,8 л (рис. 1.15). При гасінні пожежі використовується технологія мілкорозпиленого водяного гасіння Fireexpress. Запас автономного ходу складає 500 км при використанні 5 л бензину на 100 км (швидкість руху $(90 \div 140) \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$).



Рис. 1.16. Пожежний мотоцикл

Слід зазначити, що випуск пожежних мотоциклів скорочується [21] внаслідок зменшення їх попиту з боку пожежних підрозділів.

В останній час з'явився новий клас мобільних засобів пожежогасіння – пожежні квадроцикли [1, 21]. На рис. 1.17 наведено зображення пожежного квадроциклу РМ 250 FHL-7, який має бак для води ємністю 100 л, пожежні рукава довжиною 50 м. Продуктивність такого засобу пожежогасіння складає $40 \text{ л} \cdot \text{хв}^{-1}$ при робочому тиску $(2 \div 4) \text{ атм}$. Швидкість руху пожежного квадроциклу – $70 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$.

Пожежні квадроцикли доцільно використовувати при гасінні лісових пожеж.



Рис. 1.17. Пожежний квадроцикл

Достатньо ефективними на початковій стадії розвитку пожежі є ручні засоби пожежогасіння. Прикладом возимого засобу є установка УПТВ 50/50 [23], якою захищаються такі об'єкти, як банки, бібліотеки, музеї, лікарні тощо. Така установка має характеристики:

- тиск водяного насосу – $(15 \div 20)$ МПа;
- продуктивність – $15 \text{ л} \cdot \text{хв}^{-1}$;
- об'єм баку із водою – 50 л;
- об'єм баку із піноутворювачем – 2,5 л;
- довжина пожежного рукава – $(40 \div 100)$ м.

Слід зазначити, що така установка забезпечує гасіння пожежі в автономному режимі роботи.

Серед спеціальних пожежних автомобілів, які являються новітніми, адаптованими розробками у гасінні лісових пожеж слід виділити СПА на базі Toyota Hilux, який використовується Головним управлінням ДСНС України у Полтавській області (Рис. 1.18.). Спеціальний пожежний автомобіль характеризується компактними розмірами, що забезпечує маневрування в умовах міста та інтенсивного трафіку, високою прохідністю, яка дозволяє долати пересічену місцевість та бездоріжжя, витратою пального 11-12 л/100 км (дизель), стійкістю завдяки розташуванню центру ваги.



Рис. 1.18. Спеціальний пожежний автомобіль

Надбудова автомобіля виготовлена з поліпропілену, резервуар для води має об'єм 500 літрів, насос високого тиску забезпечує тиск 37 бар і подачу води на відстань до 18 м у режимі компактного струменя або 15 м у режимі розпиленого струменя, шланг (рукав) високого тиску відзначається термостійкістю та легкістю у використанні, ефективність гасіння дозволяє ліквідувати пожежі класів А, В, С та електроустановки під напругою до 10 кВ. Автомобіль активно використовується для гасіння пожеж у природних екосистемах, зокрема в районах, де проходять лінії електропередач, а також для ліквідації загорянь електромобілів та гібридів на початкових стадіях.

Прикладом ручних засобів пожежогасіння носимого типу є автономні установки АУЕГОС та АУЕГОС-П [24]. Установки включають по дві ємності 8 л та балон із стиснутим повітрям (для АУТГОС – 2л, а для АУТГОС-П – 6,8

л). Компоненти вогнегасної речовини витісняються із ємкостей під тиском 0,3 МПа. Загальна маса заправлених установок складає 20 кг та 25 кг відповідно для АУТГОС та для АУТГОС-П, а максимальна відстань подачі вогнегасної речовини складає відповідно 5 та 7 м.

Особливістю таких засобів пожежогасіння є те, що в якості вогнегасної речовини використовуються гелеутворюючі склади $\text{CaCl}_2(42\%) + \text{Na}_2 \cdot 2,7\text{SiO}_2(28\%)$ та $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(5\%) + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4(22\%) + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2(12\%)$.

Слід також підкреслити, що ці засоби пожежогасіння є автономними.

В останній час з'явився новий мобільний засіб-сігвей, на базі якого вже створені перші зразки мобільних пожежних установок [25]. При наявності інформації стосовно пожежі така установка активізується і по навігатору визначає найближчий пожежний гідрант, до якого підключається і починає гасіння пожежі.

Продуктивність такої пожежної установки складає $20 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$, дальність подачі води – 60 м, а площа покриття вогнегасною рідиною досягає 10^4 м^2 .

Зовнішній вигляд такої мобільної пожежної установки наведено на рис. 1.19. Установка створена в одному екземплярі.



Рис. 1.19. Мобільна пожежна установка на базі сігвея

На рис.1.20 наведено схему мобільної автономної пожежної установки, де зображено: 1 – крило колеса; 2 – платформа; 3 – контейнери у вигляді ємності для вогнегасної речовини; 4 – балон із стисненим повітрям; 5 – редуктор; 6 – рульовий стовп; 7 – кермо; 8 – форсунка; 9 – органи управління; 10 – гнучкий шланг для гідравлічних з’єднань; 11 – вентиль. Контейнери 3 встановлені на крилах 1 сігвея, балон із стисненим повітрям 4 встановлений на платформі 2. На балоні із стисненим повітрям 4 встановлений редуктор 5, з’єднаний із балоном зі стисненим повітрям 4. На рульовому стовпі 6 сігвею встановлено вентиль 11, а на кермі 7 – форсунка 8 та органи управління 9. Гнучкі шланги 10 розміщені всередині платформи 2 сігвея та в його рульовому стовпі 6. Гнучкі шланги 10 забезпечують гідравлічне з’єднання між редуктором 5 та контейнерами 3 із вогнегасною речовиною (через вентиль 11), а також між контейнерами 3 та через органи управління 9 із форсункою 8 [26].

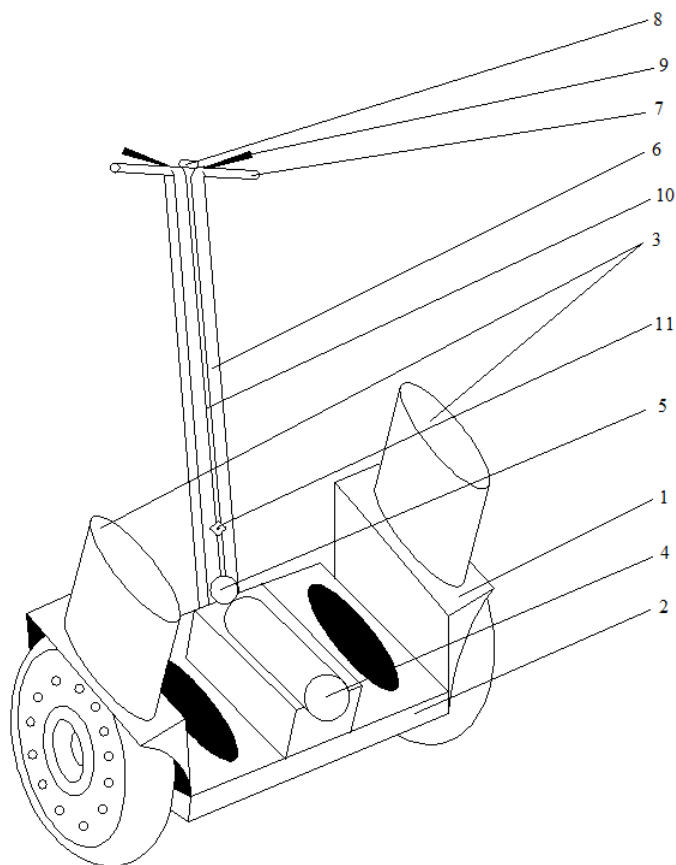


Рис. 1.20. Мобільна пожежна установка на базі сігвея

В якості вогнегасної речовини може використовуватись вода, порошок, гелеутворюючий склад. На відміну від установки, яка зображена на рис.1.18, ця пожежна установка має розширений спектр функційних можливостей.

Джерелом живлення сігвею є дві літій-іонні акумуляторні батареї, на одному заряді яких можна проїхати до 40 км [27]. Час заряду батарей складає $(6 \div 10)$ год. Для сігвея корисне навантаження досягає 140 кг, тобто при вазі

людини-оператора 80 кг, запас вогнегасячої речовини може складати до 50 кг. Швидкість руху – $20 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$. Для важких сігвеїв швидкість руху може досягати $50 \text{ км} \cdot \text{год}^{-1}$. Вага легкого сігвею не перевищує $(20 \div 30) \text{ кг}$, потужність електричного двигуна складає $(1,0 \div 1,5) \text{ кВт}$.

Основною перевагою такого мобільного пожежного засобу, що відрізняє його від інших мобільних засобів, є компактність, малі габарити та дуже висока маневреність. До кращих моделей сігвеїв належать: AirwheelS5, AirwheelA3, IOCHICSMARTLC 1.06, WindTechH10, LikeBikeElite.

1.5. Технічні особливості рухомих компактних засобів гасіння пожеж.

Аналіз матеріалу, наданому в пп. 1.1 ÷ 1.4, дозволяє виділити особливості, що притаманні мобільним засобам пожежогасіння. До числа основних особливостей мобільних засобів пожежогасіння належать:

- переважна більшість мобільних засобів пожежогасіння орієнтована на розвинуті пожежі;
- переважна більшість мобільних засобів пожежогасіння орієнтована на гасіння зовнішніх загорянь і лише одиниці (квадрокоптери, возимі, носимі, на базі сігвеїв) – на гасіння пожеж в приміщеннях;
- як правило, всі мобільні засоби пожежогасіння (крім автомобільних засобів цільового призначення, установок АУТГОС, АУТГОС-П, на базі сігвею) в якості вогнегасних речовин використовують воду і менше-піну;
- лише одиничні екземпляри пожежних установок є автономними (квадрокоптери, мотоциклетні, квадроциклетні та деякі екземпляри, що реалізовані на базі сігвеїв);
- автономні квадрокоптерні засоби пожежогасіння не завжди можуть бути використані в приміщеннях (склади, бібліотеки тощо);

- використання носимих засобів пожежогасіння обмежено запасом вогнегасної речовини;

- використання возимих засобів пожежогасіння обмежено швидкістю їх переміщення і малою маневреністю;

- переважна більшість мобільних засобів пожежогасіння не є екологічно чистими (виключення – дирижаблі, квадрокоптери, возимі, носимі та на базі сігвеїв);

- перспективним мобільним засобом пожежогасіння є засіб на базі сігвею, який є автономним, компактним, малогабаритним, високоманевреним і може використовуватись для гасіння пожеж (особливо на ранній стадії) в приміщеннях за допомогою розширеної гами вогнегасних речовин;

- якщо основна частина мобільних засобів пожежогасіння має наукове обґрунтування стосовно вибору їх параметрів та характеристик, то для мобільних пожежних установок, що реалізовані на базі сігвеїв, таке обґрунтування практично відсутнє.

Із розгляду особливостей мобільних засобів пожежогасіння витікає основна задача дослідження – обґрунтування параметрів та характеристик мобільних пожежних установок на базі сігвеїв, в основі якого лежить використання математичних моделей елементів таких установок, ділянки доставки вогнегасної речовини та осередку горіння.

Для вирішення цієї задачі необхідно:

- виявити динамічні властивості пожежі на прикладі класу В при її гасінні вогнегасним порошком та формалізувати їх у вигляді часових та частотних характеристик;

- створити комплекс математичних моделей, які описують процеси, що протікають в елементах мобільної пожежної установки на базі сігвею та на ділянці доставки вогнегасної речовини до осередку горіння;

- виявити та визначити основні параметри, які характеризують струмінь вогнегасної речовини при її подачі мобільною пожежною установкою;
- визначити часові та силові параметри мобільної пожежної установки, а також динамічні характеристики людини-оператора пожежної установки, як динамічної ланки в системі управління кутовим положенням форсунки для розпилювання вогнегасної речовини;
- визначити основні параметри системи управління кутовим положенням форсунки та виявити особливості експлуатації мобільних пожежних установок, що реалізовані на базі сігвеїв.

1.6. Висновки за розділом 1

1.6.1. Відповідно до класифікації мобільних засобів пожежогасіння, згідно з якою ці засоби поділені на повітряні, водні та наземні, розглянуті типові зразки засобів пожежогасіння та їх характеристики.

1.6.2. Виявлено, що переважна більшість мобільних засобів пожежогасіння орієнтована на гасіння пожеж поза меж будівель, приміщень тощо.

1.6.3. Показано, що у зв'язку із появою нового мобільного засобу - сігвеїв, відкривається можливість для створення ефективного мобільного засобу пожежогасіння на базі сігвеїв.

1.6.4. Сформульована основна задача дослідження, яка передбачає обґрунтування параметрів та характеристик мобільних пожежних установок на базі сігвеїв, а також визначений ряд підзадач, вирішення яких забезпечує рішення основної задачі дослідження.

РОЗДІЛ 2

ПОЖЕЖІ КЛАСУ В. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ

2.1. Хімічна реакція. Її швидкість. Побудова загального рівняння процесу гасіння пожежі.

Гасіння полум'я рідини, що горить, шляхом введення дисперсних часток із концентрацією $\omega > \omega_{кр}$, де $\omega_{кр}$ – критична концентрація, обумовлено зменшенням швидкості виділення тепла в об'ємі полум'я внаслідок падіння величини швидкості реакції за рахунок загибелі активних центрів на поверхні часток. Формалізація цього процесу може бути представлена наступним чином [28]

$$\rho c V \frac{dT}{dt} = q_1 - q_2, \quad (2.1)$$

де ρ, c – щільність та питома теплоємність полум'я відповідно; V – об'єм полум'я; T – температура полум'я; q_1 – швидкість виділення тепла в області полум'я; q_2 – швидкість втрат тепла від полум'я в навколишній простір.

Для виразів q_i можна записати

$$q_1 = QUV; \quad (2.2)$$

$$q_2 = \alpha S(T - T_0), \quad (2.3)$$

де Q – тепловий ефект реакції; U – швидкість реакції; α – коефіцієнт тепловіддачі, що враховує втрати тепла за рахунок конвекції та за рахунок

випромінювання; T_0 – температура навколишнього середовища; S – площа поверхні горіння.

Якщо врахувати, що має місце

$$V = Sh; \quad \theta = T_n - T, \quad (2.4)$$

де h – товщина полум'я; T_n – початкова температура, то диференційне рівняння (2.1) буде трансформовано наступним чином

$$\tau \frac{d\theta}{dt} + \theta = T_n - T_0 - QUh\alpha^{-1}. \quad (2.5)$$

В цьому диференційному рівнянні параметр τ має зміст постійної часу пожежі при її гасінні порошковим складом.

Постійна часу пожежі визначається виразом

$$\tau = \rho ch\alpha^{-1}. \quad (2.6)$$

Швидкість реакції U визначається часом життя активних центрів Δt та усередненою по товщині полум'я концентрацією активних центрів $\mu(x)$ [29]. Для швидкості реакції можна записати вираз

$$U = (\Delta t \cdot h)^{-1} \int_0^h \mu(x) dx. \quad (2.7)$$

Слід зазначити, що внаслідок термічної активації за одиницю часу в одиничному об'ємі полум'я має місце в утворенні μ_0 активних центрів. Ці активні центри дифундують внаслідок наявності сил, що обумовлені наявністю градієнта їх концентрації [30,31]. Результуючий вектор напрямку

дифундування орієнтований до границі фронту полум'я, де відбувається знищення активних центрів. Остання обставина пов'язана з тим, що активні центри втрачають свою активність при взаємодії із продуктами реакції або пального на інтервалі, величина якого визначається середньою довжиною їх вільного пробігу. При цьому не створюються нові активні центри [32].

Слід також відмітити, що середня довжина вільного пробігу активних центрів набагато менше величини параметра h , внаслідок чого границею, за межами якої відсутня хімічна реакція, можна вважати поверхню полум'я [33, 34].

Внаслідок впливу на полум'я дисперсних часток, які містяться в порошковому складі, буде мати місце загибель активних центрів. Ця загибель обумовлена їх зіткненням із молекулами горючої суміші та із дисперсними частками.

Концентрація активних центрів $\mu(x)$ описується диференціальним рівнянням дифузії [29, 34, 35], яке має вигляд

$$D \frac{d^2 \mu}{dx^2} - A\mu + \mu_0 = 0, \quad (2.8)$$

де D – коефіцієнт дифузії активних центрів; A – константа, яка характеризує швидкість обриву ланцюгів в об'ємі полум'я при зіткненні із молекулами суміші, що реагує – a_1 , швидкості обриву ланцюгів на поверхні дисперсних часток порошкового складу – a_2 та швидкості розгалуження ланцюгів – a_3 ; x – координата в напрямку до границі полум'я.

Швидкості a_i пов'язані між собою наступним чином [38]

$$A = a_1 + a_2 - a_3. \quad (2.9)$$

Граничними умовами для диференційного рівняння (2.8) є умови, які мають вигляд

$$\begin{aligned} x = 0, & \quad \mu = 0; \\ x = h, & \quad \mu = 0. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Рішення диференційного рівняння (2.8) представимо у вигляді двох адитивних складових [36]

$$\mu = \mu_1 + \mu_2, \quad (2.11)$$

де μ_1 – загальне рішення однорідного диференційного рівняння; μ_2 – часткове рішення неоднорідного диференційного рівняння.

Рішення μ_1 та μ_2 мають вигляд

$$\mu_1 = C_1 \exp(\lambda x) + C_2 \exp(-\lambda x); \quad (2.12)$$

$$\mu_2 = -C_3 A, \quad (2.13)$$

де $C_i, i = \overline{1,3}$ – постійні інтегрування.

Постійна інтегрування C_3 визначається за умови

$$C_3 A = \mu_0, \quad (2.14)$$

із якої витікає, що

$$C_3 = \mu_0 A^{-1}. \quad (2.15)$$

Постійні інтегрування C_1 та C_2 визначаються із врахуванням граничних умов (2.10), згідно із якими має місце система алгебраїчних рівнянь виду

$$\begin{aligned} C_1 + C_2 &= -\mu_0 A^{-1}; \\ C_1 \exp(\lambda h) + C_2 \exp(-\lambda h) &= -\mu_0 A^{-1}, \end{aligned} \quad (2.16)$$

де $\lambda = (AD^{-1})^{0,5}$ – модуль коренів характеристичного рівняння, яке відповідає однорідному диференційному рівнянню диференційного рівняння (2.8).

Для розв'язання системи алгебраїчних рівнянь (2.16) скористаємось формулами Крамера [36], внаслідок чого будемо мати

$$C_1 = \Delta_1 \cdot \Delta^{-1}; \quad C_2 = \Delta_2 \cdot \Delta^{-1}, \quad (2.17)$$

де

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \begin{vmatrix} -\mu_0 A^{-1} & 1 \\ -\mu_0 A^{-1} & \exp(-\lambda h) \end{vmatrix}; & \Delta_2 &= \begin{vmatrix} 1 & -\mu_0 A^{-1} \\ \exp(\lambda h) & -\mu_0 A^{-1} \end{vmatrix}; \\ \Delta &= \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ \exp(\lambda h) & \exp(-\lambda h) \end{vmatrix}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

За умови (2.18) постійні інтегрування C_1 та C_2 визначаються виразами

$$C_1 = \mu_0 A^{-1} [1 - \exp(-\lambda h)] [\exp(-\lambda h) - \exp(\lambda h)]^{-1}; \quad (2.19)$$

$$C_2 = -\mu_0 A^{-1} [1 - \exp(-\lambda h)] [\exp(-\lambda h) - \exp(\lambda h)]^{-1}. \quad (2.20)$$

Тоді рішення (2.11) диференційного рівняння (2.8) із граничними умовами (2.10) буде мати вигляд

$$\mu = -\mu_0 A^{-1} \left[1 + [\exp(-\lambda h) - \exp(\lambda h)]^{-1} \times \right. \\ \left. \times [[1 - \exp(-\lambda h)] \exp(\lambda x) - [1 - \exp(\lambda h)] \exp(-\lambda x)] \right]. \quad (2.21)$$

Перетворимо цей вираз. З цією метою врахуємо наступні співвідношення

$$1 - \exp(-\lambda h) = 1 - \exp(-0,5\lambda h) \exp(-0,5\lambda h) = \\ = \exp(-0,5\lambda h) [\exp(0,5\lambda h) - \exp(-0,5\lambda h)] = 2 \exp(-0,5\lambda h) \operatorname{sh} 0,5\lambda h; \quad (2.22)$$

$$1 - \exp(\lambda h) = 1 - \exp(0,5\lambda h) \exp(0,5\lambda h) = \\ = \exp(0,5\lambda h) [\exp(-0,5\lambda h) - \exp(0,5\lambda h)] = \\ = -\exp(0,5\lambda h) [\exp(0,5\lambda h) - \exp(-0,5\lambda h)] = -2 \exp(0,5\lambda h) \operatorname{sh} 0,5\lambda h. \quad (2.23)$$

Якщо врахувати співвідношення (2.22) та (2.23), то складові, що стоять в квадратних скобках рішення (2.21), будуть трансформовані наступним чином

$$[1 - \exp(-\lambda h)] [\exp(-\lambda h) - \exp(\lambda h)]^{-1} \exp(\lambda x) = \\ = -2 \exp(-0,5\lambda h) \exp(\lambda x) \operatorname{sh} 0,5\lambda h [\exp(\lambda h) - \exp(-\lambda h)]^{-1} = \\ = -\operatorname{sh} 0,5\lambda h \exp[\lambda(x - 0,5h)] (\operatorname{sh} \lambda h)^{-1}; \quad (2.24)$$

$$[1 - \exp(\lambda h)] [\exp(-\lambda h) - \exp(\lambda h)]^{-1} \exp(-\lambda x) = \\ = 2 \exp(0,5\lambda h) \exp(-\lambda x) \operatorname{sh} 0,5\lambda h [\exp(\lambda h) - \exp(-\lambda h)]^{-1} = \\ = \operatorname{sh} 0,5\lambda h \exp[-\lambda(x - 0,5h)] (\operatorname{sh} \lambda h)^{-1}. \quad (2.25)$$

Після підстановки виразів (2.24) та (2.25) в рішення (2.21) одержимо

$$\begin{aligned}
\mu &= \mu_0 A^{-1} \left[1 - \operatorname{sh} 0,5\lambda h \left[\exp[\lambda(x - 0,5h)] + \exp[-\lambda(x - 0,5h)] (\operatorname{sh} \lambda h)^{-1} \right] \right] = \\
&= \mu_0 A^{-1} \left[1 - 2\operatorname{sh} 0,5\lambda h \operatorname{ch} [\lambda(x - 0,5h)] \left[2\operatorname{sh} 0,5\lambda h \operatorname{ch} 0,5\lambda h \right]^{-1} \right] = \\
&= \mu_0 A^{-1} \left[1 - \operatorname{ch} [\lambda(x - 0,5h)] \left[\operatorname{ch} 0,5\lambda h \right]^{-1} \right]
\end{aligned} \quad (2.26)$$

Для визначення швидкості реакції U підставимо вираз (2.26) до (2.8), внаслідок чого одержимо [35]

$$\begin{aligned}
U &= \mu_0 (\Delta t h A)^{-1} \int_0^h \left[1 - \operatorname{ch} [\lambda(x - 0,5h)] \left[\operatorname{ch} 0,5\lambda h \right]^{-1} \right] dx = \\
&= \mu_0 (\Delta t h A)^{-1} \int_{-0,5h}^{0,5h} \left[1 - \operatorname{ch} \lambda y \left(\operatorname{ch} 0,5\lambda h \right)^{-1} \right] dy = \\
&= \mu_0 (\Delta t h A)^{-1} \left[y - \operatorname{sh} \lambda y \left(\lambda \operatorname{ch} 0,5\lambda h \right)^{-1} \right]_{-0,5h}^{0,5h} = \\
&= \mu_0 (\Delta t h A)^{-1} \left[1 - \operatorname{th} 0,5\lambda h \left(\operatorname{ch} 0,5\lambda h \right)^{-1} \right]
\end{aligned} \quad (2.27)$$

Вираз (2.27) представляє собою математичну модель для швидкості хімічної реакції. Параметрами цієї моделі є:

- кількість активних центрів μ_0 ;
- час життя Δt активних центрів;
- товщина полум'я h ;
- коефіцієнт дифузії D ;
- константа, що характеризує швидкість обриву ланцюгів в об'ємі полум'я при зіткненні із молекулами суміші, яка реагує – a_1 ;
- константа, що характеризує швидкість обриву ланцюгів на поверхні дисперсних часток порошкового складу – a_2 ;
- константа, що характеризує швидкість розгалуження ланцюгів – a_3 .

На рис. 2.1 наведені залежності

$$\mu_* = A \mu_0^{-1}; \quad U_* = \Delta t h A U \mu_0^{-1}, \quad (2.28)$$

які одержані для характерної величини параметра h [37] та при $\lambda = 9,5 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$ (залежності 3 та 6); $\lambda = 12,5 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$ (залежності 2 та 5); $\lambda = 15,5 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$ (залежності 1 та 4).

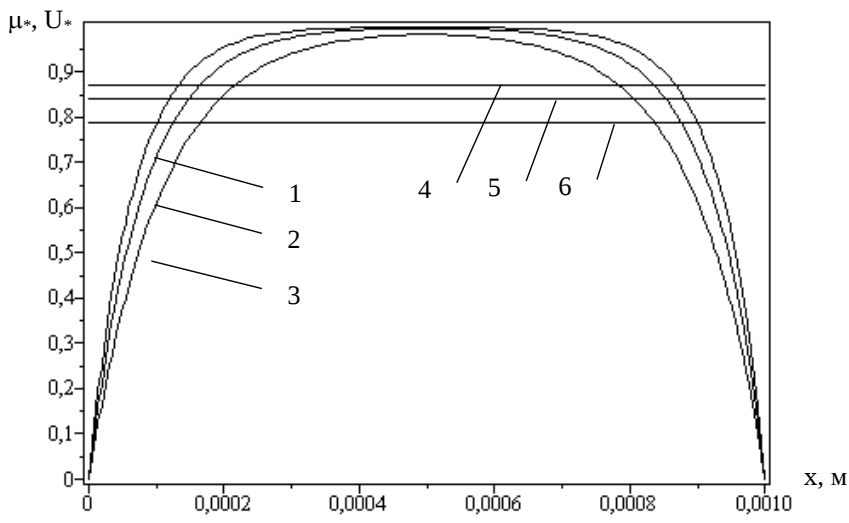


Рис. 2.1. Залежності $\mu_* = \mu_*(x)$ – 1 ÷ 3 та $U_* = U_*(x)$ – 4 ÷ 6: 1,4 – $\lambda = 15,5 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$; 2,5 – $\lambda = 12,5 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$; 3,6 – $\lambda = 9,5 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$

Характер цих залежностей свідчить про те, що їх граничне значення дорівнює одиниці. Крім того, із аналізу залежності $U_* = U_*(x)$ витікає, що має місце співвідношення

$$\text{th} 0,5\lambda h (0,5\lambda h)^{-1} \ll 1,0 \quad (2.29)$$

та із зростанням величини λ ця нерівність підсилюється.

Внаслідок того, що має місце умова (2.29), вираз для швидкості реакції (2.27) буде трансформовано наступним чином

$$U = \mu_0 (\Delta t A)^{-1}. \quad (2.30)$$

Із врахуванням цього співвідношення швидкість виділення тепла в області полум'я q_1 згідно (2.2) буде описуватись наступним виразом

$$q_1 = QV\mu_0 (\Delta t A)^{-1}. \quad (2.31)$$

Слід зазначити, що величини μ_0 та A залежать від температури.

2.2. Характеристики та динамічні моделі пожежі

Для виявлення динамічних властивостей пожежі при її гасінні порошковим складом, яка є об'єктом управління системи автоматичного пожежогасіння [28], необхідно знайти рішення диференційного рівняння (2.1) або (2.5). З цією метою слід установити функціональні залежності μ_0 та A від температури.

Для величини μ_0 згідно [30, 31] можна записати

$$\mu_0 = K_0 C_0^v \exp \left[- \frac{E}{RT} \right] \quad (2.32)$$

де K_0 – параметр; C_0 – концентрація компонента, якого не достаче в суміші; R – газова постійна; E – енергія активації; v – порядок утворення активних центрів молекул внаслідок термічної активності.

Для швидкостей $a_i, i = \overline{1,3}$, що визначають константу A має місце [29, 34]

$$a_i = b_i (\Delta t)^{-1}, \quad i = \overline{1,3}, \quad (2.33)$$

де b_1 – вірогідність обриву ланцюгів в об’ємі полум’я при зіткненні із молекулами суміші, що реагує; b_2 – вірогідність обриву ланцюгів на поверхні дисперсних часток порошкового складу; b_3 – вірогідність розгалуження ланцюгів.

Залежність вірогідностей b_i від температури має наступний опис [29, 34]

$$b_i = b_{i0} \exp \left[-E_i (RT)^{-1} \right], \quad i = \overline{1,3}, \quad (2.34)$$

де b_{i0} – постійні, що не залежать від температури; E_i – енергія активації ($i=1$ – обриву ланцюгів на молекулах газу; $i=2$ – на поверхні часток порошкового складу; $i=3$ – розгалуження ланцюгів).

Підставимо до виразів (2.32), (2.34) вирази для температури згідно співвідношення (2.4). При цьому врахуємо, що величина θ для вуглеводнів не перевищує декількох десятків градусів [39, 40], а величина початкової температури T_n складає приблизно $1,6 \cdot 10^3$ K [39, 41]. В цьому випадку вираз (2.32) буде трансформовано наступним чином

$$\begin{aligned} \mu_0 &= K_0 C_0^v \exp \left[-E (RT)^{-1} \right] = \\ &= K_0 C_0^v \exp \left[-E \left[RT_n \left(1 - \theta T_n^{-1} \right)^{-1} \right]^{-1} \right] = K_0 C_0^v \exp \left[-E (RT_n)^{-1} \right], \end{aligned} \quad (2.35)$$

а вирази $b_i, i = \overline{1,3}$ будуть мати вигляд

$$b_i = b_{i0} \exp[-E_i(RT)^{-1}] = b_{i0} \exp\left[-E_i\left[RT_n(1 - \theta T_n^{-1})^{-1}\right]^{-1}\right] =$$

$$= b_{i0} \exp[-E_i(RT_n)^{-1}] = b_{in}. \quad (2.36)$$

Із врахуванням (2.35) та (2.36) вираз швидкості хімічної реакції можна переписати у вигляді

$$U = K_0 C_0^v \exp[-E(RT_n)^{-1}] (b_{1n} + b_{2n} - b_{3n})^{-1}, \quad (2.37)$$

де показник ступеню v знаходиться в діапазоні $(0,4 \div 2,0)$ [42].

Запишемо вираз для швидкості U наступними чином

$$U = m C_0^v, \quad (2.38)$$

де

$$m = K_0 \exp[-E(RT_n)^{-1}] (b_{1n} + b_{2n} - b_{3n})^{-1}. \quad (2.39)$$

Врахуємо, що між швидкістю реакції та умовами змішування компонентів горючої суміші має місце зв'язок. Цей зв'язок визначається балансом маси кисню, який витрачається при горінні, та маси кисню, який поступає до полум'я із навколишнього середовища.

Кількість кисню, який витрачається в об'ємі зони горіння, визначається виразом $m C_0^v Sh$, а кількість кисню, що поступає в зону горіння, визначається виразом $\gamma(C - C_0)S$ [42], де γ – коефіцієнт масовіддачі, а C – концентрація кисню в навколишньому середовищі.

Умовою балансу мас є

$$mC_0^y h = \gamma C (1 - C_0 C^{-1}), \quad (2.40)$$

із якої витікає, що

$$U = mC_0^y = \gamma Ch^{-1} (1 - C_0 C^{-1}) \quad (2.41)$$

Слід зазначити, що в реальних умовах пожежі має місце [40, 42]

$$C_0 C^{-1} \ll 1, 0, \quad (2.42)$$

що обумовлює наступне співвідношення

$$U = mC_0^y = \gamma Ch^{-1}. \quad (2.43)$$

Якщо врахувати це співвідношення, то диференціальне рівняння (2.5) буде мати вигляд

$$\tau \frac{d\theta}{dt} + \theta = T_n - T_0 - \gamma C Q \alpha^{-1}. \quad (2.44)$$

В початковий момент часу, тобто при $t = 0$, $\theta(0) = 0$. За таких умов рішення диференціального рівняння (2.44) буде описуватись виразом

$$\theta(t) = [T_n - T_0 - \gamma C Q \alpha^{-1}] [1 - \exp(-t\tau^{-1})], \quad (2.45)$$

а залежність температури полум'я згідно (2.4) – виразом [35]

$$T(t) = T_0 + \gamma C Q \alpha^{-1} + [T_n - T_0 - \gamma C Q \alpha^{-1}] \exp(-t\tau^{-1}). \quad (2.46)$$

На рис. 2.2 наведений якісний вигляд залежностей $\theta(t)$ та $T(t)$, які відповідають виразам (2.45) та (2.46).

Залежність (2.45) в термінах технічної кібернетики інтерпретується як перехідна функція пожежі при її гасінні порошковим складом. Такому динамічному об'єкту, яким є пожежа і який має перехідну функцію у вигляді (2.45), будуть відповідати частотні характеристики $A(\omega)$ – амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) та $\phi(\omega)$ – фазово-частотна характеристика (ФЧХ). Ці частотні характеристики описуються виразами [43]

$$A(\omega) = [1 + (\omega\tau)^2]^{-0,5}; \quad (2.47)$$

$$\phi(\omega) = -\arctg\omega\tau, \quad (2.48)$$

де постійна часу τ має опис у вигляді виразу (2.6).

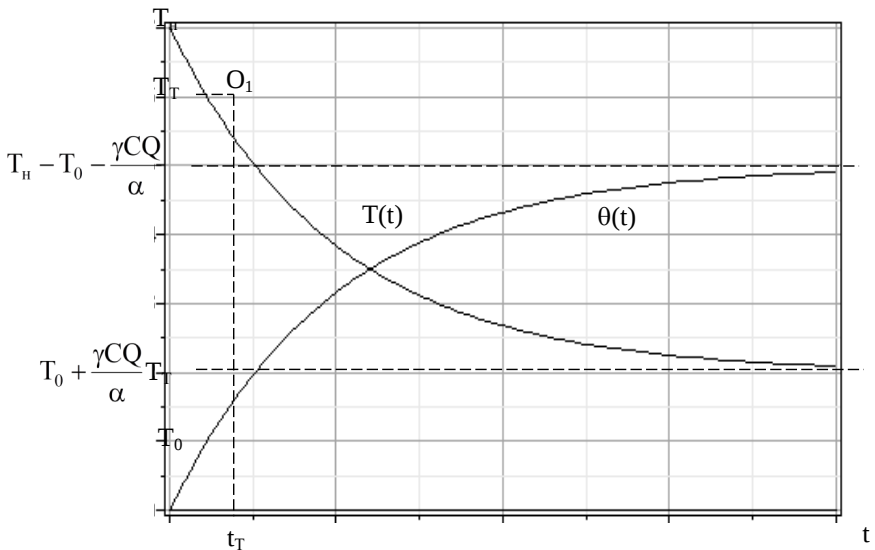


Рис. 2.2. Залежності $\theta(t)$ та $T(t)$

Стосовно до вуглеводнів типовими значеннями параметрів постійної часу є $\rho = 2,0 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$; $c = 1,1 \text{ Дж}(\text{кг} \cdot \text{К})^{-1} [44,45]$; $\alpha = 0,4 \text{ Дж}(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К})^{-1} [46,47]$, внаслідок чого для постійної часу пожежі класу В при її гасінні порошковим складом має місце

$$\tau = 5,5 \text{ h.} \quad (2.49)$$

На рис.2.3 наведена графічна залежність для АЧХ пожежі, а на рис. 2.4 – для ФЧХ пожежі. Залежності наведені для умовної частоти ωh .



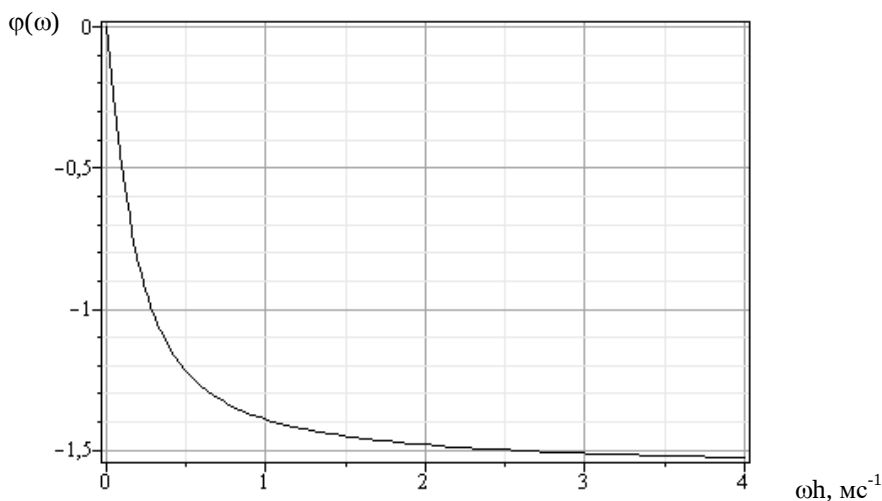


Рис. 2.4. Фазово-частотна характеристика пожежі

Такий динамічний об'єкт описується передаточною функцією, яка має вигляд

$$W(p) = (\tau p + 1)^{-1}, \quad (2.50)$$

а її частота спряжіння дорівнює $0,18 \text{ h}^{-1}$.

За допомогою динамічних характеристик пожежі (2.45), (2.47) та (2.48) можуть бути одержані інші характеристики та параметри пожежі при її гасінні порошковим складом. Зокрема, це стосується такого важливого параметра як час гасіння t_T пожежі.

2.3. Визначення періоду ліквідації пожежі

На рис. 2.2 точці O_1 на залежності $T(t)$ відповідає момент гасіння полум'я, що має місце при T_T – температурі гасіння. Час гасіння t_T пожежі визначається рішенням трансцендентного рівняння, яке має вигляд

$$T(t_T) - T_T = 0, \quad (2.51)$$

де $T(t_T)$ описується виразом (2.46) при $t = t_T$.

Внаслідок того, що величина $\theta(t_T) = T_H - T(t_T) = T_H - T_T$ не перевищує декількох десятків градусів, а час перехідного процесу із похибкою, яка не перевищує 5,0 %, складає $t_n = 3\tau$, то як це витікає із рис. 2.2, час гасіння t_T не буде перевищувати величини постійної часу τ . Цей факт можна підтвердити і наступними міркуваннями. Внаслідок малого діапазону зміни величини $\theta(t_T)$ можна записати вираз для $T(t_T)$, представивши в ньому член $\exp(-t_T \tau^{-1})$ у вигляді усіченого степеневого ряду, який включає два додатки

$$T(t_T) = T_T = T_0 + \gamma C Q \alpha^{-1} + (T_H - T_0 - \gamma C Q \alpha^{-1})(1 - t_T \tau^{-1}) \quad (2.52)$$

Із цього співвідношення витікає, що

$$t_T = \tau (T_H - T_T) (T_H - T_0 - \gamma C Q \alpha^{-1})^{-1}. \quad (2.53)$$

Цей вираз можна переписати наступним чином

$$t_T = \left[1 - (T_T - T_0) (T_H - T_0)^{-1} \right] \left[1 - \gamma C Q [(T_H - T_0) \alpha]^{-1} \right]^{-1} \tau. \quad (2.54)$$

Якщо врахувати, що має місце

$$T_T - T_0 > \lambda C Q \alpha^{-1}, \quad (2.55)$$

із (2.54) витікає, що

$$t_T < \tau, \quad (2.56)$$

тобто час гасіння пожежі класу В порошковим складом не перевищує величини постійної часу цієї пожежі.

2.4. Вогнегасна речовина та її критична концентрація

Критична концентрація $\omega_{кр}$ дисперсних часток порошкового складу, це концентрація, при якій припиняється горіння горючої рідини, тобто $\omega_{кр} = \omega_T$, де ω_T – концентрація гасіння.

Математичною умовою гасіння є система тотожностей [34, 40, 41]

$$\begin{aligned} q_1 &= q_2; \\ \frac{dq_1}{dT} &= \frac{dq_2}{dT}, \end{aligned} \quad (2.57)$$

яка справедлива при $T = T_T = T_n = \theta_T$.

Для того, щоб скористатись системою (2.57), згідно (2.41), а також з урахуванням (2.39) можна записати

$$C_0 = [\gamma C(mh)^{-1}]^{\frac{1}{v}} =$$

$$= [\gamma C(K_0 h)^{-1}(b_{1H} + b_{2H} - b_{3H}) \exp[E(RT_H)^{-1}]]^{\frac{1}{v}}. \quad (2.58)$$

Тоді вираз для швидкості хімічної реакції буде мати вигляд

$$U = \gamma Ch^{-1}(1 - C_0 C^{-1}) = \gamma Ch^{-1} \times$$

$$\times \left[1 - [\gamma C^{1-v}(K_0 h)^{-1}(b_{1H} + b_{2H} - b_{3H}) \exp[E(RT_H)^{-1}]]^{\frac{1}{v}} \right]. \quad (2.59)$$

За допомогою методу найменших квадратів [36] здійснено апроксимацію виразу, який знаходиться в ступені $\frac{1}{v}$, лінійною функцією, тобто вираз

$$[\gamma C^{1-v}(K_0 h)^{-1}(b_{1H} + b_{2H} - b_{3H}) \exp[E(RT_H)^{-1}]]^{\frac{1}{v}}, \quad (2.60)$$

замінемо виразом

$$a \gamma C^{1-v}(K_0 h)(b_{1H} + b_{2H} - b_{3H}) \exp[E(RT_H)^{-1}] \quad (2.61)$$

де a – параметр, який необхідно визначити.

Згідно до методу найменших квадратів параметр a визначається із рішення інтегрального рівняння

$$\int_0^{x_m} \frac{d}{da} \left(x^{\frac{1}{v}} - ax \right)^2 dx = 0, \quad (2.62)$$

де x – вираз, що стоїть в квадратних дужках (2.60); x_m – максимальне значення цього виразу.

Для характерних значень параметрів, що входять до (2.60), $x_m = 0,1$.

Тоді для (2.62) одержимо

$$\begin{aligned} \int_0^{0,1} \frac{d}{da} \left(x^{\frac{1}{v}} - ax \right)^2 dx &= 2 \left(\frac{ax^3}{3} - vx^{(1+2v)v^{-1}} (1+2v)^{-1} \right) \bigg|_0^{0,1} = \\ &= 2 \left(\frac{a \cdot 10^{-3}}{3} - v \cdot 10^{-(1+2v)v^{-1}} (1+2v)^{-1} \right) = 0, \end{aligned} \quad (2.63)$$

звідки витікає вираз для параметра a

$$a = 3v \cdot 10^{(v-1)v^{-1}} (1+2v)^{-1}. \quad (2.64)$$

На рис. 2.5. наведена графічна інтерпретація залежності (2.64)

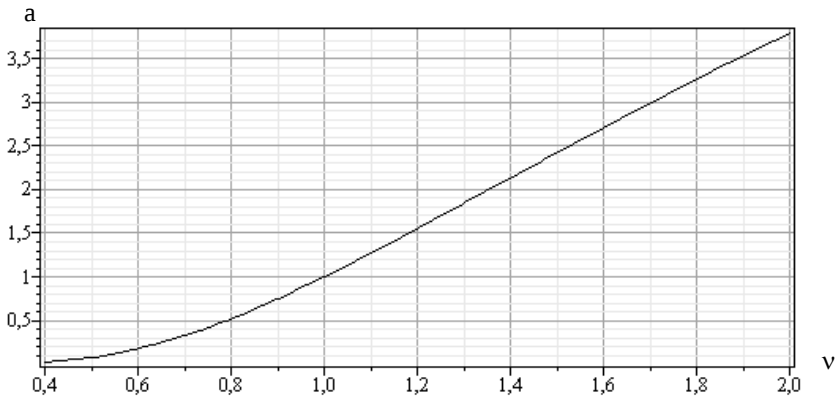


Рис. 2.5. Залежність $a = a(v)$.

Залежність (2.64) є практично лінійною при $v = 0,4 \div 2,0$.

На рис. 2.6 ÷ рис.2.8 наведені залежності $f_1 = x^{\frac{1}{v}}$, $f_2 = ax$, відповідно для $v = 0,75$; $v = 1,5$; та $v = 2,0$. Із аналізу цих залежностей витікає, що із збільшенням параметра v похибка апроксимації зростає.

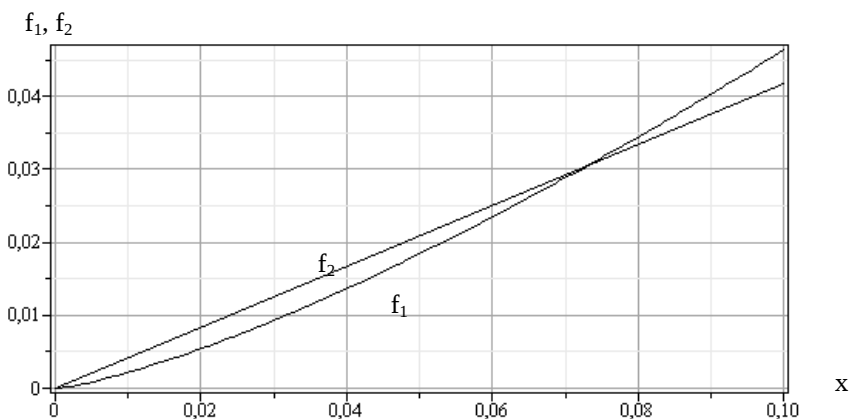


Рис. 2.6. Залежності f_1, f_2 при $v = 0,75$

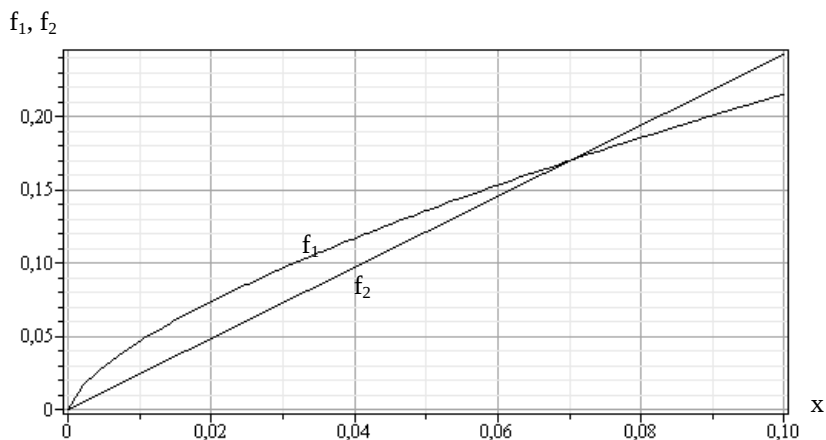


Рис. 2.7. Залежності f_1, f_2 при $v = 1,5$

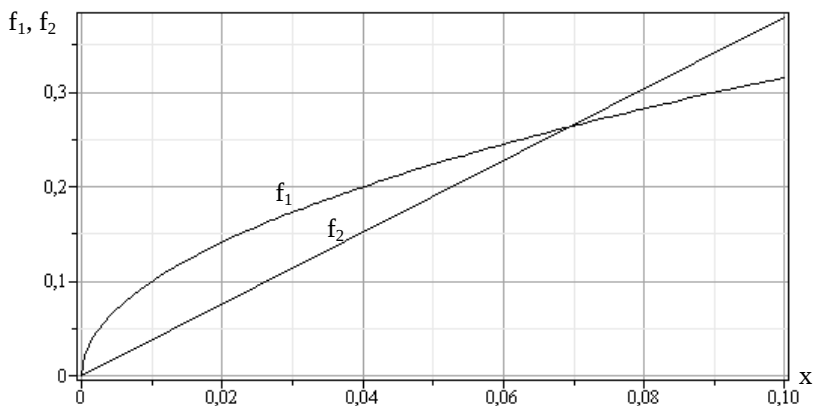


Рис. 2.8. Залежності f_1, f_2 при $\nu = 2,0$

Якщо врахувати наведені міркування, то перша тотожність (2.57) може бути записана наступним чином

$$\gamma C Q \left[1 - a \gamma C^{1-\nu} (K_0 h)^{-1} (b_{1H} + b_{2H} - b_{3H}) \exp \left[E (RT_H)^{-1} \right] \right] = \alpha (T_H - T_0 - \theta_T). \quad (2.65)$$

При відсутності часток порошкового складу в полум'ї вірогідність обриву ланцюгів на поверхні часток дорівнює нулю, тобто $b_{2H} = 0$. При цьому, $T = T_H$. За цих обставин буде мати наступне співвідношення

$$\gamma C Q \left[1 - a \gamma C^{1-\nu} (K_0 h)^{-1} (b_{1H} - b_{3H}) \exp \left[E (RT_H)^{-1} \right] \right] = \alpha (T_H - T_0). \quad (2.66)$$

Після віднімання (2.66) із (2.65) буде мати наступне співвідношення

$$a Q \gamma^2 C^{2-\nu} (K_0 h)^{-1} b_{20} \exp \left[(E - E_2) (RT_H)^{-1} \right] = \alpha \theta_T, \quad (2.67)$$

із якого витікає вираз для вірогідності обриву ланцюгів на поверхні часток порошкового складу

$$b_{20} = \alpha \theta_T K_0 h (a Q \gamma^2 C^{2-\nu})^{-1} \exp \left[- (E - E_2) (RT_H)^{-1} \right] \quad (2.68)$$

Згідно [29] вірогідність обриву ланцюгів на поверхні часток порошкового складу пов'язана з їх концентрацією ω залежністю, яка має вигляд

$$b_{2H} = \pi \xi n l r^2 \omega_T, \quad (2.69)$$

де ξ – вірогідність, яка характеризує загибель активного центра при зіткненні із часткою порошкового складу, що приведена до одиничного об'єму полум'я; n – середнє число зіткнень активного центра із часткою порошкового складу; l – довжина вільного пробігу; r – середній радіус частки порошкового складу.

Якщо врахувати останні два співвідношення, то одержимо вираз для критичної концентрації

$$\begin{aligned} \omega_{кр} = \omega_T = \alpha K_0 h \exp \left[- (E - E_2) (RT_H)^{-1} \right] \theta_T \times \\ \times \left[\pi \xi n l r^2 a Q \gamma^2 C^{2-\nu} \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (2.70)$$

В цьому виразі $\theta_T = T_H - T_T$.

2.5. Висновки за розділом 2

2.5.1 На основі теплового балансу одержано загальне рівняння процесу гасіння пожежі класу В порошковою вогнегасною речовиною, параметром якого є постійна часу, а характер та характеристики такого процесу визначаються швидкістю хімічної реакції горіння.

2.5.2. Для усередненої по товщині полум'я швидкості хімічної реакції горіння одержано математичний опис, який представлено у вигляді рішення диференційного рівняння дифузії і який у першому наближенні визначається концентрацією активних центрів, часом їх життя та швидкостями обриву ланцюгів в об'ємі полум'я та на поверхні порошкового складу, а також швидкістю розгалуження ланцюгів.

2.5.3. Із використанням балансу маси кисню, який витрачається при горінні, та маси кисню, який поступає до полум'я із навколишнього середовища, одержано рішення загального рівняння процесу гасіння пожежі порошковим складом, яке в термінах технічної кібернетики є перехідною функцією пожежі.

2.5.4. Показано, що процес гасіння пожежі є еквівалентом процесу управління в системі автоматичного пожежогасіння, якому відповідає передаточна функція аперіодичної ланки і для якого одержані вирази для частотних характеристик.

2.5.5. Використання часової характеристики пожежі як об'єкта управління системи автоматичного пожежогасіння дозволило одержати оцінку для часу гасіння пожежі, яка свідчить, що цей час не перевищує величини постійної часу пожежі.

2.5.6. Одержано вираз, який визначає критичну концентрацію вогнегасної речовини, що забезпечує гасіння пожежі.

РОЗДІЛ 3

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПАКТНОЇ РУХОМОЇ УСТАНОВКИ ПОЖЕЖОГАСІННЯ. МОДЕЛІ ЇЇ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1. Витікання газу із балону

На початок роботи мобільної пожежної установки в балоні зі стиснутим повітрям має місце тиск P_0 та температура T_0 , а його об'єм дорівнює V . Маса повітря m_0 буде визначатись виразом [45]

$$m_0 = P_0 V (RT_0)^{-1}, \quad (3.1)$$

де R – газова постійна.

При витіканні повітря із балону буде мати місце в зміні маси повітря на величину $\Delta m(t)$, яка описується виразом

$$\Delta m(t) = m_0 - G(t) \cdot t, \quad (3.2)$$

де $G(t)$ – витрати повітря через критичний переріз, площа якого дорівнює S_k , за час t .

Для витрат повітря $G(t)$ можна записати

$$G = \rho_k U_k S_k, \quad (3.3)$$

де ρ_k, U_k – щільність та швидкість повітря в критичному перерізі відповідно, при чому [48,49]

$$\rho_k = P_k (RT_k)^{-1}; \quad (3.4)$$

$$U_k = (kRT_K)^{-0,5}. \quad (3.5)$$

В цих виразах: T_K – температура повітря в критичному перерізі; k – показник адіабати; P_K – тиск в критичному перерізі.

Для тиску P_K та температури T_K мають місце співвідношення

$$P_K = P_1 \left[2(k+1)^{-1} \right]^{k(k-1)^{-1}}; \quad (3.6)$$

$$T_K = 2T_1(k+1)^{-1}, \quad (3.7)$$

де P_1, T_1 – тиск та температура повітря за редуктором.

Після об'єднання виразів (3.3)÷(3.7) одержимо

$$G = P_1(RT_1)^{-1} \left[2(k+1)^{-1} \right]^{(k+1)^{-1}} \left[2kRT_1(k+1)^{-1} \right]^{0,5} S_K. \quad (3.8)$$

В подальшому будемо вважати, що процес витікання повітря із балону є адіабатичним [45,49], а температура на вході і на виході редуктора рівні по величині, то вираз (3.8) можна переписати наступним чином

$$\begin{aligned} G(t) = & P_1(RT_0)^{-1} \left[2(k+1)^{-1} \right]^{(k-1)^{-1}} \left[P^{-1}(t)P_0 \right]^{(k-1)k^{-1}} \times \\ & \times \left[2k(k+1)^{-1} \left[P(t)P_0^{-1} \right]^{(k-1)k^{-1}} \right]^{0,5} S_K, \end{aligned} \quad (3.9)$$

де враховані співвідношення

$$T_1(t) = T(t); \quad (3.10)$$

$$P(t)P_0^{-1} = [T(t)T_0^{-1}]^{k(k-1)^{-1}}. \quad (3.11)$$

Якщо врахувати рівняння стану [48], згідно із яким для тиску $P(t)$ має місце

$$P(t) = \Delta m(t) V^{-1} R T(t), \quad (3.12)$$

то за умови (3.1), (3.2), (3.9) та (3.11) цей вираз буде трансформовано наступним чином

$$P(t) = P(t)^{(k-1)k^{-1}} \cdot \left[P_0^{k^{-1}} - P_1 V^{-1} S_K \left[2(k+1)^{-1} \right]^{(k-1)^{-1}} \times \right. \\ \left. \left[2kRT_0(k+1)^{-1} \right]^{0.5} [P(t)P_0]^{(1-k)(2k)^{-1}} t \right], \quad (3.13)$$

який в компактній формі буде мати вигляд

$$P(t)^{(k+1)(2k)^{-1}} = P_0^{k^{-1}} P(t)^{(k-1)(2k)^{-1}} - At, \quad (3.14)$$

де

$$A = P_1 V^{-1} S_K P_0^{(1-k)(2k)^{-1}} \left[2(k+1)^{-1} \right]^{(k-1)^{-1}} \left[2kRT_0(k+1)^{-1} \right]^{0.5}. \quad (3.15)$$

За час t , на протязі якого повітря витікає із балону, тиск в ньому змінюється на величину $\Delta P(t)$, внаслідок чого можна записати

$$P(t) = P_0 \left[1 - \Delta P(t) P_0^{-1} \right] \quad (3.16)$$

Якщо підставити (3.16) в (3.14), то одержимо

$$P_0^{(k+1)(2k)^{-1}} \left[\left[1 - \Delta P(t) P_0^{-1} \right]^{(k+1)(2k)^{-1}} - \left[1 - \Delta P(t) P_0^{-1} \right]^{(k-1)(2k)^{-1}} \right] = -At. \quad (3.17)$$

В реальних умовах експлуатації мобільних пожежних установок має місце

$$\Delta P(t) P_0^{-1} < 1,0, \quad (3.18)$$

внаслідок чого можна записати наступні співвідношення [50, 51]

$$\begin{aligned} \left[1 - \Delta P(t) P_0^{-1} \right]^{(k+1)(2k)^{-1}} &= 1 - (k+1) \Delta P(t) (2k P_0)^{-1} + \\ &+ 0,5(1 - k^2) \Delta P^2(t) (2k P_0)^{-2}; \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$\begin{aligned} \left[1 - \Delta P(t) P_0^{-1} \right]^{(K-1)(2K)^{-1}} &= 1 - (K-1) \Delta P(t) (2K P_0)^{-1} + \\ &+ 0,5(1 - K^2) \Delta P^2(t) (2K P_0)^{-2}. \end{aligned} \quad (3.20)$$

Для різниці між виразами (3.19) та (3.20) має місце вираз

$$- P(t) (k P_0)^{-1}, \quad (3.21)$$

після підстановки якого в (3.17) маємо

$$\Delta P(t) P_0^{-1} = k A P_0^{2k(k+1)^{-1}} t. \quad (3.22)$$

Після об'єднання виразів (3.16) та (3.22) одержимо вираз для тиску $P(t)$, який має вигляд

$$P(t) = P_0(1 - k B t), \quad (3.23)$$

де

$$B = P_1 S_K (P_0 V)^{-1} \left[2(k+1)^{-1} \right]^{(k-1)^{-1}} \left[2k R T_0 (k+1)^{-1} \right]^{0,5}. \quad (3.24)$$

В наслідок того, що для повітря $k=1,4$ [45], вираз (3.24) трансформується наступним чином

$$B = 0,4 P_1 S_K (P_0 V)^{-1} (R T_0)^{0,5}, \quad (3.25)$$

що в свою чергу, трансформує вираз (3.23) до вигляду

$$P(t) = P_0 \left[1 - 0,5 P_1 S_V (P_0 V)^{-1} (R T_0)^{0,5} t \right] \quad (3.26)$$

Із цього виразу витікає, що тиск повітря на виході балону змінюється у часі за лінійним законом.

Якщо $T_0 = 300 \text{ K}$, то при $t = 30 \text{ с}$, а також при $P_1 P_0^{-1} = 0,1$ та $S_K V^{-1} = 10^{-3} \text{ м}^{-1}$, із (3.26) витікає, що має падіння тиску в балоні із стиснутим повітрям приблизно на 4,0% відносно його початкового значення.

3.2. Рух газу в пневмомагістралі

Тиск $P_1(t)$ на вході із балону, в якому знаходиться стиснуте повітря, та тиск на вході ємності із вогнегасною речовиною $P_2(t)$, тобто на вході та на виході пневмомагістралі пов'язані між собою диференціальним рівнянням [52,53]

$$\tau_{10} \frac{dP_2(t)}{dt} + P_2(t) = K_1 P_1(t - \tau_1), \quad (3.27)$$

де τ_{10} – постійна часу пневмомагістралі, K_1 – коефіцієнт передачі; τ_1 – час запізнення.

Такому диференційному рівнянню відповідає передаточна функція

$$W_1(p) = K_1 \exp(-\tau_1 p) (\tau_{10} p + 1)^{-1}. \quad (3.28)$$

Для параметра τ_1 має місце співвідношення

$$\tau_1 = K_{10} x a^{-1} \quad (3.29)$$

де x – довжина пневмомагістралі; a – швидкість звуку; K_{10} – коефіцієнт пропорційності.

Для повітря $a = 331,4 \text{ мс}^{-1}$ [45], а параметри τ_{10} та K_{10} за умови, що $x \approx 1,0 \text{ м}$ та діаметр отвору пневмомагістралі дорівнює $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, дорівнюють відповідно $2,0 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ та 1,2 [53].

За таких умов передаточна функція пневмомагістралі (3.28) представляє в першому наближенні чисто запізнюючу ланку, тобто [43, 54]

$$W(p) = K_1 \exp(-\tau_1 p), \quad (3.30)$$

де $\tau_1 = 3,6 \text{ мс}$.

Величина параметра K_1 може бути прийнято такою, що дорівнює 0,85 [53].

3.3. Руху вогнегасної речовини в ємності

Рух вогнегасної речовини в ємності під дією тиску $P(t)$ згідно другого закону Н'ютона та відповідно до закону Бернуллі описується диференціальним рівнянням [54]

$$\begin{aligned} \rho H S \frac{dU_1(t)}{dt} = P(t)S - 0,5\rho S [U_2^2(t) - U_1^2(t) + \mu [U_2(t) - U_1(t)]^2] + \\ + \frac{dm}{dt} [U_2(t) - U_1(t)], \end{aligned} \quad (3.31)$$

де ρ – щільність вогнегасної речовини; H – висота ємності; S – площа торця ємності; m – маса вогнегасної речовини; $U_1(t)$ та $U_2(t)$ – швидкість руху вогнегасної речовини відповідно в ємності та на її виході, площа отвору якого дорівнює F ; μ – коефіцієнт, який враховує опір отвору ємності.

Якщо врахувати, що для реактивної складової має місце

$$\frac{dm}{dt} [U_2(t) - U_1(t)] = -\rho S U_1(t) [U_2(t) - U_1(t)], \quad (3.32)$$

то диференціальне рівняння (3.31) буде трансформовано до вигляду

$$\rho H \frac{dU_1(t)}{dt} + 0,5\rho(1+\mu)[U_2(t) - U_1(t)]^2 = P(t), \quad (3.33)$$

яке з урахуванням рівняння нерозірваності [55]

$$U_1(t)S - U_2(t)F = 0 \quad (3.34)$$

остаточно приймає вигляд

$$\rho H \frac{dU_1(t)}{dt} + 0,5\rho(1+\mu)(SF^{-1})^2 U_1^2(t) = P(t). \quad (3.35)$$

Після лінеаризації цього нелінійного диференційного рівняння [43] будемо мати

$$\tau_2 \frac{d\delta U_1(t)}{dt} + \delta U_1(t) = K_2 \delta P(t), \quad (3.36)$$

де δU_1 та δP – малі відхилення швидкості та тиску від номінальних величин;
 τ_2 та K_2 – постійна часу та коефіцієнт передачі ємності відповідно.

Параметри ємності τ_2 та K_2 визначаються виразами

$$\tau_2 = H[(1+\mu)U_{10}]^{-1}(FS^{-1})^2; \quad (3.37)$$

$$K_2 = \left[\rho(1+\mu)U_{10}(SF^{-1})^2 \right]^{-1}, \quad (3.38)$$

де

$$U_{10} = \mu_1 (2P_0 \rho^{-1})^{0.5} FS^{-1}. \quad (3.39)$$

В виразі (3.39) μ_1 – коефіцієнт, який характеризує форму отвору [45]; P_0 – номінальна величина тиску в ємності.

Диференційному рівнянню (3.36) буде відповідати передаточна функція

$$W_2(p) = K_2 (\tau_2 p + 1)^{-1}. \quad (3.40)$$

При $H = 0,5 \text{ м}$; $\mu = 0,5$; $\mu_1 = 0,85$; $P_0 = 0,4 \text{ МПа}$; $FS^{-1} = 1,7 \cdot 10^{-3}$; $\rho = 8 \cdot 10^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ величина постійної часу τ_2 складає 20 мкс.

3.4. Рух вогнегасної речовини по гнучкій магістралі

Процеси, що мають місце при русі вогнегасної речовини в гнучкій магістралі в першому наближенні можна описати за допомогою системи диференційних рівнянь [48, 55]

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \rho \frac{\partial U}{\partial t} = 0; \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + B^{-1} \frac{\partial P}{\partial t} = 0, \quad (3.42)$$

де U – швидкість руху вогнегасної речовини; x – координата вздовж напрямку руху; P – тиск; ρ – щільність вогнегасної речовини; B – модуль об'ємної пружності вогнегасної речовини.

Застосуємо до системи (3.41), (3.42) інтегральне перетворення Лапласа, внаслідок чого ця система трансформується до вигляду

$$\frac{\partial P(x, S)}{\partial x} + \rho S U(x, S) = 0; \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial U(x, S)}{\partial x} + B^{-1} S P(x, S) = 0, \quad (3.44)$$

де

$$\begin{aligned} P(x, S) &= \int_0^{\infty} P(x, t) \exp(-St) dt; \\ U(x, S) &= \int_0^{\infty} U(x, t) \exp(-St) dt. \end{aligned} \quad (3.45)$$

Введемо до розгляду співвідношення

$$\beta^2 = \rho B^{-1} S, \quad (3.46)$$

а також застосуємо до (3.43) та (3.44) операцію диференціювання по координаті x , внаслідок чого буде мати місце система диференціальних рівнянь

$$\frac{d^2 P(x, \beta)}{dx^2} - \beta^2 U(x, \beta) = 0; \quad (3.47)$$

$$\frac{d^2 U(x, \beta)}{dx^2} - \beta^2 P(x, \beta) = 0. \quad (3.48)$$

Рішенням цієї системи є [56]

$$P(x, \beta) = C_1 \exp(\beta x) + C_2 \exp(-\beta x); \quad (3.49)$$

$$U(x, \beta) = C_3 \exp(\beta x) + C_4 \exp(-\beta x); \quad (3.50)$$

де $C_i, i = \overline{1,4}$ – постійні інтегрування.

Для скорочення числа постійних інтегрування підставимо вирази (3.49), (3.50) в диференційні рівняння (3.43), (3.44), внаслідок чого одержимо

$$\beta \exp(\beta x) C_1 - \beta \exp(-\beta x) C_2 = -\rho S \exp(\beta x) C_3 - \rho S \exp(-\beta x) C_4; \quad (3.51)$$

$$-B^{-1} S \exp(\beta x) C_1 - B^{-1} S \exp(-\beta x) C_2 = \beta \exp(\beta x) C_3 - \beta \exp(-\beta x) C_4. \quad (3.52)$$

Визначимо постійні інтегрування C_1 та C_2 за допомогою метода Крамера [36], згідно із котрим можна записати

$$C_1 = \Delta_1 \Delta^{-1}; \quad C_2 = \Delta_2 \Delta^{-1}, \quad (3.53)$$

де

$$\Delta = \begin{vmatrix} \beta \exp(\beta x) & -\beta \exp(-\beta x) \\ -B^{-1} S \exp(\beta x) & -B^{-1} S \exp(-\beta x) \end{vmatrix} = -2\beta S B^{-1}; \quad (3.54)$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} -\rho S [\exp(\beta x) C_3 + \exp(-\beta x) C_4] & -\beta \exp(-\beta x) \\ \beta [\exp(\beta x) C_3 - \exp(-\beta x) C_4] & -B^{-1} S \exp(-\beta x) \end{vmatrix} = 2\beta^2 C_3; \quad (3.55)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \beta \exp(\beta x) & -\rho S[\exp(\beta x)C_3 + \exp(-\beta x)C_4] \\ -B^{-1}S \exp(\beta x) & \beta[\exp(\beta x)C_3 - \exp(-\beta x)C_4] \end{vmatrix} = -2\beta^2 C_4; \quad (3.56)$$

Після об'єднання виразів (3.53)÷(3.56), одержимо співвідношення

$$C_1 = -(\rho B)^{0.5} C_3; \quad C_2 = (\rho B)^{0.5} C_4. \quad (3.57)$$

Підставимо ці співвідношення до виразів (3.49) та (3.50), внаслідок чого одержимо рішення системи диференціальних рівнянь (3.47), (3.48) у вигляді

$$P(x, \beta) = C_1 \exp(\beta x) + C_2 \exp(-\beta x); \quad (3.58)$$

$$U(x, \beta) = -C_1 (\rho B)^{-0.5} \exp(\beta x) + C_2 (\rho B)^{-0.5} \exp(-\beta x). \quad (3.59)$$

Врахуємо вирази [36, 56]

$$\text{sh}(\beta x) = 0,5[\exp(\beta x) - \exp(-\beta x)]; \quad (3.60)$$

$$\text{ch}(\beta x) = 0,5[\exp(\beta x) + \exp(-\beta x)], \quad (3.61)$$

із яких витікає, що

$$\begin{aligned} \text{sh}(\beta x) + \text{ch}(\beta x) &= \exp(\beta x); \\ \text{sh}(\beta x) - \text{ch}(\beta x) &= -\exp(-\beta x). \end{aligned} \quad (3.62)$$

Після підстановки цих виразів до (3.58) та (3.59) отримаємо

$$P(x, \beta) = A \text{ch}(\beta x) + D \text{sh}(\beta x); \quad (3.63)$$

$$U(x, \beta) = -A(\rho B)^{-0.5} \operatorname{sh}(\beta x) - D(\rho B)^{-0.5} \operatorname{ch}(\beta x), \quad (3.64)$$

де

$$A = C_1 + C_2; \quad D = C_1 - C_2. \quad (3.65)$$

Для визначення постійних A та D скористаємося граничними умовами при $x = 0$ та $x = L$, де L – довжина гнучкої магістралі.

Із (3.63) при $x = 0$ витікає, що

$$A = P(0, \beta), \quad (3.66)$$

а із (3.64) витікає, що

$$D = -(\rho B)^{0.5} U(0, \beta). \quad (3.67)$$

При $x = L$ вирази (3.63), (3.64) за умови, що враховані співвідношення (3.66), (3.67), приймають вигляд

$$P(L, \beta) = P(0, \beta) \operatorname{ch}(\beta L) - (\rho B)^{0.5} U(0, \beta) \operatorname{sh}(\beta L); \quad (3.68)$$

$$U(L, \beta) = U(0, \beta) \operatorname{ch}(\beta L) - (\rho B)^{-0.5} P(0, \beta) \operatorname{sh}(\beta L). \quad (3.69)$$

Для передаточної функції гнучкої магістралі має місце

$$W(S) = P(L, \beta) [P(0, \beta)]^{-1} = U(L, \beta) [U(0, \beta)]^{-1}, \quad (3.70)$$

внаслідок чого із урахуванням (3.68) та (3.69) можна записати

$$\begin{aligned} P(L, \beta)[P(0, \beta)]^{-1} &= \operatorname{ch}(\beta L) - (\rho B)^{0,5} U(0, \beta)[P(0, \beta)]^{-1} \operatorname{sh}(\beta L) = \\ &= U(L, \beta)[U(0, \beta)]^{-1} = \operatorname{ch}(\beta L) - (\rho B)^{-0,5} P(0, \beta)[U(0, \beta)]^{-1} \operatorname{sh}(\beta L). \end{aligned} \quad (3.71)$$

Із цих співвідношень витікає, що

$$P(0, \beta)[U(0, \beta)]^{-1} = (\rho B)^{0,5}. \quad (3.72)$$

Якщо підставити це співвідношення до (3.71), а також врахувати (3.46), (3.60) та (3.61), то одержимо

$$\begin{aligned} W(S) &= \operatorname{ch}(\beta L) - \operatorname{sh}(\beta L) = \\ &= 0,5[\exp(\beta L) + \exp(-\beta L) - \exp(\beta L) + \exp(-\beta L)] = \\ &= \exp(-\beta L) = \exp\left[-(\rho B^{-1})^{0,5} L S\right] = \exp(-\tau_3 S), \end{aligned} \quad (3.73)$$

де τ_3 – час запізнення гнучкої магістралі, який визначається виразом

$$\tau_3 = (\rho B^{-1})^{0,5} L. \quad (3.74)$$

При $\rho = 8 \cdot 10^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$; $L = 1,0 \text{ м}$; $B = 1,6 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ величина часу запізнення τ_3 складає 22,4 мс.

3.5. Рух вогнегасної речовини в просторі

Розглянемо рух вогнегасної речовини на ділянці від мобільної пожежної установки до осередку горіння (рис.3.1).

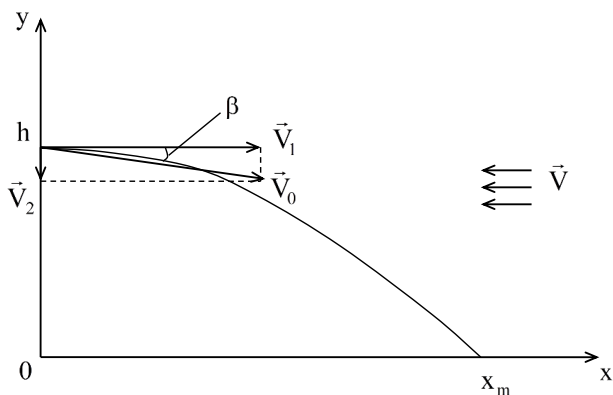


Рис. 3.1. До руху вогнегасної речовини

Вогнегасна речовина подається до осередку горіння із початковою швидкістю $\overline{V_0}$ з висоти h . В загальному випадку при подачі вогнегасної речовини до вогнища горіння має місце вітровий вплив на рух вогнегасної речовини.

У відповідності до основного рівняння динаміки [57] для питомих сил рух вогнегасної речовини описується системою диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} + \alpha \left(\frac{dx}{dt} + \sigma V \right) &= 0; \\ \frac{d^2y}{dt^2} + \alpha \frac{dy}{dt} &= -g \end{aligned} \quad (3.75)$$

із початковими умовами

$$\begin{aligned} x(0) &= 0; \quad y(0) = h; \\ \frac{dx(0)}{dt} &= V_1 = V_0 \cos \beta; \quad \frac{dy}{dt} = -V_2 = -V_0 \sin \beta, \end{aligned} \quad (3.76)$$

де g – прискорення сили тяжіння; α – коефіцієнт опору; $\sigma = \pm 1$; V – швидкість вітру.

Для одержання рішення системи (3.75) із початковими умовами (3.70) застосуємо до цієї системи диференційних рівнянь інтегральне перетворення Лапласа, внаслідок чого одержимо систему алгебраїчних рівнянь у вигляді

$$\begin{aligned}(p^2 + \alpha p)X(p) &= V_1 - \alpha \sigma V p^{-1}; \\ (p^2 + \alpha p)Y(p) &= [(p^2 + \alpha p)h - pV_2 - g]p^{-1},\end{aligned}\quad (3.77)$$

де $X(p) = L[x(t)]$; $Y(p) = L[y(t)]$; L – оператор інтегрального перетворення Лапласа; p – комплексна змінна.

Рішеннями системи алгебраїчних рівнянь (3.78) є

$$X(p) = (pV_1 - \alpha \sigma V)[p^2(p + \alpha)]^{-1} = V_1[p(p + \alpha)]^{-1} - \alpha \sigma V[p^2(p + \alpha)]^{-1}; \quad (3.78)$$

$$Y(p) = [p(p + \alpha)h - V_2p - g][p^2(p + \alpha)]^{-1} = hp^{-1} - (V_2p + g)[p^2(p + \alpha)]^{-1}. \quad (3.79)$$

Для першої складової виразу (3.78) відповідно до методу невизначених коефіцієнтів [36] можна записати

$$V_1[p(p + \alpha)]^{-1} = Ap^{-1} + B(p + \alpha)^{-1}, \quad (3.80)$$

де A, B – коефіцієнти, які необхідно визначити.

Із (3.80) витікає вираз

$$A(p + \alpha) + Bp = V_1, \quad (3.81)$$

якому відповідає система рівнянь

$$\begin{aligned}A + B &= 0; \\ A\alpha &= V_1.\end{aligned}\tag{3.82}$$

Рішеннями цієї системи є

$$A = V_1\alpha^{-1}; \quad B = -V_1\alpha^{-1},\tag{3.83}$$

внаслідок чого для (3.80) можна записати

$$V_1[p(p + \alpha)]^{-1} = V_1\alpha^{-1}[p^{-1} - (p + \alpha)^{-1}]\tag{3.84}$$

Для другої складової виразу (3.78) відповідно до методу невизначених коефіцієнтів буде мати місце

$$\alpha\sigma V[p^2(p + \alpha)]^{-1} = Ap^{-2} + Bp^{-1} + C(p + \alpha)^{-1},\tag{3.85}$$

де A, B, C – коефіцієнти, які необхідно визначити.

Із (3.85) витікає система рівнянь

$$\begin{aligned}B + C &= 0; \\ A + B\alpha &= 0; \\ A\alpha &= \alpha\sigma V.\end{aligned}\tag{3.86}$$

У відповідності до методу Крамера [11, 12] рішення цієї системи алгебраїчних рівнянь визначаються виразами

$$A = \Delta_1 \Delta^{-1}; \quad B = \Delta_2 \Delta^{-1}; \quad C = \Delta_3 \Delta^{-1}, \quad (3.87)$$

де

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & 0 \\ \alpha & 0 & 0 \end{vmatrix} = -\alpha^{-2}; \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & \alpha & 0 \\ \alpha \sigma V & 0 & 0 \end{vmatrix} = -\alpha^{-2} \sigma V; \quad (3.88)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ \alpha & \alpha \sigma V & 0 \end{vmatrix} = \alpha \sigma V; \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & \alpha & 0 \\ \alpha & 0 & \alpha \sigma V \end{vmatrix} = -\alpha \sigma V.$$

Після об'єднання (3.87) та (3.88) будемо мати

$$A = \sigma V; \quad B = -\sigma V \alpha^{-1}; \quad C = \sigma V \alpha^{-1}, \quad (3.89)$$

що трансформує вираз (3.85) наступним чином

$$\alpha \sigma V [p^2 (p + \alpha)]^{-1} = \sigma V \alpha^{-1} [\alpha p^{-2} - p^{-2} + (p + \alpha)^{-1}] \quad (3.90)$$

Після застосування до (3.84) та (3.90) зворотного перетворення Лапласа [58] одержимо вираз рішення першого диференційного рівняння (3.75) у вигляді

$$x(t) = \alpha^{-1} (V_1 + \sigma V) [1 - \exp(-\alpha t)] - \sigma V t. \quad (3.91)$$

Для рішення другого диференційного рівняння (3.75) представимо вираз для другої складової в (3.79) наступним чином

$$(V_2 p + g)[p^2(p + \alpha)]^{-1} = A p^{-2} + B p^{-1} + C(p + \alpha)^{-1}, \quad (3.92)$$

де A, B, C – коефіцієнти, які необхідно визначити.

Із (3.92) витікає, що

$$A(p + \alpha) + Bp(p + \alpha) + Cp^2 = V_2 p + g. \quad (3.93)$$

Цьому виразу буде відповідати система алгебраїчних рівнянь

$$\begin{aligned} B + C &= 0; \\ A + B\alpha &= V_2; \\ A\alpha &= g, \end{aligned} \quad (3.94)$$

рішеннями якої є

$$A = \Delta_1 \Delta^{-1}; \quad B = \Delta_2 \Delta^{-1}; \quad C = \Delta_3 \Delta^{-1}, \quad (3.95)$$

де

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & 0 \\ \alpha & 0 & 0 \end{vmatrix} = -\alpha^{-2}; \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ V_2 & \alpha & 0 \\ g & 0 & 0 \end{vmatrix} = -\alpha g; \quad (3.96)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & V_2 & 0 \\ \alpha & g & 0 \end{vmatrix} = g - \alpha V_2; \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & \alpha & V_2 \\ \alpha & 0 & g \end{vmatrix} = \alpha V_2 - g.$$

Після об'єднання (3.95) та (3.96) одержимо

$$A = g\alpha^1; \quad B = (\alpha V_2 - g)\alpha^{-2}; \quad C = -(\alpha V_2 - g)\alpha^{-2}, \quad (3.97)$$

що трансформує вираз (3.92) наступними чином

$$(V_2 p + g)[p^2(p + \alpha)]^{-1} = g(\alpha p^2)^{-1} + (V_2 \alpha - g)\alpha^{-2}[p^{-1} - (p + \alpha)^{-1}] \quad (3.98)$$

Після застосування зворотного перетворення Лапласа до першої складової (3.79) та до (3.98) одержимо вираз для рішення другого рівняння (3.75) у вигляді

$$y(t) = h - g\alpha^{-1}t - (V_2 \alpha - g)\alpha^{-2}[1 - \exp(-\alpha t)] \quad (3.99)$$

Вирази (3.91), (3.99) описують траєкторію руху одиничної маси вогнегасної речовини на ділянці її доставки від мобільної пожежної установки до вогнища горіння у параметричній формі. Параметром при такому описі виступає час.

На рис.3.2÷рис.3.4 наведені приклади таких траєкторій, які побудовані при $h = 1,0$ м та $\beta = 0$. На цих рисунках траєкторії 1 відповідають умовам, коли $V = 0$, траєкторії 2 відповідають умовам, коли має місце зустрічний вітер та його швидкість дорівнює $10,0 \text{ мс}^{-1}$ і траєкторії 3 відповідають умовам, коли має місце попутний вітер зі швидкістю, що дорівнює 10 мс^{-1} .

у, м

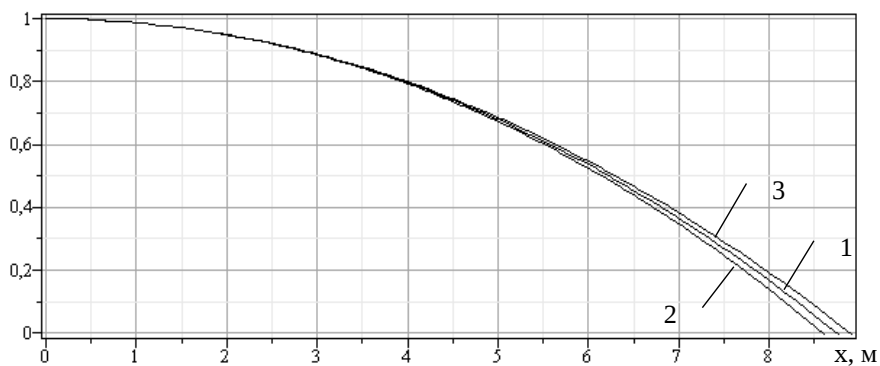


Рис. 3.2. Траекторії руху вогнегасної речовини:
 $V_0 = 20,0 \text{ мс}^{-1}, \alpha = 0,15 \text{ с}^{-1}$

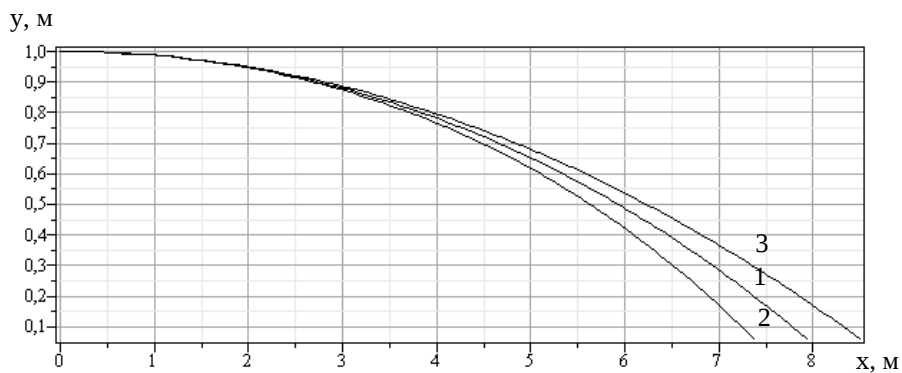


Рис. 3.3. Траекторії руху вогнегасної речовини:
 $V_0 = 20,0 \text{ мс}^{-1}, \alpha = 0,6 \text{ с}^{-1}$

y, м

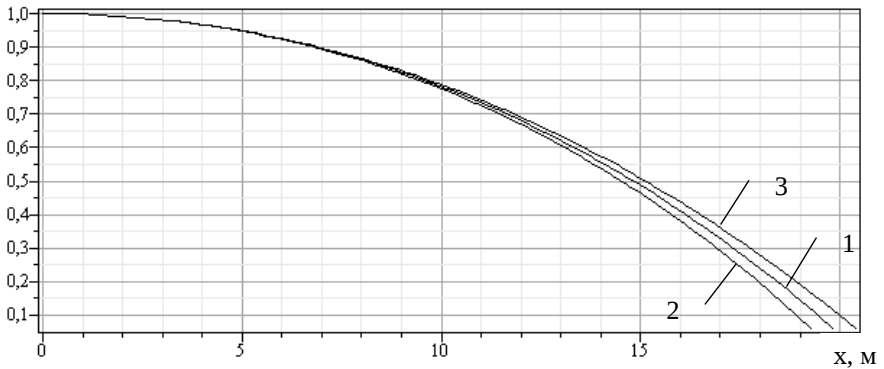


Рис. 3.4. Траєкторії руху вогнегасної речовини:
 $V_0 = 50,0 \text{ мс}^{-1}, \alpha = 0,6 \text{ с}^{-1}$

Розглянемо випадок, для якого $\beta = 0$ та $V = 0$, що є характерним при гасінні пожежі із використанням мобільної пожежної установки, яка побудована на базі сігвею.

Для таких умов можна одержати в явному вигляді аналітичний вираз, який описує траєкторію руху вогнегасної речовини, тобто $y = y(x)$. З цієї метою із (3.91) можна записати

$$1 - \exp(-\alpha t) = \alpha x V_0^{-1}, \quad (3.100)$$

внаслідок чого для часу t буде мати вираз

$$t = -\alpha^{-1} \ln(1 - \alpha x V_0^{-1}) \quad (3.101)$$

Після підстановки (3.100) та (3.101) в (3.99) одержимо

$$y = h + (V_0 \alpha)^{-1} g x + g \alpha^{-2} \ln(1 - \alpha x V_0^{-1}). \quad (3.102)$$

Визначимо максимальну дальність x_m подачі вогнегасної речовини.
Для цього перепишемо (3.102) наступним чином

$$y = h + g\alpha^{-2}[z + \ln(1-z)], \quad (3.103)$$

де $z = \alpha V_0^{-1} x_m$.

Для визначення величини x_m попередньо графічним шляхом знаходяться корені рівняння (при $h = \text{var}$)

$$f(z) + h = 0, \quad (3.104)$$

де

$$f(z) = g\alpha^{-2}[z + \ln(1-z)]. \quad (3.105)$$

На рис.3.5 наведена графічна інтерпретація визначення коренів рівняння (3.104) при $h = (1,0 \div 1,5)$ м та $\alpha = 0,15 \text{ с}^{-1}$.

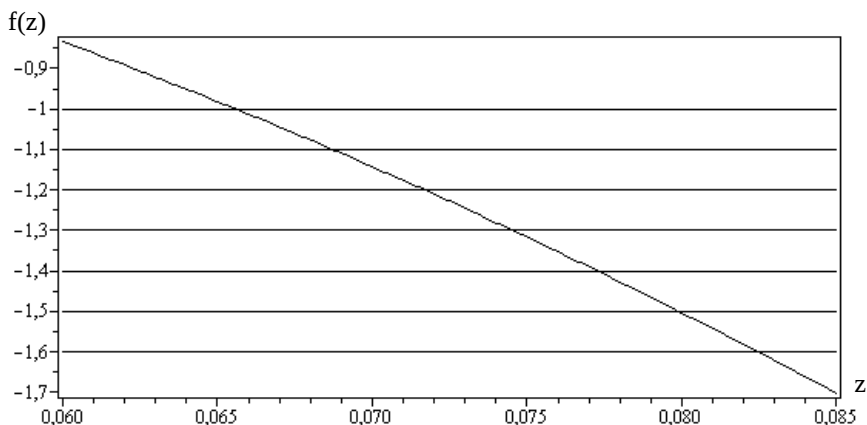


Рис. 3.5. Графічна інтерпретація визначення коренів рівняння

На рис. 3.6 представлені результати визначення кореней рівняння (3.104) в залежності від величини параметра h для $\alpha = 0,15 \text{ c}^{-1}$. Ця залежність із використанням методу найменших квадратів [36, 56] апроксимується функцією, що має вигляд

$$z = 0,038 + 0,028h. \quad (3.106)$$

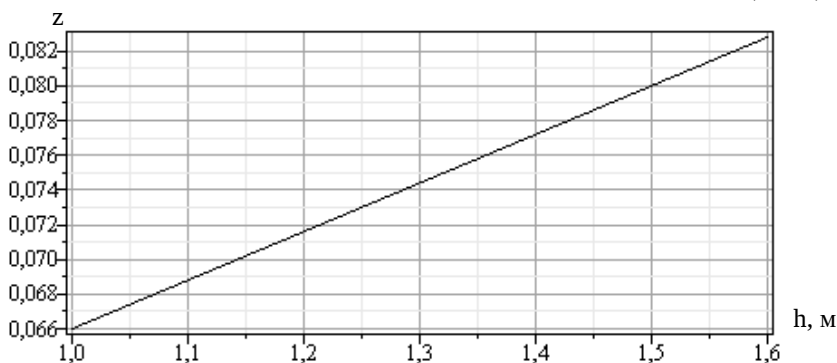


Рис. 3.6. Залежність $z = z(h)$ для $\alpha = 0,15 \text{ c}^{-1}$

Величина параметра x_m визначається за допомогою виразу

$$x_m = V_0 \alpha^{-1} z = 6,67 V_0 z. \quad (3.107)$$

На рис. 3.7. наведена графічна інтерпретація виразу (3.107) для $\alpha = 0,15 \text{ c}^{-1}$ та $V_0 = (20,0 \div 50,0) \text{ мс}^{-1}$.

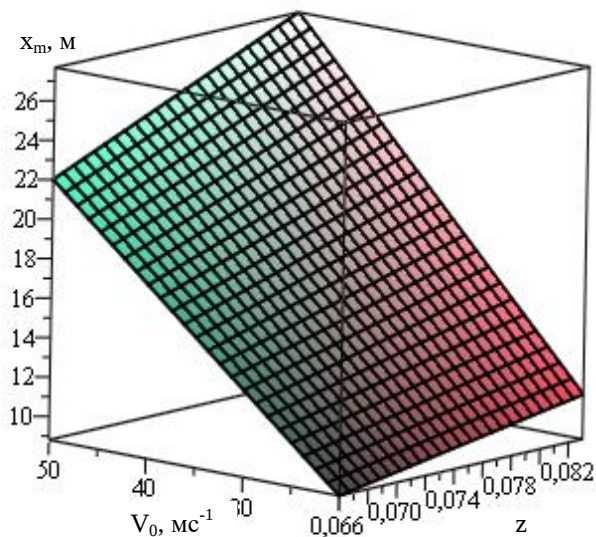


Рис. 3.7. Залежність $x_m = x_n (V_0, z)$

Із рис. 3.7. витікає, що при $V_0 = 20,0 \text{ мс}^{-1}$ та $h = 1,0 \text{ м}$ величина параметра x_m дорівнює $8,8 \text{ м}$, а при $V_0 = 50,0 \text{ мс}^{-1}$ та $h = 1,0 \text{ м}$ ця величина дорівнює $22,0 \text{ м}$.

Аналогічним чином визначаються корені рівняння (3.104) для $\alpha = 0,3 \text{ с}^{-1}$ та $\alpha = 0,45 \text{ с}^{-1}$. Результати рішення цього рівняння наведені у вигляді графічних залежностей відповідно на рис.3.8 та рис.3.9

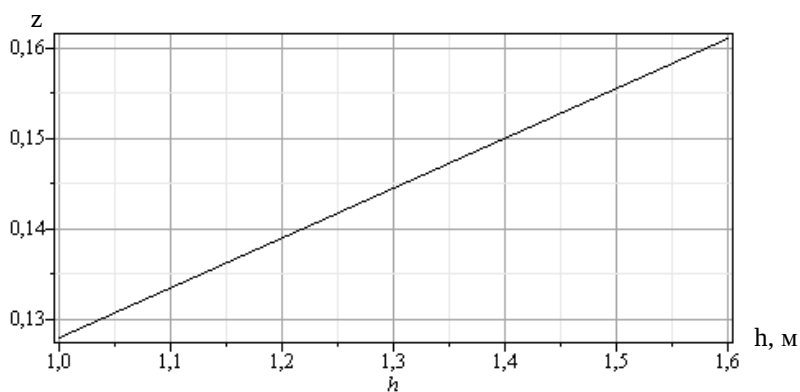


Рис. 3.8. Залежність $z = z(h)$ для $\alpha = 0,3 \text{ с}^{-1}$

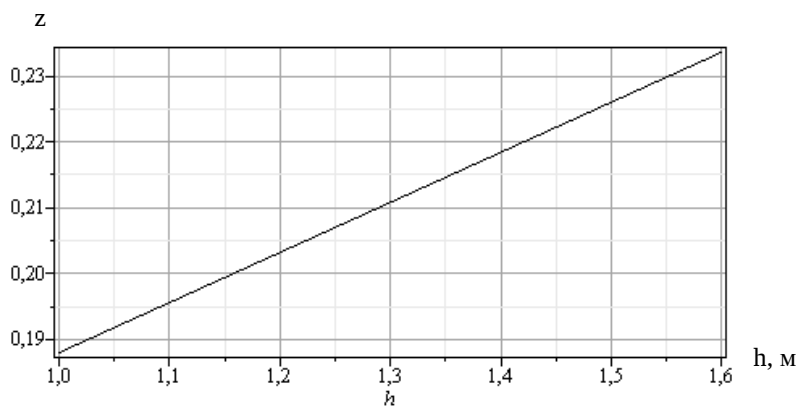


Рис. 3.9. Залежність $z = z(h)$ для $\alpha = 0,45 \text{ с}^{-1}$

Із використанням метода найменших квадратів залежність, наведена на рис. 3.8, апроксимується виразом

$$z = 0,073 + 0,055h, \quad (3.108)$$

а залежність, наведена на рис. 3.9 – виразом

$$z = 0,112 + 0,076h. \quad (3.109)$$

Для оперативного рішення інженерних задач на рис. 3.10 ÷ рис. 3.15 наведені номограми для трьох значень параметра $\alpha - 0,15 \text{ с}^{-1}$, $0,3 \text{ с}^{-1}$ та $0,45 \text{ с}^{-1}$. На рис.3.10 ÷ рис. 3.12 наведені номограми $x_m = f(z)$ при $V_0 = \text{const}$, а на рис. 3.13 і рис. 3.15 – номограми $x_m = f(V_0)$ при $z = \text{const}$

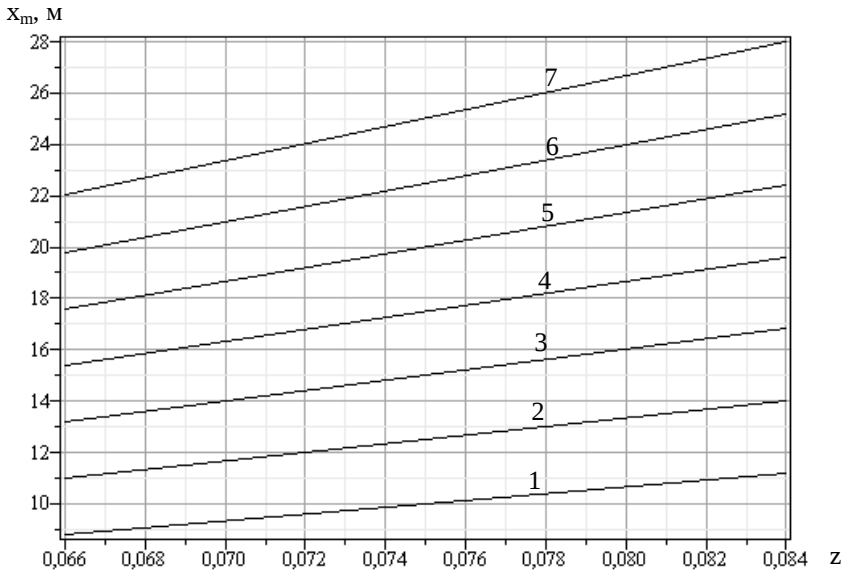


Рис. 3.10. Номограма $x_m = f(z)$ при $\alpha = 0,15 \text{ с}^{-1}$, $V_0 = \text{const}$:
 1 – $V_0 = 20 \text{ мс}^{-1}$; 2 – $V_0 = 25 \text{ мс}^{-1}$; 3 – $V_0 = 30 \text{ мс}^{-1}$; 4 – $V_0 = 35 \text{ мс}^{-1}$;
 5 – $V_0 = 40 \text{ мс}^{-1}$; 6 – $V_0 = 45 \text{ мс}^{-1}$; 7 – $V_0 = 50 \text{ мс}^{-1}$

Параметр z на номограмах визначається залежностями (3.106), (3.108) та (3.109) або за допомогою графіків, наведених на рис. 3.6, рис. 3.8 та рис. 3.9.

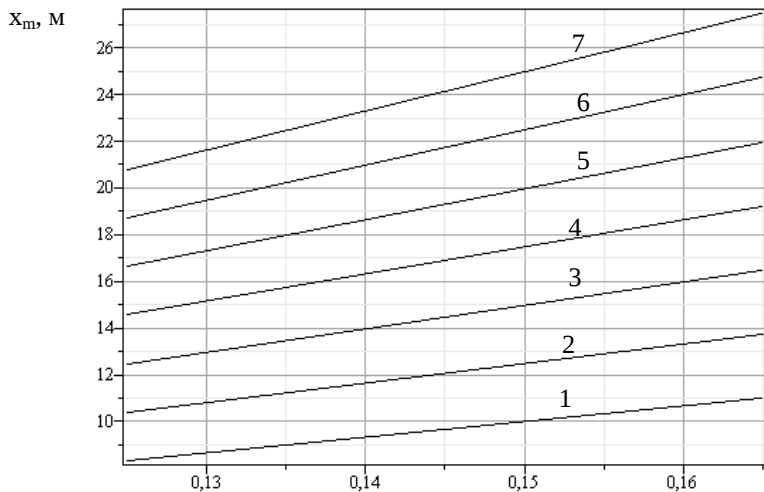


Рис. 3.11. Номограма $x_m = f(z)$ при $\alpha = 0,3 \text{ с}^{-1}$, $V_0 = \text{const}z$
 1 – $V_0 = 20 \text{ мс}^{-1}$; 2 – $V_0 = 25 \text{ мс}^{-1}$; 3 – $V_0 = 30 \text{ мс}^{-1}$; 4 – $V_0 = 35 \text{ мс}^{-1}$;
 5 – $V_0 = 40 \text{ мс}^{-1}$; 6 – $V_0 = 45 \text{ мс}^{-1}$; 7 – $V_0 = 50 \text{ мс}^{-1}$

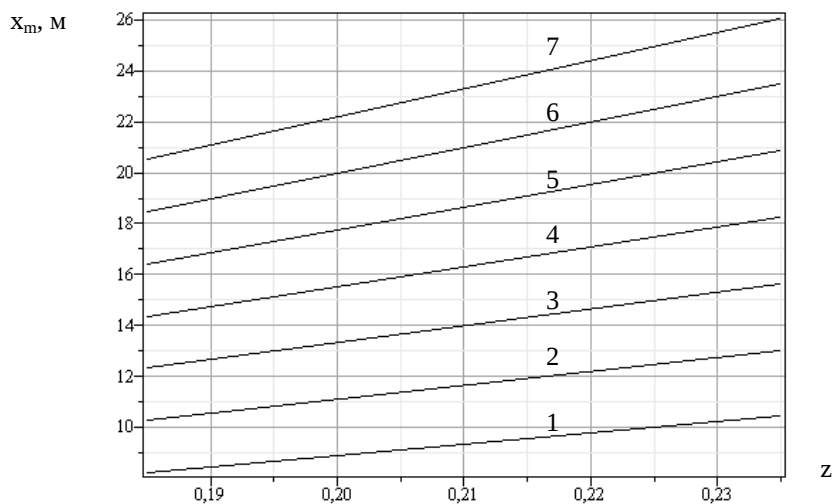


Рис. 3.12. Номограма $x_m = f(z)$ при $\alpha = 0,45 \text{ с}^{-1}, V_0 = \text{const}$:
 1 – $V_0 = 20 \text{ мс}^{-1}$; 2 – $V_0 = 25 \text{ мс}^{-1}$; 3 – $V_0 = 30 \text{ мс}^{-1}$; 4 – $V_0 = 35 \text{ мс}^{-1}$;
 5 – $V_0 = 40 \text{ мс}^{-1}$; 6 – $V_0 = 45 \text{ мс}^{-1}$; 7 – $V_0 = 50 \text{ мс}^{-1}$

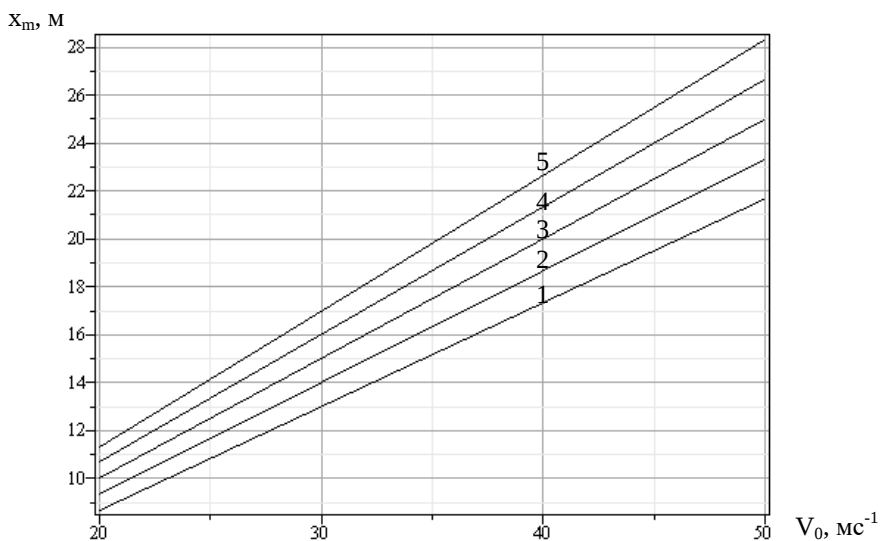


Рис. 3.13. Номограма $x_m = f(V_0)$ при $\alpha = 0,15 \text{ с}^{-1}, z = \text{const}$:
 1 – $z = 0,065$; 2 – $z = 0,07$; 3 – $z = 0,075$; 4 – $z = 0,08$; 5 – $z = 0,085$

$x_m, \text{ м}$

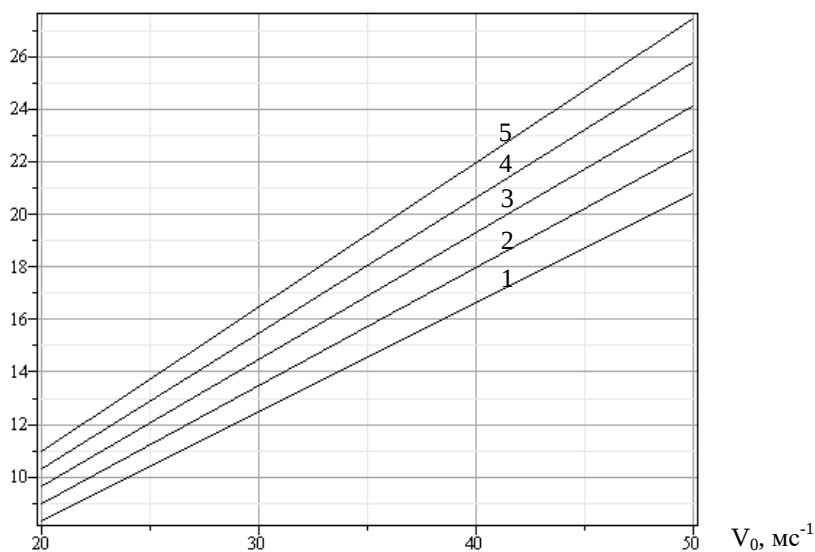


Рис. 3.14. Номограма $x_m = f(V_0)$ при $\alpha = 0,3 \text{ с}^{-1}, z = \text{const}$: 1 – $z = 0,125$; 2 – $z = 0,135$; 3 – $z = 0,145$; 4 – $z = 0,155$; 5 – $z = 0,165$

$x_m, \text{ м}$

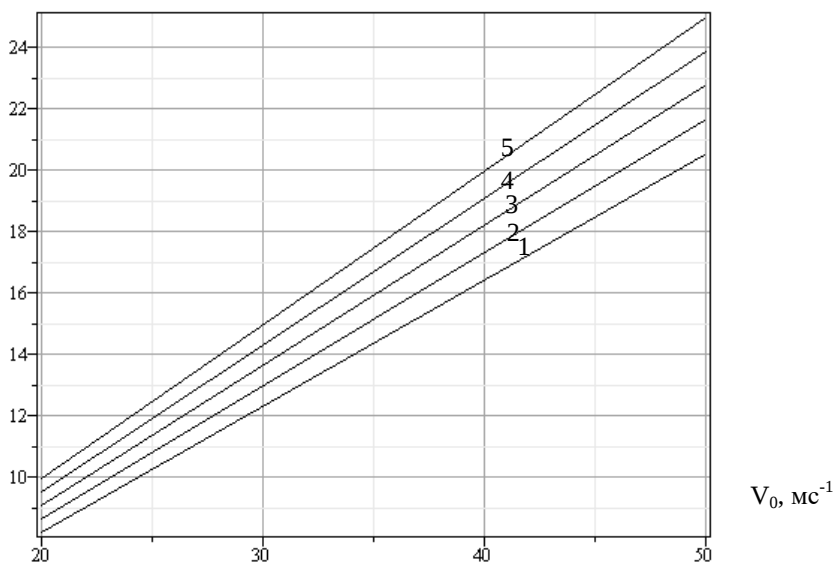


Рис. 3.15. Номограма $x_m = f(V_0)$ при $\alpha = 0,45 \text{ с}^{-1}, z = \text{const}$: 1 – $z = 0,185$; 2 – $z = 0,195$; 3 – $z = 0,205$; 4 – $z = 0,215$; 5 – $z = 0,225$

Приклад. Задано $h = 1,2$ м, $V_0 = 25$ мс⁻¹. Визначити максимальну дальність, на яку буде подаватись вогнегасна речовина, якщо кут подачі $\beta = 0$, а коефіцієнт опору $\alpha = 0,3$ с⁻¹.

Із номограми, яка наведена на рис. 3.8, витікає, що висоті $h = 1,2$ м, відповідає величина параметра $z = 0,138$. У відповідності до номограми, яка наведена на рис. 3.15, такій величині параметра z та величині швидкості $V_0 = 25$ мс⁻¹ буде відповідати величина $x_m = 11,5$ м.

Оцінимо вплив вітру на дальність подачі вогнегасної речовини за умови, що $\beta = 0,3$ цією метою визначимо оцінку часу доставки t_0 вогнегасної речовини до вогнища горіння. Таку оцінку одержимо за умови, що

$$y(t_0) = 0. \quad (3.110)$$

яка відповідно до виразу (3.99) обумовлює необхідність рішення трансцендентного рівняння

$$h - g\alpha^{-1}t_0 + g\alpha^{-2}[1 - \exp(-\alpha t_0)] = 0. \quad (3.111)$$

Для спрощення цього рівняння представимо вираз в квадратних дужках у вигляді усіченого степеневого ряду [51, 56]

$$1 - \exp(-\alpha t_0) = \alpha t_0 - 0,5(\alpha t_0)^2, \quad (3.112)$$

внаслідок чого трансцендентне рівняння (3.111) трансформується до алгебраїчного рівняння

$$h - 0,5gt_0^2 = 0. \quad (3.113)$$

Рішенням цього рівняння є

$$t_0 = (2hg^{-1})^{0,5} \quad (3.114)$$

із якого витікає, що при $h = (1,0 \div 1,5)$ м величина t_0 знаходиться в діапазоні $(0,45 \div 0,56)$ с.

Виходячи з цього, процес подачі вогнегасної речовини до вогнища горіння можна описати у вигляді передаточної функції запізнюючої ланки, параметром якої є час запізнення τ_4 , який дорівнює часу подачі t_0 , тобто

$$W(p) = K_4 \exp(-\tau_4 p), \quad (3.115)$$

де K_4 – коефіцієнт передачі.

Параметр K_4 може мати зміст інтенсивності подачі вогнегасної речовини до вогнища горіння.

Якщо врахувати (3.91) ÷ (3.111), то максимальна дальність подачі вогнегасної речовини буде визначатись виразом

$$x_m = V_0 t_0 (1 - 0,5\alpha t_0) - 0,5V t_0^2, \quad (3.116)$$

із аналізу якого витікає, що друга складова описує вплив вітру на величину x_m .

Тоді відносна похибка, яка обумовлена впливом вітру, може бути представлена у вигляді [93]

$$\begin{aligned}\delta &= 0,5\alpha Vt_0[V_0(1-0,5\alpha t_0)]^{-1} = \\ &= 0,5\alpha\gamma t_0(1+0,5\alpha t_0),\end{aligned}\tag{3.118}$$

де $\gamma = V \cdot V_0^{-1}$.

На рис.3.16 наведена графічна залежність $\delta = \delta(\gamma, \alpha)$ при $h = 1,0$, а на рис. 3.17 – залежність $\delta = \delta(\gamma, \alpha)$ при $h = 1,5$ м.

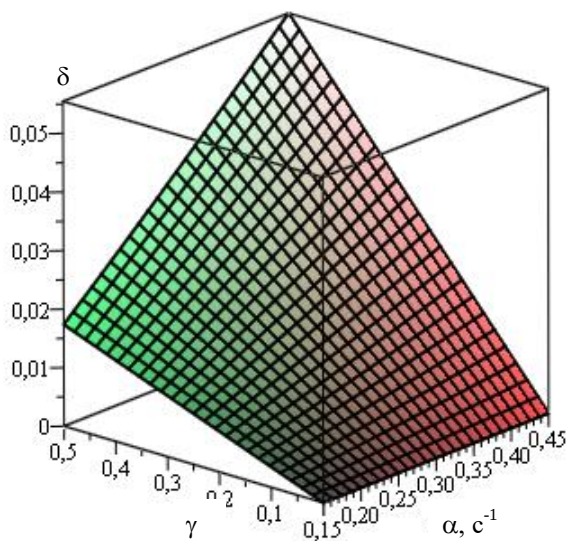


Рис. 3.16. Залежність $\delta = \delta(\gamma, \alpha)$ при $h = 1,0$ м

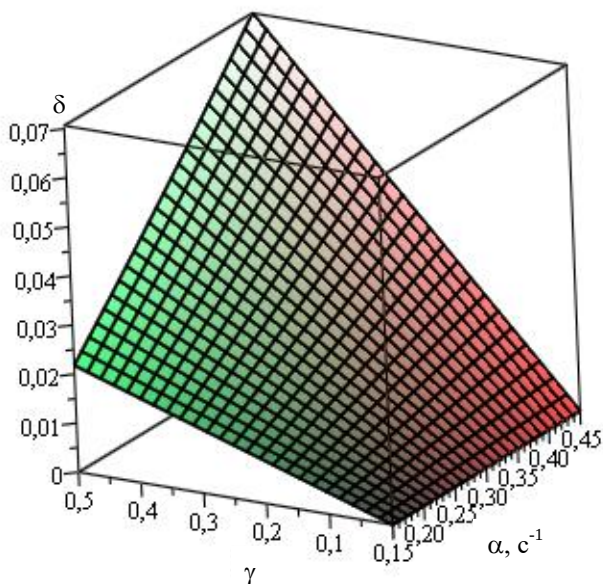


Рис. 3.17. Залежність $\delta = \delta(\gamma, \alpha)$ при $h = 1,5$ м

Аналіз цих залежностей свідчить, що змінні величини параметрів γ та α відповідно в діапазонах $0 \div 0,5$ та $(0,15 \div 0,45) \text{ c}^{-1}$, максимальна величина відносної похибки для максимальної дальності подачі вогнегасної речовини належить діапазону $(8,2 \div 10,3) \%$. Якщо $\gamma = 0 \div 0,25$, то величина цієї похибки зменшується до $(5,5 \div 6,9) \%$.

3.6. Характеристики компактної рухомої установки в динаміці під час гасіння пожежі

Динамічні моделі елементів мобільної пожежної установки у вигляді передаточних функцій наведені в розд. 3. Передаточна функція об'єкта управління – пожежі наведена в п. 2.2. Враховуючи алгоритм роботи

мобільної пожежної установки при гасінні пожежі передаточну функцію такої пожежної установки можна представити у вигляді [43]

$$W(p) = \prod_{i=1}^5 W_i(p), \quad (3.119)$$

де $W_i(p)$ – передаточна функція i -го елемента пожежної установки та пожежі.

Якщо врахувати (2.50), (3.30), (3.40), (3.73) та (3.115), то вираз для передаточної функції (3.119) буде мати вигляд

$$W(p) = K \exp[-(\tau_1 + \tau_3 + \tau_4)p] \prod_{i=2}^5 (\tau_i p + 1)^{-1}, \quad (3.120)$$

де постійна часу τ_5 визначається виразом (2.6), тобто $\tau_5 = \tau$, а коефіцієнт передачі K – виразом

$$K = \prod_{i=1}^5 K_i. \quad (3.121)$$

Частотні характеристики $A(\omega)$ та $\varphi(\omega)$ мобільної пожежної установки в режимі гасіння пожежі визначаються наступним чином [43, 59]

$$A(\omega) = \prod_{i=1}^5 A_i(\omega); \quad (3.122)$$

$$\varphi(\omega) = \sum_{i=1}^5 \varphi_i(\omega), \quad (3.123)$$

де $A_i(\omega)$ – амплітудно-частотна характеристика i -го елемента пожежної установки та пожежі; $\varphi_i(\omega)$ – фазово-частотна характеристика i -го елемента пожежної установки та пожежі.

Внаслідок того, що мобільна пожежна установка в режимі гасіння пожежі має передаточну функцію у вигляді (3.120), то для $A(\omega)$ та $\varphi(\omega)$ буде мати місце [43]

$$A(\omega) = K \left[(1 + \omega^2 \tau_2^2) (1 + \omega^2 \tau_5^2) \right]^{-0,5}, \quad (3.124)$$

$$\begin{aligned} \varphi(\omega) &= -\omega(\tau_1 + \tau_3 + \tau_4) - \arctg \omega \tau_2 - \arctg \omega \tau_5 = \\ &= -\omega(\tau_1 + \tau_3 + \tau_4) - \arctg \left[\omega(\tau_2 + \tau_5) (1 - \omega^2 \tau_2 \tau_5)^{-1} \right] \end{aligned} \quad (3.125)$$

Для параметрів τ_i , $i = \overline{1,4}$, величини яких наведені в пп. 3.2 ÷ 3.5, а також для $\tau_5 = 2,0$ с на рис. 3.18 та на рис. 3.19 наведені залежності $A(\omega)K^{-1}$ та $\varphi(\omega)$ відповідно.

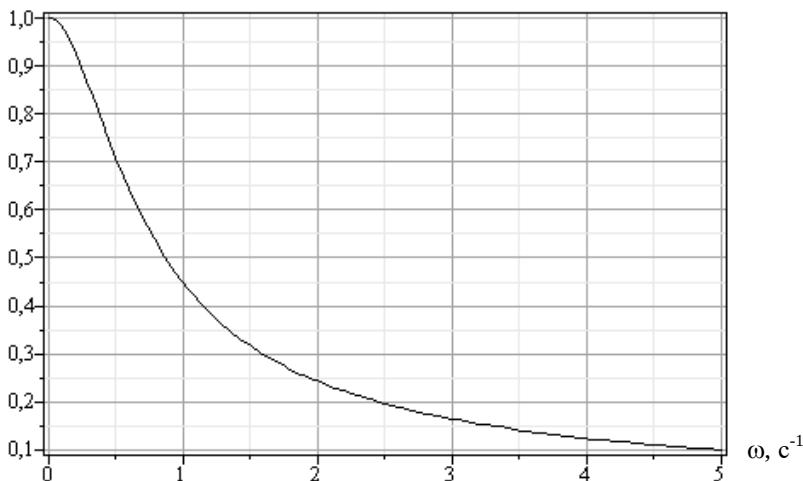


Рис. 3.18. Залежність $A(\omega)K^{-1}$

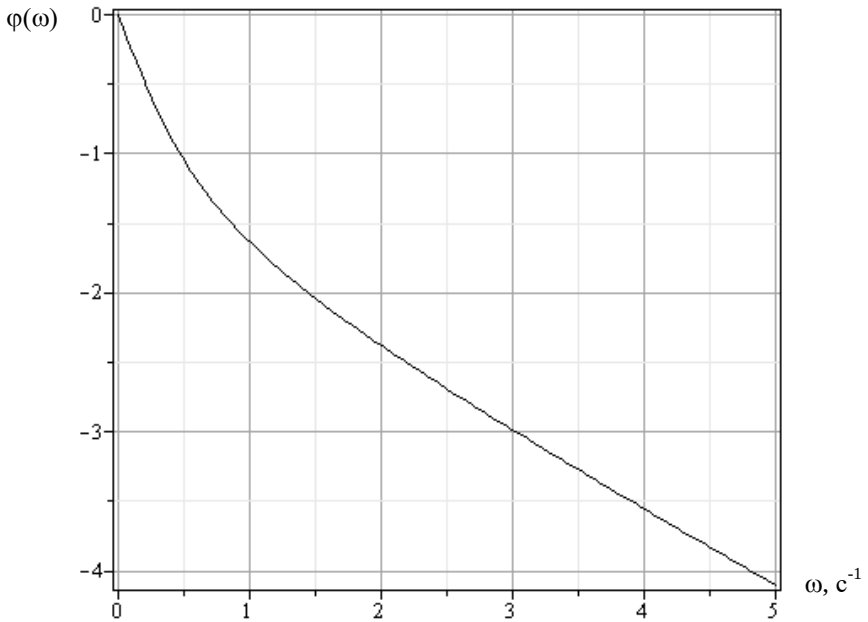


Рис. 3.19. Залежність $\phi(\omega)$

Динамічна характеристика мобільної пожежної установки в часовій області в режимі гасіння пожежі описується виразом

$$\theta(t) = L^{-1} \left[W(p) P_1 p^{-1} \right] \quad (3.126)$$

де L^{-1} – оператор зворотного перетворення Лапласу [43, 59]; P_1 – тиск на вході пневмомагісталі.

Якщо врахувати (3.120), то вираз (3.126) буде трансформовано наступним чином [54]

$$\theta(t) = KP_1 \times \left[\begin{array}{l} 1 - \tau_2(\tau_2 - \tau_5)^{-1} \exp\left[-(t - \tau_1 - \tau_3 - \tau_4)\tau_2^{-1}\right] - \\ - \tau_5(\tau_5 - \tau_2)^{-1} \exp\left[-(t - \tau_1 - \tau_3 - \tau_4)\tau_5^{-1}\right] \end{array} \right] 1(t - \tau_1 - \tau_3 - \tau_4). \quad (3.127)$$

На рис. 3.20 наведена залежність $\theta(t)(KP_1)^{-1}$ для аналогічних параметрів τ_i



Рис. 3.20 Часова динамічна характеристика

Наявність частотних та часових характеристик мобільної пожежної установки в режимі гасіння пожежі дозволяє враховувати її динамічні властивості при проектуванні систем пожежогасіння. Зокрема, наявність характеристики (3.127) дозволяє одержувати оцінки часу гасіння пожежі із урахуванням динамічних властивостей всіх елементів пожежної установки.

Слід зазначити, що особливістю часової характеристики (3.127), яка є перехідною функцією мобільної пожежної установки в режимі гасіння пожежі, є наявність часу запізнення. Цей час дорівнює величині, яка є сумою параметрів τ_1, τ_3 та τ_4 . Для характеристики, яка наведена на рис. 3.19, ця величина складає 0,526 с.

3.7. Висновки за розділом 3

3.7.1. Наведена модель, яка описує процес витікання газу із балону, і показано, що тиск в балоні змінюється за лінійним законом.

3.7.2. Показано, що рух газу в пневмомагістралі мобільної пожежної установки описується передаточною функцією запізнюючої ланки, час запізнення якої дорівнює одиниць мілесекунд.

3.7.3. На основі законів Ньютона та Бернуллі одержимо вираз для диференційного рівняння, яке описує рух вогнегасної речовини в ємності, і показано, що цей процес має опис у вигляді передаточної функції аперіодичної ланки, постійна часу якої складає декілька десятків мікросекунд.

3.7.4. Показано, що рух вогнегасної речовини по гнучкій магістралі мобільної пожежної установки може бути описано передаточною функцією запізнюючої ланки, час запізнення якої складає декілька десятків мілесекунд.

3.7.5. Із використанням основного рівняння динаміки одержано модель, яка описує рух вогнегасної речовини на ділянці від мобільної пожежної установки до вогнища горіння. Модель враховує опір повітря та наявність вітру і дозволяє одержувати оцінки для максимальної дальності подачі та часу доставки вогнегасної речовини до вогнища горіння. Наведені номограми, за допомогою яких здійснюється оперативне визначення максимальної дальності подачі вогнегасної речовини. Показано, що процес подачі вогнегасної речовини описується передаточною функцією запізнюючої ланки, час запізнення якої не перевищує однієї секунди.

3.7.6. Для мобільної пожежної установки, яка працює в режимі гасіння пожежі, одержані вирази для динамічних характеристик в частотній та часовій областях, в основі побудови яких лежить використання передаточних функцій елементів цієї пожежної установки. Наявність таких характеристик

відкриває можливість для врахування впливу динамічних властивостей пожежної установки на характеристики пожежогасіння. Показано, що для характерних величин параметрів пожежної установки вогнегасна речовина подається до вогнища горіння із запізненням у часі, величина якого не перевищує однієї секунди.

РОЗДІЛ 4

ВОГНЕГАСНА РЕЧОВИНА НА ДІЛЯНЦІ ЇЇ ПОДАЧІ ДО ОСЕРЕДКУ ГОРІННЯ. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА ПАРАМЕТРИ

4.1. Витрати вогнегасної речовини

Вогнегасна речовина на ділянці її подачі до осередку горіння характеризується наступними параметрами [60-62]:

- початковою швидкістю U_0 та швидкістю на вісі струменя U_m в напрямку її подачі;
- концентрацією вогнегасної речовини в початковий момент часу ω_0 та її значенням на вісі струменя ω_m ;
- координатою полюса струменя x_p (рис. 4.1);
- радіусом струменя r ;
- характерним радіусом струменя R .

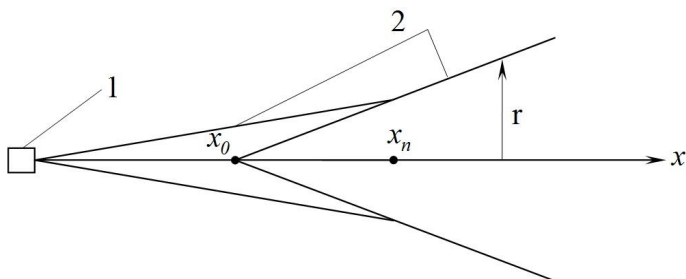


Рис. 4.1. Схема порошкового струменю: 1 – форсунка; 2 – границя струменю

Зв'язок між радіусом r та координатою x , вздовж якої подається вогнегасна речовина, визначається диференціальним рівнянням [63]

$$\frac{dr}{dx} = 0,22(1 + 0,5\omega_m)(1 + \omega_m)^{-1}. \quad (4.1)$$

Для рішення цього диференційного рівняння визначимо зв'язок між концентрацією ω_m та радіусом r . Зцією метою в площині, що є перпендикулярною до вісі x , виділимо елементарний об'єм dV (рис.4.2) та скористаємось законом збереження кількості руху [57].

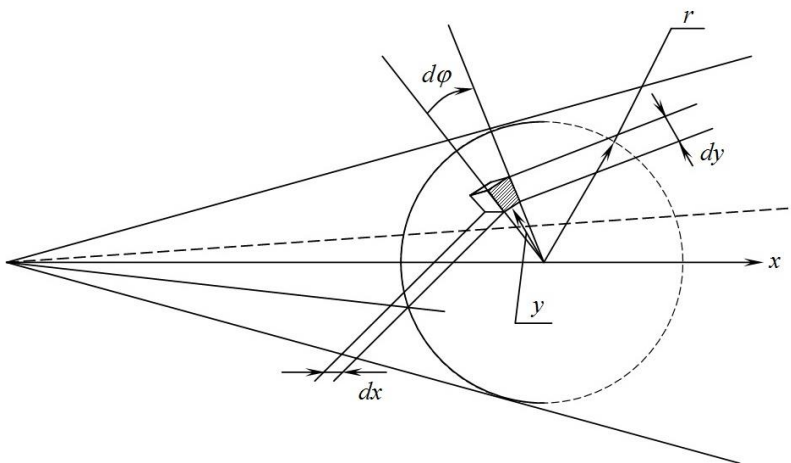


Рис. 4.2. До рішення диференційного рівняння (4.1)

Кількість руху вогнегасної речовини I_0 в початковому перерізі визначається виразом

$$I_0 = (M_n + M_b)U_0, \quad (4.2)$$

де M_n, M_b – маса вогнегасної речовини та маса повітря відповідно.

У відповідності до закону збереження кількості руху повинно мати місце

$$I = \int_M U dm = \int_V U(\rho_n + \rho_b) dV = I_0, \quad (4.3)$$

де U – миттєве значення швидкості потоку; dm, dV – елементарна маса та елементарний об'єм суміші; ρ_n, ρ_b – щільність вогнегасної речовини та повітря відповідно.

Для dV із рис. 4.2. витікає вираз

$$dV = dy dy dx, \quad (4.4)$$

а для dx має місце

$$dx = U \Delta t, \quad (4.5)$$

де Δt – малий інтервал часу.

Після об'єднання (4.3) ÷ (4.5) будемо мати

$$\begin{aligned} I &= I_0 = 2\pi \int_0^r U^2 (\rho_n + \rho_b) \Delta t y dy = \\ &= 2\pi \Delta t U_m^2 \int_0^r (U U_m^{-1})^2 (\rho_n + \rho_b) y dy \end{aligned} \quad (4.6)$$

Врахуємо, що

$$\eta = y \tau^{-1}; \quad (4.7)$$

$$\omega = \rho_n \rho_b^{-1} = M_n M_b^{-1}, \quad (4.8)$$

внаслідок чого можна записати

$$\rho_n = \rho_b \omega. \quad (4.9)$$

Після об'єднання (4.6), (4.7) та (4.9) вираз (4.6) буде трансформовано до вигляду

$$\begin{aligned} I_0 &= 2\pi\Delta t\rho_{\text{в}}r^2U_{\text{м}}^2\int_0^1\left(UU_{\text{м}}^{-1}\right)^2(1+\omega)\eta d\eta = \\ &= 2\pi\Delta t\rho_{\text{в}}r^2U_{\text{м}}^2\left[\int_0^1\left(UU_{\text{м}}^{-1}\right)^2\eta d\eta + \omega_{\text{м}}\int_0^1\left(UU_{\text{м}}^{-1}\right)^2\omega\omega_{\text{м}}^{-1}\eta d\eta\right]. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Згідно [63] маємо

$$UU_{\text{м}}^{-1} = \left(1 - \eta^{1,5}\right)^2; \quad \omega\omega_{\text{м}}^{-1} = 1 - \eta^{1,5}, \quad (4.11)$$

внаслідок чого будуть мати місце співвідношення

$$\begin{aligned} \left(UU_{\text{м}}^{-1}\right)^2\eta &= \left(1 - \eta^{1,5}\right)^4 = \left(1 - \eta^{1,5}\right)^2\left(1 - \eta^{1,5}\right)^2\eta = \\ &= \left(1 - 2\eta^{1,5} + \eta^3\right)^2\eta = \left[\left(1 - 2\eta^{1,5}\right)^2 + 2\left(1 - 2\eta^{1,5}\right)\eta^3 + \eta^6\right]\eta = \\ &= \eta^7 - 4\eta^{5,5} + 6\eta^4 - 4\eta^{2,5} + \eta. \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \left(UU_{\text{м}}^{-1}\right)^2\omega\omega_{\text{м}}^{-1}\eta &= \left(1 - \eta^{1,5}\right)^5\eta = \left(1 - \eta^{1,5}\right)^4\left(1 - \eta^{1,5}\right)\eta = \\ &= -\eta^{8,5} + 5\eta^7 - 10\eta^{5,5} + 10\eta^4 - 5\eta^{2,5} + \eta. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Враховуючи (4.12) та (4.13), а також вираз в квадратних дужках (4.10), одержимо

$$\int_0^1\left(UU_{\text{м}}^{-1}\right)^2(1+\omega)\eta d\eta = 0,067 + 0,054\omega_{\text{м}}, \quad (4.14)$$

внаслідок чого, вираз (4.10) буде трансформовано до вигляду

$$I_0 = 2\pi\Delta t\rho_{\text{в}}r^2U_{\text{м}}^2(0,067 + 0,054\omega_{\text{м}}). \quad (4.15)$$

Для витрат вогнегасної речовини на інтервалі часу Δt має місце вираз

$$M_{\text{п}}\Delta t^{-1} = 2\pi\int_0^r U\rho_{\text{п}}ydy. \quad (4.16)$$

Враховуючи співвідношення (4.9), можна записати

$$\rho_{\text{п}} = \rho_{\text{в}}\omega = \rho_{\text{в}}\omega\omega_{\text{м}}^{-1}\omega_{\text{м}}, \quad (4.17)$$

а із урахуванням (4.11)

$$\rho_{\text{п}} = \rho_{\text{в}}(1 - \eta^{1,5})\omega_{\text{м}}, \quad (4.18)$$

Якщо прийняти до уваги співвідношення (4.7) та (4.11), вираз (4.16) можна переписати у вигляді

$$M_{\text{п}}\Delta t^{-1} = 2\pi\rho_{\text{в}}r^2\omega_{\text{м}}U_{\text{м}}\int_0^1 (1 - \eta^{1,5})^3 \eta d\eta. \quad (4.19)$$

Внаслідок того, що [51]

$$\int_0^1 (1 - \eta^{1,5})^3 \eta d\eta = 0,089, \quad (4.20)$$

для витрат вогнегасної речовини буде мати вираз

$$M_n \Delta t^{-1} = 2\pi \rho_b r^2 \omega_m U_m \cdot 0,089. \quad (4.21)$$

Із цього виразу витікає, що витрати вогнегасної речовини визначаються реологічними, геометричними та кінематичними параметрами.

4.2. Швидкість руху вогнегасної речовини

Якщо помножити та розділити праву частину (4.15) на R^2 , після чого розділити ліву та праву частини одержаного виразу на U_0^2 , то в результаті можна записати співвідношення

$$(U_m U_0^{-1})^2 (rR^{-1})^2 = I_0 [2\pi \rho_b R^2 \Delta t U_0^2 (0,067 + 0,054 \omega_m)]^{-1}. \quad (4.22)$$

Умножимо та розділимо праву частину виразу (4.21) на R^2 , а потім розділимо ліву та праву частини одержаного результату на U_0 , внаслідок чого буде мати місце співвідношення

$$U_m U_0^{-1} (rR^{-1})^2 = M_n (2\pi \rho_b R^2 \omega_m \Delta t U_0 \cdot 0,089)^{-1}. \quad (4.23)$$

Після цього розділимо ліву та праву частини виразу (4.22) відповідно на ліву та праву частини виразу (4.23), внаслідок чого будемо мати [64]

$$\begin{aligned} \bar{U}_m = U_m U_0^{-1} &= 0,089 \omega_m I_0 [M_n U_0 (0,067 + 0,054 \omega_m)]^{-1} = \\ &= 1,65 \omega_m I_0 [M_n U_0 (1,24 + \omega_m)] \end{aligned} \quad (4.24)$$

Якщо врахувати, що $I_0 = (M_{\pi} + M_b)U_0$, то вираз (4.24) можна переписати наступним чином

$$\bar{U}_m = 1,65\omega_m(1 + \omega_0)[\omega_0(1,24 + \omega_m)]^{-1}. \quad (4.25)$$

Далі будемо враховувати позначення

$$a_1 = 0,089; \quad a_2 = 0,067; \quad a_3 = 0,054; \quad d = I_0^{-1}M_{\pi}U_0,$$

що дозволяє із (4.24) одержати вираз для параметра ω_m у вигляді

$$\omega_m = da_2\bar{U}_m(a_1 - da_3\bar{U}_m)^{-1}. \quad (4.26)$$

Внаслідок того, що

$$d = I_0^{-1}M_{\pi}U_0 = M_{\pi}U_0[(M_{\pi} + M_b)U_0]^{-1} = \omega_0(1 + \omega_0)^{-1}, \quad (4.27)$$

вираз (4.26) можна записати наступним чином

$$\begin{aligned} \omega_m &= a_2\bar{U}_m(a_1d^{-1} - a_3\bar{U}_m)^{-1} = a_2\bar{U}_m[a_1(1 + \omega_0^{-1}) - a_3\bar{U}_m]^{-1} = \\ &= 0,72\bar{U}_m(1 + \omega_0^{-1} - 0,61\bar{U}_m)^{-1}. \end{aligned} \quad (4.28)$$

На рис.4.3 наведена графічна залежність $\omega_m = f(\omega_0, \bar{U}_m)$

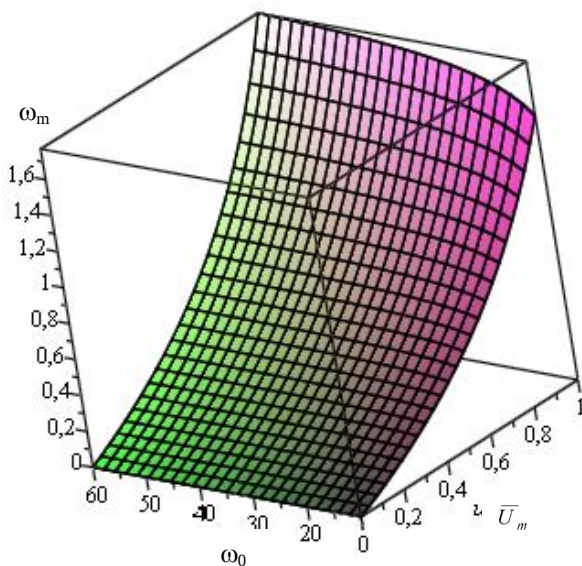


Рис. 4.3. Залежність $\omega_m = f(\omega_0, \bar{U}_m)$

Введемо позначення

$$\bar{r} = rR^{-1}; \quad b = I_0(2\pi\rho_b R^2 \Delta t U_0^2)^{-1}. \quad (4.29)$$

Тоді із (4.16) та (4.26) витікає, що

$$\begin{aligned} \bar{r}^{-2} &= b \left[(a_2 + a_3 \omega_m) \bar{U}_m^2 \right]^{-1} = \\ &= b (a_1 - da_3 \bar{U}_m) (a_1 a_2 \bar{U}_m)^{-1}. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Це дозволяє записати алгебраїчне рівняння для визначення параметра $\bar{U}_m$, яке буде мати вигляд

$$a_1 a_2 \bar{r}^{-2} \bar{U}_m + b d a_3 \bar{U}_m - b a_1 = 0. \quad (4.31)$$

Рішенням цього алгебраїчного рівняння є

$$\begin{aligned} \bar{U}_m &= \left[-b d a_3 + \left[(b d a_3)^2 + 4 a_2 a_1^2 b \bar{r}^{-2} \right]^{0,5} \right] \left(2 a_1 a_2 \bar{r}^{-2} \right)^{-1} = \\ &= b d a_3 \left(2 a_1 a_2 \bar{r}^{-2} \right)^{-1} \left[\left[1 + 4 a_2 a_1^2 \bar{r}^{-2} (b d^2 a_3^2)^{-1} \right]^{0,5} - 1 \right]. \end{aligned} \quad (4.32)$$

Внаслідок того, що має місце співвідношення

$$M_B = \pi \rho_B R^2 \Delta t U_0, \quad (4.33)$$

то із урахуванням (4.2) та (4.29) можна записати

$$b = I_0 (M_B U_0)^{-1} = 0,5 (M_\Pi + M_B) M_B^{-1} = 0,5 (1 + \omega_0). \quad (4.34)$$

Це дозволяє представити вираз (4.32) наступним чином

$$\begin{aligned} \bar{U}_m &= a_3 \omega_0 \left(4 a_1 a_2 \bar{r}^{-2} \right)^{-1} \left[\left[1 + 8 a_1^2 a_2 (1 + \omega_0) \bar{r}^{-2} (a_3^2 \omega_0)^{-1} \right]^{0,5} - 1 \right] = \\ &= 2,25 \omega_0 \bar{r}^{-2} \left[\left[1 + 1,46 (1 + \omega_0) \bar{r}^{-2} \omega_0^{-1} \right]^{0,5} - 1 \right]. \end{aligned} \quad (4.35)$$

На рис. 4.4. та рис.4.5 наведені приклади графічної інтерпретації виразу (4.35) для $\omega_0 \in [1,18]$, $\bar{r} \in [50,70]$ та $\omega_0 \in [10,50]$, $\bar{r} \in [130,150]$ відповідно

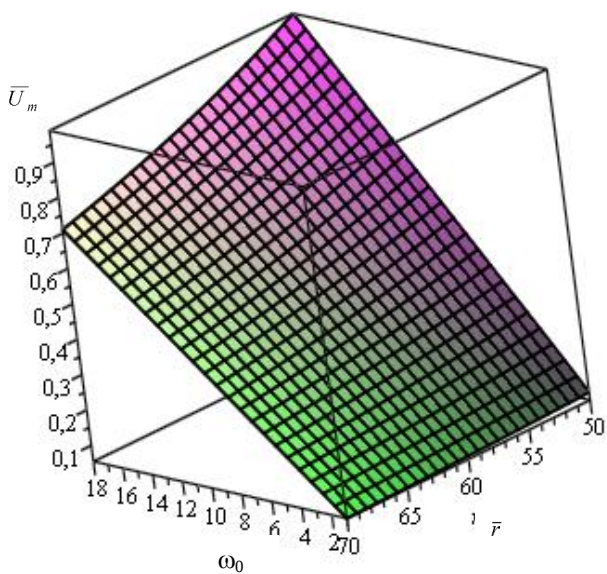


Рис. 4.4. Залежність $\bar{U}_m = f(\omega_0, \bar{r})$ при $\omega_0 \in [1, 18]$, $\bar{r} \in [50, 70]$

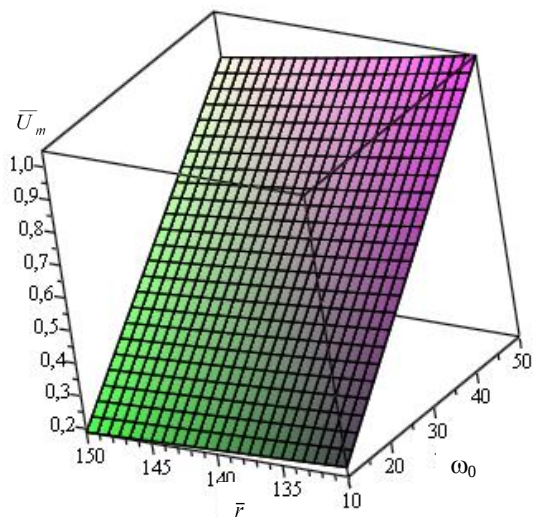


Рис. 4.5. Залежність $\bar{U}_m = f(\omega_0, \bar{r})$ при $\omega_0 \in [10, 50]$, $\bar{r} \in [130, 150]$

Аналіз цих залежностей свідчить про те, що із зростанням концентрації ω_0 вогнегасної речовини зростає радіус струменя при його розпилі.

На рис. 4.6 та рис. 4.7 наведені номограми $\bar{U}_m = f(\bar{r})$ при $\omega_0 = \text{const}$ та $\bar{U}_m = f(\omega_0)$ при $\bar{r} = \text{const}$ відповідно.

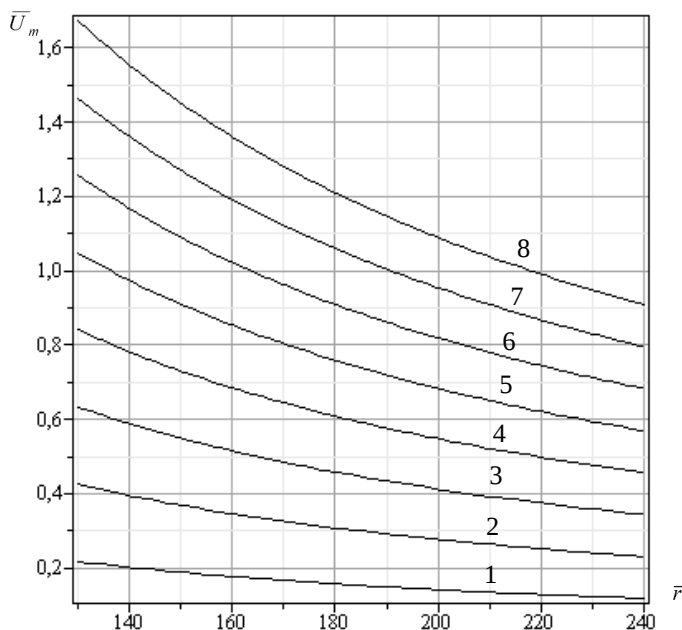


Рис. 4.6. Номограма $\bar{U}_m = f(\bar{r})$ при $\omega_0 = \text{const}$: 1 – $\omega_0 = 10$; 2 – $\omega_0 = 20$; 3 – $\omega_0 = 30$; 4 – $\omega_0 = 40$; 5 – $\omega_0 = 50$; 6 – $\omega_0 = 60$; 7 – $\omega_0 = 70$; 8 – $\omega_0 = 80$

Ці номограми служать для визначення (вибору) значення одного із трьох параметрів струменя вогнегасної речовини $\bar{U}_m, \bar{r}, \omega_0$ при заданих значеннях двох із цих параметрів.

Приклад 1. Задано $\bar{U}_m = 0,2$; $\omega_0 = 10$. Із номограми, наведених на рис.

4.6, витікає що $\bar{r} = 140$.

Приклад 2. Задано $\bar{U}_m = 0,8$; $\bar{r} = 150$. Із номограми, наведених на рис.

4.7, витікає що $\omega_0 = 44$.

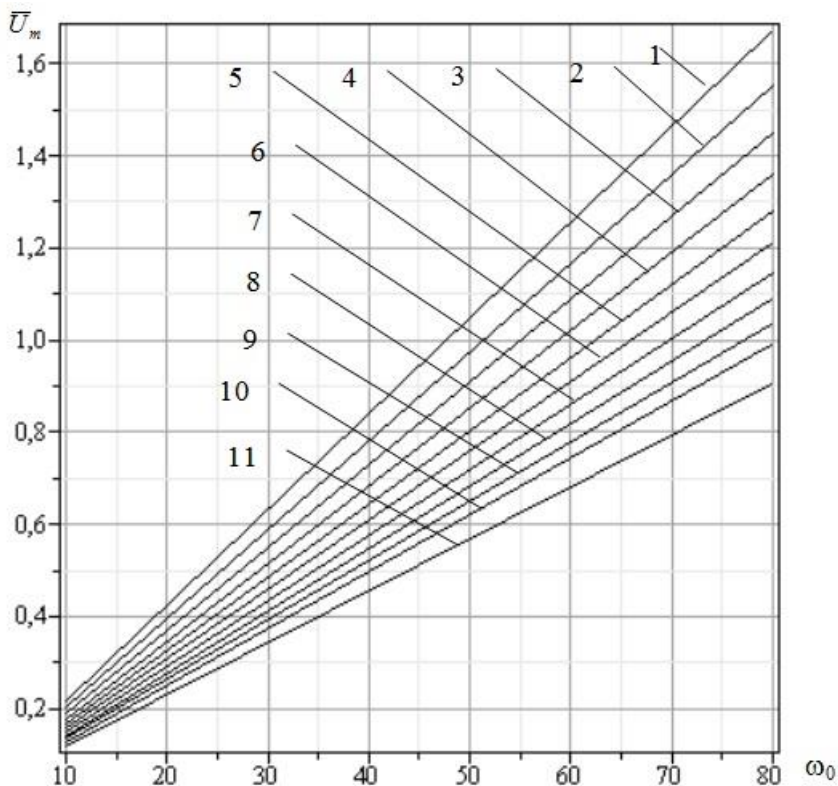


Рис. 4.7. Номограма $\bar{U}_m = f(\omega_0)$ при $\bar{r} = \text{const}$: 1 – $\bar{r} = 130$; 2 – $\bar{r} = 140$; 3 – $\bar{r} = 150$; 4 – $\bar{r} = 160$; 5 – $\bar{r} = 170$; 6 – $\bar{r} = 180$; 7 – $\bar{r} = 190$; 8 – $\bar{r} = 200$; 9 – $\bar{r} = 210$; 10 – $\bar{r} = 220$; 11 – $\bar{r} = 240$

Вираз (4.35) можна переписати наступним чином

$$1 + \bar{U}_m (2,25\omega_0)^{-1} \bar{r}^{-2} = \left[1 + 1,46(1 + \omega_0) \bar{r}^{-2} \omega_0^{-1} \right]^{0,5}, \quad (4.36)$$

із якого витікає вираз для $\bar{r}$

$$\bar{r} = 2,12 \left[\left[1,64(1 + \omega_0) \bar{U}_m^{-1} - 1 \right] \omega_0 \bar{U}_m^{-1} \right]^{0,5}. \quad (4.37)$$

На рис. 4.8 приведена графічна залежність $\bar{r} = f(\omega_0, \bar{U}_m)$ для $\omega_0 = 10 \div 80$; $\bar{U}_m = 0,2 \div 1,0$.

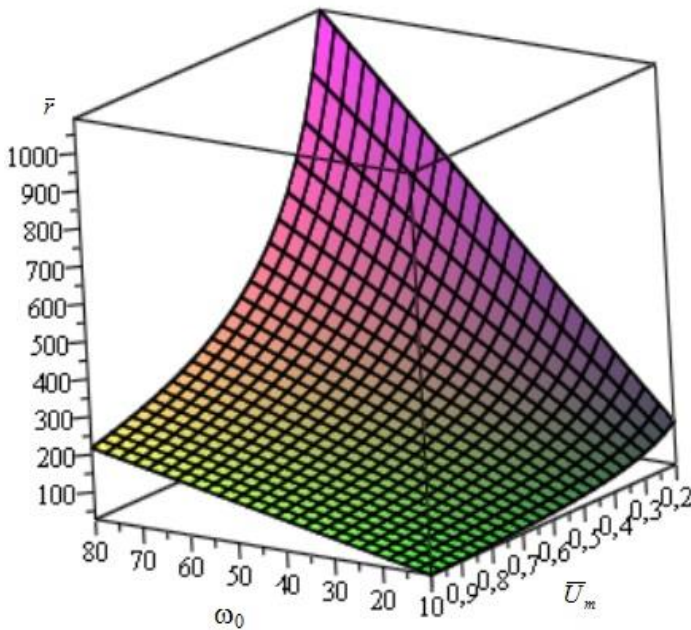


Рис. 4.8. Залежність $\bar{r} = f(\omega_0, \bar{U}_m)$

Аналіз цієї залежності свідчить, що із зростанням швидкості руху вогнегасної речовини вздовж вісі її розповсюдження при одночасному зменшенні її початкової концентрації має місце зменшення величини радіусу струменя розпилю.

На рис. 4.9 та рис. 4.10 наведені номограми $\bar{r} = f(\bar{U}_m)$ для $\omega_0 = \text{const}$ та $\bar{r} = f(\omega_0)$ для $\bar{U}_m = \text{const}$ відповідно, які побудовані згідно (4.37).

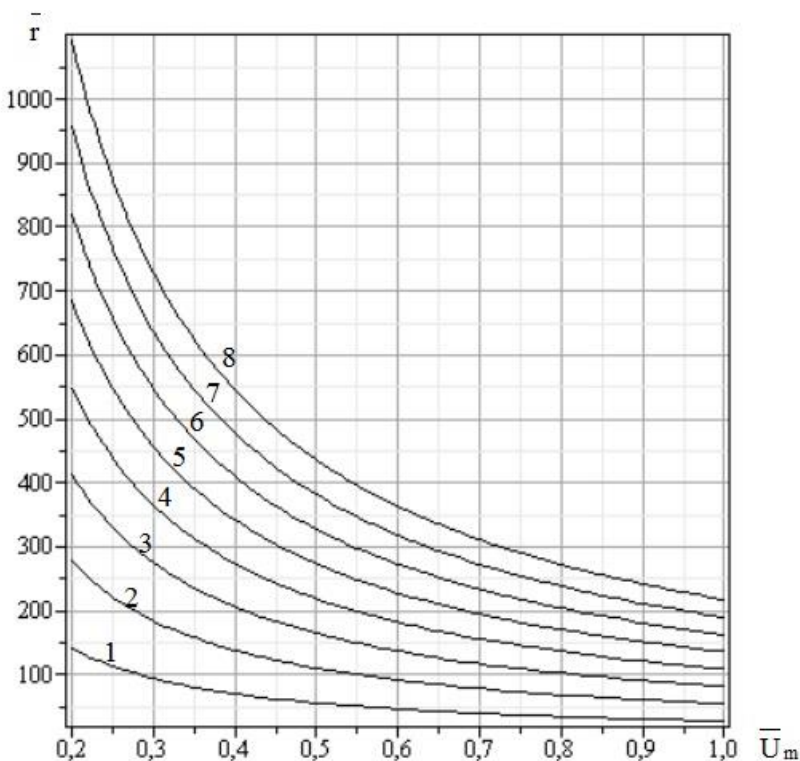


Рис. 4.9. Номограма $\bar{r} = f(\bar{U}_m)$ при $\omega_0 = \text{const}$: 1 – $\omega_0 = 10$; 2 – $\omega_0 = 20$; 3 – $\omega_0 = 30$; 4 – $\omega_0 = 40$; 5 – $\omega_0 = 50$; 6 – $\omega_0 = 60$; 7 – $\omega_0 = 70$; 8 – $\omega_0 = 80$

Ці номограми, а також номограми, наведені на рис. 4.6 та рис. 4.7, доцільно використовувати в якості фрагментів інженерної методики для синтезу мобільних систем пожежогасіння.

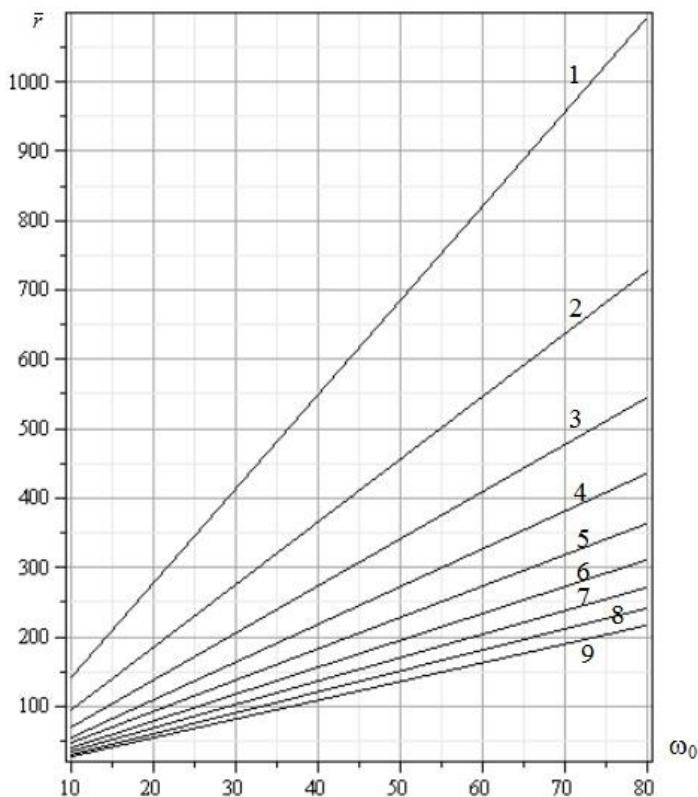


Рис. 4.10. Номограма $\bar{r} = f(\omega_0)$ при $\bar{U}_m = \text{const}$: 1 – $\bar{U}_m = 0,2$; 2 – $\bar{U}_m = 0,3$; 3 – $\bar{U}_m = 0,4$; 4 – $\bar{U}_m = 0,5$; 5 – $\bar{U}_m = 0,6$; 6 – $\bar{U}_m = 0,7$; 7 – $\bar{U}_m = 0,8$; 8 – $\bar{U}_m = 0,9$; 9 – $\bar{U}_m = 1,0$.

Вибір конкретної номограми для рішення задачі синтеза систем пожежогасіння визначається умовами цієї задачі.

4.3. Спрощення диференційного рівняння по визначенню розподілу потоку вогнегасної речовини по його радіусу

Перепишемо диференційне рівняння (4.1) із урахуванням виразів (4.26) та (4.32), внаслідок чого одержимо

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dx} = \frac{\bar{dr}}{\bar{dx}} = 0,22 \times \\ \times \left[4a_2 a_1^2 \bar{r}^{-2} (bd^2 a_3^2)^{-1} + (a_2 a_3^{-1} - 2) \left[\left[1 + 4a_2 a_1^2 \bar{r}^{-2} (bd^2 a_3^2)^{-1} \right]^{0,5} - 1 \right] \right] \times \\ \times \left[4a_2 a_1^2 \bar{r}^{-2} (bd^2 a_3^2)^{-1} + 2(a_2 a_3^{-1} - 1) \left[\left[1 + 4a_2 a_1^2 \bar{r}^{-2} (bd^2 a_3^2)^{-1} \right]^{0,5} - 1 \right] \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (4.38)$$

де $\bar{x} = xR^{-1}$.

Якщо ввести позначення

$$\alpha = a_2 a_3^{-1} = 1,24; \quad \beta = 4a_2 a_1^2 (bd^2 a_3^2)^{-1} = 0,73(bd^2)^{-1}; \quad z^2 = \beta \bar{r}^{-2}, \quad (4.39)$$

то диференційне рівняння (4.38) буде трансформовано до вигляду

$$\begin{aligned} 0,22 d\bar{x} &= \left[z^2 + 2(\alpha - 1) \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] \right] \times \\ &\times \left[z^2 + (\alpha - 2) \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] \right]^{-1} \beta^{-0,5} dz = \\ &= \left[z^2 + (\alpha - 2) \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] + \alpha \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] \right] \times \\ &\times \left[z^2 + (\alpha - 2) \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] \right]^{-1} \beta^{-0,5} dz = \\ &= \left[1 + \alpha \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] \left[z^2 + (\alpha - 2) \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] \right]^{-1} \right]^{-0,5} \beta^{-0,5} dz = \\ &= \beta^{-0,5} dz + \left[\alpha \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] \left[z^2 + (\alpha - 2) \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] \right]^{-1} \right] \beta^{-0,5} dz. \end{aligned} \quad (4.40)$$

Після інтегрування (4.40) зліва та справа одержимо

$$\begin{aligned}
 0,22(\bar{x} - \bar{x}_0) &= \beta^{-0,5} z + \beta^{-0,5} \alpha \int_0^z \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] \times \\
 &\times \left[z^2 + (\alpha - 2) \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] \right]^{-1} dz.
 \end{aligned}
 \tag{4.41}$$

Вираз під інтегралом можна спростити. Для цього запишемо

$$\begin{aligned}
 &\left[z^2 + (\alpha - 2) \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] \right]^{-1} \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right]^{-1} = \\
 &= z^2 \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right]^{-1} + \alpha - 2 = \\
 &= z^2 \left[(1 + z^2)^{0,5} + 1 \right] \left[1 + z^2 - 1 \right]^{-1} + \alpha - 2 = \\
 &= (1 + z^2)^2 + \alpha - 1.
 \end{aligned}
 \tag{4.42}$$

Внаслідок цього можна записати, що

$$\begin{aligned}
 &z^2 + (\alpha - 2) \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] = \left[(1 + z^2)^2 - 1 \right] \times \\
 &\times \left[(1 + z^2)^{0,5} + \alpha - 1 \right]
 \end{aligned}
 \tag{4.43}$$

а інтеграл в виразі (4.41) буде трансформовано до вигляду

$$\begin{aligned}
 &\int_0^z \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] \left[z^2 + (\alpha - 2) \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] \right]^{-1} dz = \\
 &= \int_0^z \left[(1 + z^2)^{0,5} + \alpha - 1 \right]^{-1} dz = \int_0^z \left[(1 + z^2)^{0,5} - \alpha + 1 \right] \times \\
 &\times \left[1 + z^2 - (\alpha - 1)^2 \right]^{-1} dz = \int_0^z (1 + z^2)^{0,5} \left[z^2 + \alpha(2 - \alpha) \right]^{-1} dz + \\
 &+ (1 - \alpha) \int_0^z \left[z^2 + \alpha(2 - \alpha) \right]^{-1} dz.
 \end{aligned}
 \tag{4.44}$$

Для другого інтегралу має місце [51]

$$\int_0^z [z^2 + \alpha(2 - \alpha)]^{-1} dz = [\alpha(2 - \alpha)]^{-0,5} \operatorname{arctg} [z[\alpha(2 - \alpha)]^{-0,5}] \quad (4.45)$$

Для того, щоб вичислити перший інтеграл в (4.44) введемо змінну

$$t = z(1 + z^2)^{-0,5}, \quad (4.46)$$

внаслідок чого можна записати

$$\begin{aligned} z^2 &= t^2(1 - t^2)^{-1}; & z &= t(1 - t^2)^{-0,5}; \\ (1 + z^2)^{0,5} &= (1 - t^2)^{-0,5}; & dz &= [(1 - t^2)(1 - t^2)^{0,5}]^{-1} dt. \end{aligned} \quad (4.47)$$

Якщо врахувати співвідношення (4.47), то для виразу, що стоїть під першим інтегралом в (4.44), буде мати місце

$$\begin{aligned} (1 + z^2)^{0,5} [z^2 + \alpha(2 - \alpha)]^{-1} dz &= [(1 - t^2) [t^2 + \alpha(2 - \alpha)(1 - t^2)]]^{-1} dt = \\ &= [(1 - t^2) [t^2(1 - \alpha)^2 + \alpha(2 - \alpha)]]^{-1} dt = -[(1 - \alpha)^2 (t^2 - 1)(t^2 + c^2)]^{-1} dt, \end{aligned} \quad (4.48)$$

де

$$c^2 = \alpha(2 - \alpha)(1 - \alpha)^{-2}. \quad (4.49)$$

Із використанням методу невизначених коефіцієнтів [36] перетворимо вираз, що стоїть в квадратних дужках (4.48), тобто запишемо

$$\left[(t^2 - 1)(t^2 + c^2) \right]^{-1} = A(t^2 - 1)^{-1} + B(t^2 + c^2)^{-1}, \quad (4.50)$$

де A, B – коефіцієнти, які потрібно визначити.

Для коефіцієнтів A та B має місце система рівнянь

$$\begin{aligned} A + B &= 0; \\ Ac^2 - B &= 1, \end{aligned} \quad (4.51)$$

рішенням якої є

$$A = (1 + c^2)^{-1}; \quad B = -(1 + c^2)^{-1}. \quad (4.52)$$

Тоді перший інтеграл у виразі (4.44) можна записати наступним чином

$$J = - \left[(1 - \alpha)^2 (1 + c^2) \right]^{-1} \left[\int_0^t (t^2 - 1)^{-1} dt - \int_0^t (t^2 + c^2)^{-1} dt \right]. \quad (4.53)$$

Вираз, що стоїть перед скобкою із інтегралами, можна спростити наступним чином

$$\begin{aligned} \left[(1 - \alpha)^2 (1 + c^2) \right]^{-1} &= \left[(1 - \alpha)^2 \left[1 + \alpha(2 - \alpha)(1 - \alpha)^{-2} \right] \right]^{-1} = \\ &= (1 - \alpha)^2 \left[(1 - \alpha)^2 + \alpha(2 - \alpha) \right]^{-1} (1 - \alpha)^{-2} = \\ &= (1 - 2\alpha + \alpha^2 + 2\alpha - \alpha^2)^{-1} = 1. \end{aligned} \quad (4.54)$$

Перший інтеграл в (4.53) дорівнює [36,51]

$$\int_0^t (t^2 - 1)^{-1} dt = -\operatorname{arctht}. \quad (4.55)$$

Цей вираз можна переписати наступним чином [50]

$$\operatorname{arctht} = \operatorname{arcsh}\left[t(1-t^2)^{-0,5}\right] = \ln\left[t(1-t^2)^{0,5} + \left[t^2(1-t^2)^{-1} + 1\right]^{0,5}\right]. \quad (4.56)$$

Другий інтеграл в (4.53) дорівнює [50, 51]

$$\begin{aligned} \int_0^t (t^2 + c^2)^{-1} dt &= c^{-1} \operatorname{arctg}(tc^{-1}) = \\ &= (1-\alpha)[\alpha(2-\alpha)]^{-0,5} \operatorname{arctg}\left[t(1-\alpha)[\alpha(2-\alpha)]^{-0,5}\right] = \\ &= (\alpha-1)[\alpha(2-\alpha)]^{-0,5} \operatorname{arctg}\left[t(\alpha-1)[\alpha(2-\alpha)]^{-0,5}\right], \end{aligned} \quad (4.57)$$

де враховано, що

$$\operatorname{arctg}(-t) = -\operatorname{arctgt}. \quad (4.58)$$

Після об'єднання (4.54) ÷ (4.57) вираз (4.53) буде трансформовано наступним чином

$$\begin{aligned} J &= \ln\left[t(1-t^2)^{-0,5} + \left[t^2(1-t^2)^{-1} + 1\right]^{0,5}\right] - \\ &- (\alpha-1)[\alpha(2-\alpha)]^{-0,5} \operatorname{arctg}\left[t(\alpha-1)[\alpha(2-\alpha)]^{0,5}\right], \end{aligned} \quad (4.59)$$

який після врахування (4.46) приймає вигляд

$$J = \ln \left[z + (1 + z^2)^{0,5} \right] - (\alpha - 1) [\alpha(2 - \alpha)]^{-0,5} \times \\ \times \arctg \left[z(1 + z^2)^{-0,5} (\alpha - 1) [\alpha(2 - \alpha)]^{-0,5} \right] \quad (4.60)$$

Якщо об'єднати вирази (4.44), (4.45) та (4.60), то будемо мати

$$\int_0^z \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] z^2 + (\alpha - 2) \left[(1 + z^2)^{0,5} - 1 \right] dz = \\ = \ln \left[z + (1 + z^2)^{0,5} \right] - (\alpha - 1) [\alpha(2 - \alpha)]^{-0,5} \times \\ \times \left[\arctg \left[(\alpha - 1) [\alpha(2 - \alpha)]^{-0,5} z(1 + z^2)^{-0,5} \right] + \arctg \left[z(1 + z^2)^{-0,5} \right] \right] \quad (4.61)$$

Врахуємо співвідношення

$$\arctg x + \arctg y = \arctg \left[(x + y)(1 - xy)^{-1} \right] \quad (4.62)$$

внаслідок чого рішення (4.41) диференційного рівняння (4.1) приймає вигляд

$$0,22(\bar{x} - \bar{x}_0) = \beta^{-0,5} z + \beta^{-0,5} \alpha \times \\ \times \left[\ln \left[z + (1 + z^2)^{0,5} \right] - (\alpha - 1) [\alpha(2 - \alpha)]^{-0,5} \arctg \left[z \left[(1 + z^2)^{0,5} + \alpha - 1 \right] \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[[\alpha(2 - \alpha)]^{0,5} \left[(1 + z^2)^{0,5} - (\alpha - 1) [\alpha(2 - \alpha)]^{-1} z^2 \right]^{-1} \right] \right] \right] \quad (4.63)$$

Обозначимо функцію, що стоїть в квадратних дужках, через $f(z)$, яка із урахуванням (4.39) приймає вигляд

$$f(z) = \ln \left[z + (1 + z^2)^{0,5} \right] - \\ - 0,25 \arctg \left[\left[z(1 + z^2)^{0,5} + 0,24 \right] \left[0,97 \left[(1 + z^2)^{0,5} - 0,26 z^2 \right]^{-1} \right] \right]. \quad (4.64)$$

Слід відмітити, що функція $f(z)$ у вигляді (4.64) є достатньо складною при її використанні для вирішення інженерних задач.

Представимо функцію (4.64) наступним чином [67]

$$f(z) = f_1(z)[1(z) - 1(z - z_1)] + f_2(z)1(z - z_1), \quad (4.65)$$

де $1(\cdot)$ – функція Хевісайда [43]; $f_1(z), f_2(z)$ – апроксимації функції $f(z)$ на ділянках $z = 0 \div z_1$ та $z > z_1$ відповідно; z_1 – додатній корінь бікватратного рівняння

$$0,26^2 z^4 - z^2 - 1 = 0. \quad (4.66)$$

Додатній корінь цього рівняння є $z_1 = 3,9663$.

Для визначення функцій $f_1(z)$ та $f_2(z)$ скористуємося методом найменших квадратів [36].

Функцію $f_1(z)$ представимо у вигляді

$$f_1(z) = d_1 z^2 + d_2 z, \quad (4.67)$$

де d_1, d_2 – параметри, що визначаються рішеннями системи інтегральних рівнянь

$$\begin{aligned} \int_0^{z_1} \frac{d}{dd_1} [f(z) - d_1 z^2 - d_2 z]^2 dz &= 0; \\ \int_0^{z_1} \frac{d}{dd_2} [f(z) - d_1 z^2 - d_2 z]^2 dz &= 0. \end{aligned} \quad (4.68)$$

Перше рівняння цієї системи може переписати наступним чином

$$\int_0^{3,9663} f(z)z^2 dz = \left[d_1 \frac{z^5}{5} + d_2 \frac{z^4}{4} \right]_0^{3,9663} = 196,32d_1 + 61,87d_2, \quad (4.69)$$

а друге рівняння цієї системи

$$\int_0^{3,9663} f(z)z dz = \left[d_1 \frac{z^4}{4} + d_2 \frac{z^3}{3} \right]_0^{3,9663} = 61,87d_1 + 20,80d_2. \quad (4.70)$$

Використання пакету Maple [66] дозволяє визначити значення для інтегралів, що стоять зліва в рівняннях (4.69) та (4.70), які будуть відповідно дорівнювати 19,36 та 10,15.

Параметри d_1 та d_2 визначаються згідно до методу Крамера [36]

$$d_1 = \Delta_1 \Delta^{-1}; \quad d_2 = \Delta_2 \Delta^{-1}; \quad (4.71)$$

де

$$\Delta = \begin{vmatrix} 196,32 & 61,87 \\ 61,87 & 20,80 \end{vmatrix}; \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} 29,36 & 61,87 \\ 10,15 & 20,80 \end{vmatrix}; \quad (4.72)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 196,32 & 29,36 \\ 61,87 & 10,15 \end{vmatrix}.$$

Визначені таким чином параметри d_1 та d_2 відповідно дорівнюють - 0,068 та 0,689, тобто для функції $f_1(z)$ буде мати місце вираз

$$f_1(z) = -0,068z^2 + 0,689z. \quad (4.73)$$

Функцію $f_2(z)$ визначимо виразом

$$f_2(z) = \ln(z) + d_3, \quad (4.74)$$

де d_3 – параметр, який визначається рішенням інтегрального рівняння

$$\int_{z_1}^{50,0} \frac{d}{dd_3} [f(z) - \ln(z) - d_3 z]^2 dz = 0. \quad (4.75)$$

Це рівняння можна трансформувати наступним чином

$$d_3 z \Big|_{3,9663}^{50,0} = \int_{3,9663}^{50,0} [f(z) - \ln(z)] dz, \quad (4.76)$$

що приводить до вигляду для параметра d_3

$$d_3 = \frac{1}{46,0337} \int_{3,9663}^{50,0} [f(z) - \ln(z)] dz. \quad (4.77)$$

Визначення інтегралу в цьому виразі за допомогою пакета Maple [66] дає значення, яке дорівнює 16,13. Це означає, що $d_3 = 0,35$, тобто

$$f_2(z) = \ln(z) + 0,35 = \ln(1,42z). \quad (4.78)$$

Тоді для (4.65) буде мати місце [13]

$$f(z) = [-0,068z^2 + 0,689z][1(z) - 1(z - 3,9663)] + \ln(1,42z)1(z - 3,9663). \quad (4.79)$$

На рис. 4.11 наведені залежності (4.64) та (4.79), а на рис. 4.12 – залежність відносної похибки розбіжності δ між цими функціями.

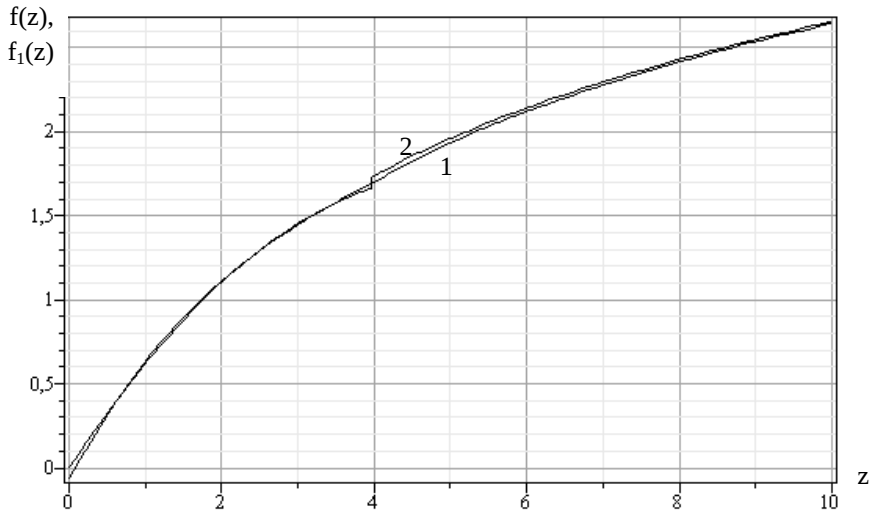


Рис. 4.11. Функції (4.64) та (4.79): 1 – функція (4.64); 2 – функція (4.79)

δ

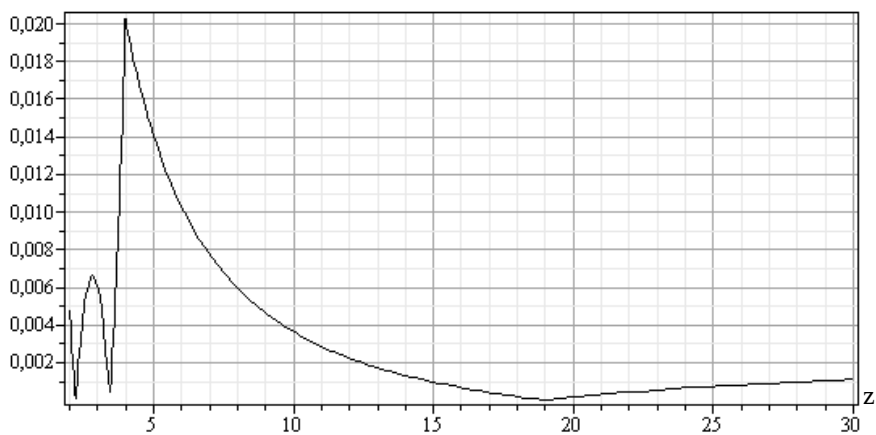


Рис. 4.12.Відносна похибка розбіжності між функціями (4.64) та (4.79)

Максимальна величина похибки складає 2,0 %, яка має місце при $z = z_1$. При $z \geq 12,0$ величина цієї похибки не перевищує 0,2 %.

4.4. Графічні залежності для оцінки геометричних характеристик струменя вогнегасної речовини

Якщо врахувати (4.27), (4.34), (4.39), а також (4.73), то для $z < z_1$ вираз (4.41) буде трансформовано наступним чином

$$0,22(\bar{x} - \bar{x}_0) = \bar{r} [1,85 - 0,1\bar{r}(1 + \omega_0)^{0,5} \omega_0^{-1}] \quad (4.80)$$

Для $z > z_1$ вираз (4.41) із врахуванням (4.27), (4.34), (4.39) та (4.78) буде мати вигляд

$$0,22(\bar{x} - \bar{x}_0) = \bar{r} + \omega_0 (1 + \omega_0)^{-0,5} \times \\ \times \ln [1,72(1 + \omega_0)^{0,5} \bar{r} \omega_0^{-1}] \quad (4.81)$$

Координату полюсу $\bar{x}_0$ визначимо за умови [63]

$$\bar{r} = \bar{r}_p \quad \text{при} \quad \bar{U}_m = 1,0. \quad (4.82)$$

Згідно цієї умови, а також із урахуванням (4.30) для $\bar{r}_p$ буде мати місце

$$\bar{r}_p = [b(a_1 - da_3)(a_1 a_2)^{-1}]^{0,5}. \quad (4.83)$$

Після підстановки в (4.83) співвідношень (4.27) та (4.34) одержимо

$$\bar{\Gamma}_p = 2,73(1 + 0,4\omega_0)^{0,5}. \quad (4.84)$$

Умові (4.82) відповідає координата перехідного перерізу струменю вогнегасної речовини [63, 64]

$$\bar{x}_p = 18,51\omega_0^{0,5} - 10,7. \quad (4.85)$$

Після підстановки в (4.80) та (4.81) замість $\bar{\Gamma}$ та $\bar{x}$ співвідношень (4.84) та (4.85) одержимо вирази для координати полюсу $\bar{x}_0$ вогнегасного струменю відповідно для $z < z_1$ та $z > z_1$, із урахуванням яких залежності (4.80) та (4.81) будуть трансформовані наступним чином [67]

$$\begin{aligned} \bar{x} = & 18,51\omega_0^{0,5} - 10,7 - 3,35(1 + 0,4\omega_0)^{0,5} \times \\ & \times \left[6,85 - \left[(1 + 0,4\omega_0)(1 + \omega_0)^{0,5} \omega_0^{-1} \right] + 0,45\bar{\Gamma} \left[18,5 - (1 + \omega_0)^{0,5} \omega_0^{-1} \bar{\Gamma} \right] \right] \end{aligned} \quad (4.86)$$

для $z < z_1$.

$$\begin{aligned} \bar{x} = & 18,51\omega_0^{0,5} - 10,7 - 12,4(1 + 0,4\omega_0)^{0,5} + \\ & + 4,55 \left[\bar{\Gamma} + \omega_0(1 + \omega_0)^{-0,5} \ln \left[0,37(1 + 0,4\omega_0)^{-0,5} \bar{\Gamma} \right] \right] \end{aligned} \quad (4.87)$$

для $z > z_1$.

На рис. 4.13 наведена залежність $\bar{x} = f(\omega_0, \bar{\Gamma})$, а на рис. 4.14 та рис. 4.15 представлені номограми $\bar{x} = f(\bar{\Gamma})$ при $\omega_0 = \text{const}$ та $\bar{x} = f(\omega_0)$ при $\bar{\Gamma} = \text{const}$, які побудовані у відповідності до (4.86).

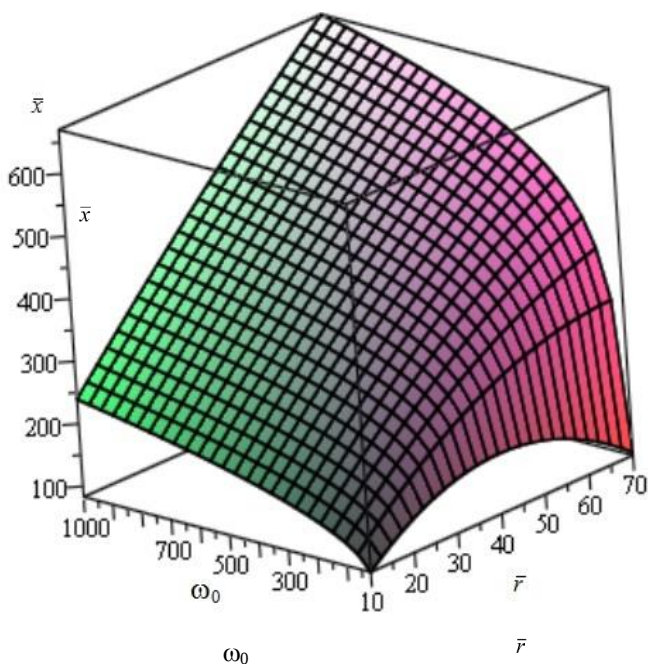


Рис. 4.13. Залежність $\bar{x} = f(\omega_0, \bar{r})$ при $z < z_1$

Ці номограми об'єднують між собою три параметри струменю вогнегасної речовини: координату перерізу $\bar{x}$, радіус $\bar{r}$ та початкову концентрацію суміші ω_0 .

На рис. 4.16 наведена залежність $\bar{x} = f(\omega_0, \bar{r})$ для $z > z_1$, а на рис. 4.17 та рис. 4.18 представлені номограми $\bar{x} = f(\bar{r})$ при $\omega_0 = \text{const}$ та $\bar{x} = f(\omega_0)$ при $\bar{r} = \text{const}$.

Використання номограм, наведених на рис. 4.14, рис. 4.15 та рис. 4.17, рис. 4.18, дозволяє вирішувати задачі по визначенню (вибору) одного із трьох параметрів струменя вогнегасної речовини при заданих значеннях двох параметрів.

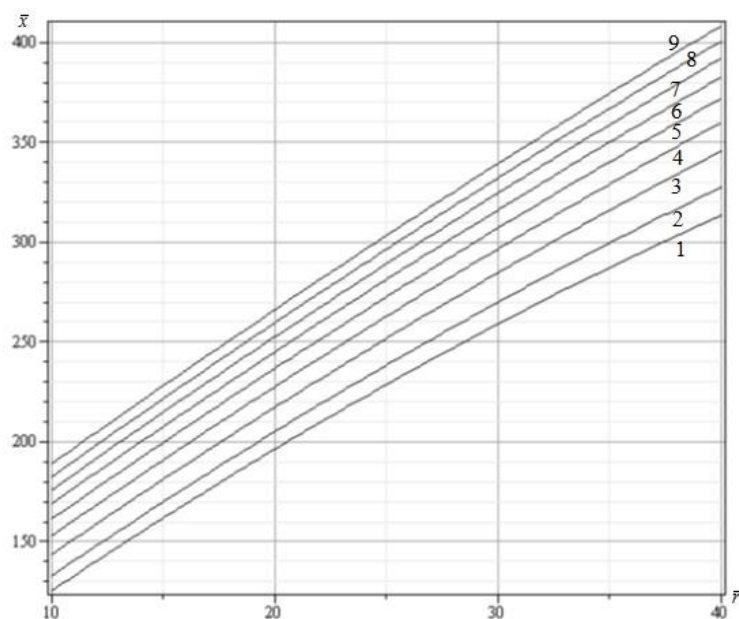


Рис. 4.14. Номограмма $\bar{x} = f(\bar{r})$, при $\omega_0 = \text{const}$ 1 – $\omega_0 = 120$; 2 – $\omega_0 = 150$; 3 – $\omega_0 = 200$; 4 – $\omega_0 = 250$; 5 – $\omega_0 = 300$; 6 – $\omega_0 = 350$; 7 – $\omega_0 = 400$; 8 – $\omega_0 = 450$; 9 – $\omega_0 = 500$;

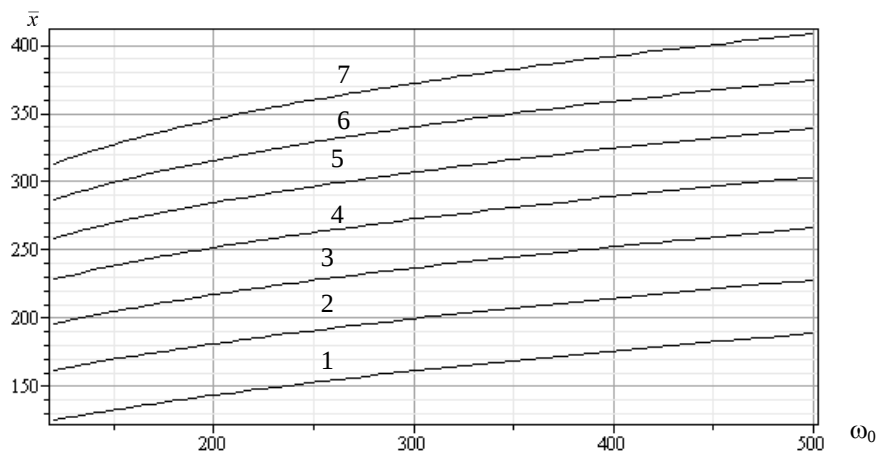


Рис. 4.15. Номограма $\bar{x} = f(\omega_0)$, при $\bar{r} = \text{const}$ 1 – $\bar{r} = 10$; 2 – $\bar{r} = 15$; 3 – $\bar{r} = 20$; 4 – $\bar{r} = 25$; 5 – $\bar{r} = 30$; 6 – $\bar{r} = 35$; 7 – $\bar{r} = 40$

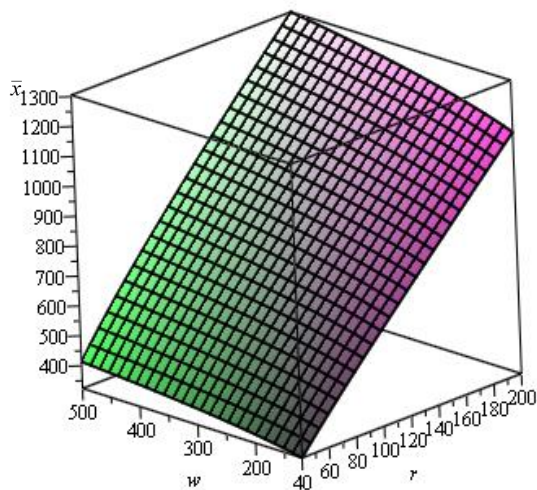


Рис. 4.16. Залежність $\bar{x} = f(\omega_0, \bar{r})$ при $z > z_1$

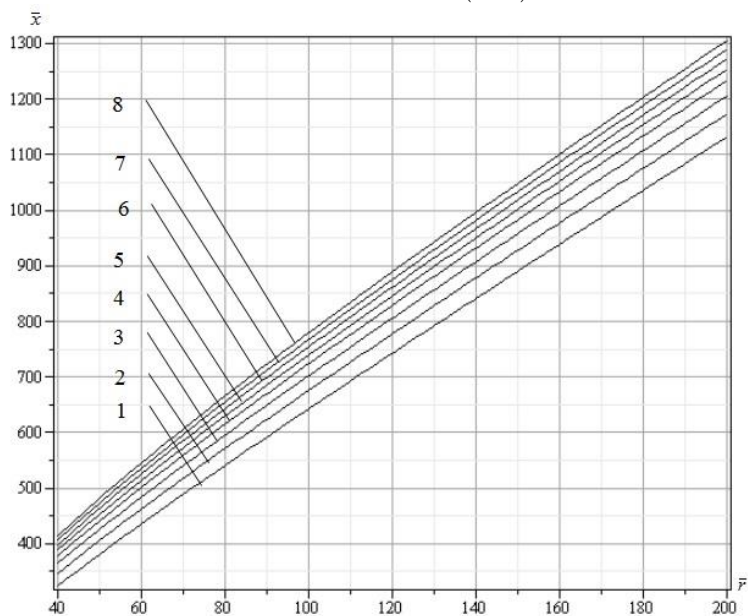


Рис. 4.17. Номограма $\bar{x} = f(\bar{r})$, при $\omega_0 = \text{const}$ 1 – $\omega_0 = 120$; 2 – $\omega_0 = 180$; 3 – $\omega_0 = 240$; 4 – $\omega_0 = 300$; 5 – $\omega_0 = 350$; 6 – $\omega_0 = 400$; 7 – $\omega_0 = 450$; 8 – $\omega_0 = 500$

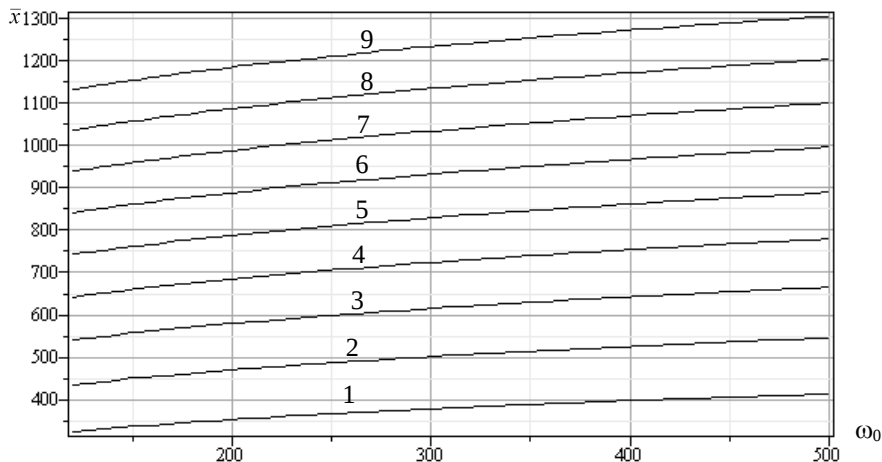


Рис. 4.18. Номограма $\bar{x} = f(\omega_0)$, при $\bar{r} = \text{const}$ 1 – $\bar{r} = 40$; 2 – $\bar{r} = 60$; 3 – $\bar{r} = 80$; 4 – $\bar{r} = 100$; 5 – $\bar{r} = 120$; 6 – $\bar{r} = 140$; 7 – $\bar{r} = 160$; 8 – $\bar{r} = 180$; 9 – $\bar{r} = 200$

Приклад. Задано $\omega_0 = 500$, $\bar{r} = 80$. Визначити координату $\bar{x}$ перерізу струменя вогнегасної речовини, яка відповідає цим значенням параметрів.

Згідно до номограми, наведеній на рис. 4.18, таким значенням параметрів ω_0 та $\bar{r}$ відповідає $\bar{x} \cong 670$.

4.5. Практичне вивчення геометричних параметрів вогнегасної речовини

Метою експериментальних досліджень є верифікація результатів стосовно параметрів вогнегасної речовини на ділянці її подачі до осередку горіння. Такими параметрами є радіус струменя $\bar{r}$ та координата $\bar{x}$ перерізу струменя.

В якості вогнегасної речовини використовувався вогнегасний порошок Пірант АН, щільність якого складає $7 \cdot 10^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$. Вогнегасна речовина подавалась під тиском $P = 0,4 \text{ МПа}$ і здійснювалось фотографування її струменя. По фотографії визначались параметри $\bar{r}$ та $\bar{x}$.

На рис. 4.19 наведений приклад по визначенню параметрів струменя вогнегасної речовини.



Рис. 4.19. До визначення параметрів струменя вогнегасної речовини

Для цього прикладу має місце $\bar{x}_3 = 187,0$, якому відповідає величина параметра $\bar{r}_3$, яка дорівнює 13,3. Величині $\bar{r}_3 = 13,3$ згідно до номограми, наведених на рис. 4.14, відповідає $\bar{x}_3 = 213$. Відносна похибка δ визначення координати $\bar{x}$ в цьому випадку буде дорівнювати 13,9 %.

В табл. 4.1 наведені результати визначення параметра $\bar{x}_3$ при $\bar{r}_3 = \text{const}$. Величина $\bar{r}_3$ приймалась на рівні 10,4.

Таблиця 4.1

Параметри $\bar{x}_3$ при $\bar{r}_3 = \text{const}$

i	1	2	3	4	5	6
$\bar{x}_3$	187	176	184	179	183	179

Математичне очікування $\bar{x}_{30}$ та середньоквадратична похибка σ_x для даних табл. 4.1 відповідно дорівнюють 181,3 та 4,03.

Згідно до номограми, наведених на рис. 4.14, параметру $\bar{r}_3$ відповідає величина параметра $\bar{x}_T$ яка дорівнює 200.

В цьому випадку похибка δ_{x1} розбіжності складає 10,3 %.

В табл. 4.2 наведені результати визначення параметра $\bar{r}_3$ при $\bar{x}_3 = \text{const}$. Величина $\bar{x}_3$ приймалась на рівні 187.

Таблиця 4.2

Параметри $\bar{r}_3$ при $\bar{x}_3 = \text{const}$

i	1	2	3	4	5	6
$\bar{r}_3$	10,4	10,1	10,8	11,3	10,9	11,4

Математичне очікування $\bar{r}_{30}$ та середньоквадратична похибка σ_r для даних табл. 4.2 відповідно складають 10,8 та 0,42.

Параметру $\bar{x}_3 = 187$ відповідає величина параметра $\bar{g}_T$, яка дорівнює 9,2.

В цьому випадку похибка δ_T розбіжності складає 14,8 %.

Параметру $\bar{g}_{30} = 10,8$ згідно номограми, наведеної на рис. 4.14, відповідає величина параметра $\bar{x}_T$, яка дорівнює 204. В цьому випадку похибка δ_{x_2} розбіжності складає 9,4 %. Для сумарної похибки δ_x , яка визначається як середня величина від δ_{x1} та δ_{x2} , має місце $\delta_x = 9,85\%$.

4.6. Висновки за розділом 4

4.6.1. Наведено перелік параметрів, які характеризують вогнегасну речовину на ділянці її доставки до осередку горіння, основна частина яких відноситься до групи геометричних параметрів.

4.6.2. Визначені аналітичні вирази для кількості руху та для витрат вогнегасної речовини.

4.6.3. Одержано вираз для швидкості руху вогнегасної речовини та побудовано номограми для її оперативного визначення.

4.6.4. Із використанням методу найменших квадратів здійснено спрощення диференційного рівняння по визначенню розподілу потоку вогнегасної речовини по його радіусу та побудовані номограми для визначення геометричних параметрів струменю вогнегасної речовини.

4.6.5. Експериментальним шляхом проведено верифікацію математичних моделей, які описують геометричні параметри струменю вогнегасної речовини, і показано, що похибка розбіжності між даними теорії та експерименту лежать в межах $(9,4 \div 14,8) \%$.

РОЗДІЛ 5
КОМПАКТНА РУХОМА УСТАНОВКА ПОЖЕЖОГАСІННЯ.
ЗАГАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ. СИТЕМА УПРАВЛІННЯ. ОСОБЛИВОСТІ
ЕКСПЛУАТАЦІЇ

5.1. Показники тривалості дії

5.1.1. Термін ліквідації загорання

Для одержання оцінки часу гасіння t_T пожежі за допомогою мобільної пожежної установки використовується залежність (3.127), яка є часовою характеристикою такої установки. Час гасіння t_T пожежі є коренем рівняння

$$\theta(t_T) - \theta_T = 0, \quad (5.1)$$

де $\theta_T = T_H - T_T$.

Для більшості вуглеводів має місце [69-73]

$$\theta_T T_H^{-1} \leq 0,15. \quad (5.2)$$

На рис. 5.1. наведені залежності $\theta(t)(K P_1)^{-1}$ та $\theta_T T_H^{-1} = 0,15$, точка перетину яких відповідає кореню рівняння (5.1), тобто є оцінкою часу гасіння t_T пожежі. Для рис. 5.1 цей час дорівнює 0,83 с. Залежність $\theta(t)(K P_1)^{-1}$ наведена для характерних параметрів мобільної пожежної установки, приведених в розд. 3, а також при $\tau_5 = 2,0$ с.

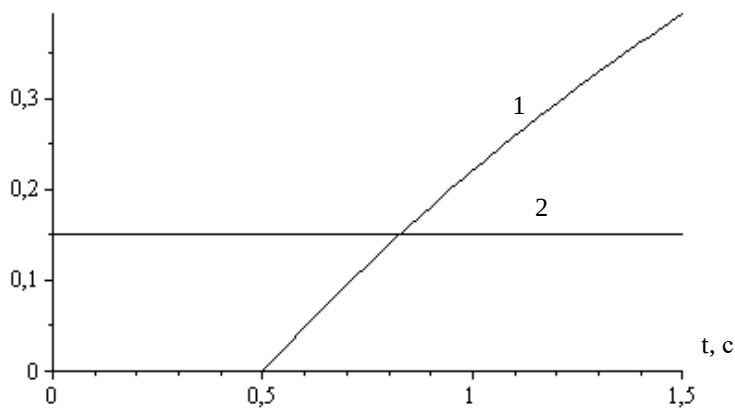


Рис. 5.1. До визначення часу гасіння пожежі: 1 – залежність $\theta(t)(Kp_1)^{-1}$; 2 – залежність $\theta_T T_H^{-1} = 0,15$

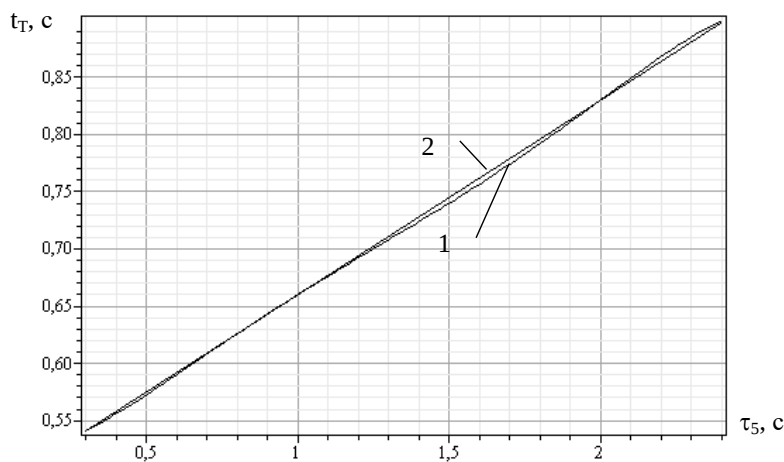


Рис. 5.2. Залежність $t_T = f(\tau_5)$: 1 – залежність, яка визначена графічним способом; 2 – апроксимаційна залежність $t_T = 0,49 + 0,17\tau_5$

В табл. 5.1. наведені оцінки часу гасіння пожежі в залежності від постійної часу τ_5 , які одержані шляхом графічного способу розв'язання рівняння (5.1).

Таблиця 5.1 Оцінки часу гасіння пожежі

$\tau_5, \text{с}$	0,2	0,6	1,0	1,5	2,0	2,5	5,0	8,0
$t_T, \text{с}$	0,53	0,59	0,66	0,74	0,83	0,91	1,32	1,81

Із використанням методу найменших квадратів [36] залежність $t_T = f(\tau_5)$ може бути апроксимована наступним чином

$$t_T = 0,49 + 0,17\tau_5. \quad (5.3)$$

На рис. 5.2 наведені залежності $t_T = f(\tau_5)$, які побудовані відповідно до даних табл. 5.1 та згідно із (5.3). Похибка розбіжності при цьому не перевищує 2,0 %.

5.1.2. Параметри часових показників закінчення вогнегасної речовини в ємностях

Для одержання оцінки часу витікання вогнегасної речовини із ємності будемо вважати, що за час dt , на протязі якого її рівень опуститься на величину dh , течія є такою, що встановилась. За цей час із ємності буде витікати об'єм вогнегасної речовини dW , тобто

$$dW = \mu F (2\Delta P \rho^{-1})^{0,5} dt, \quad (5.4)$$

де μ – коефіцієнт витікання, величина якого дорівнює 0,85 [74]; ΔP – різниця тиску; ρ – щільність вогнегасної речовини; F – площа вихідного отвору ємності.

Об'єм dW пов'язаний із площею вільної поверхні S вогнегасної речовини наступним чином

$$dW = -Sdh. \quad (5.5)$$

Знак мінус вказує на те, що зменшення об'єму dW обумовлено збільшенням рівня dh .

Після об'єднання (5.4) та (5.5) вираз для часу витікання вогнегасної речовини із ємності буде мати вигляд

$$\begin{aligned} t_0 &= -\int_H^0 F(\mu S)^{-1} (0,5\rho\Delta P^{-1})^{0,5} dh = \int_0^H F(\mu S)^{-1} (0,5\rho\Delta P^{-1})^{0,5} dh = \\ &= FH(\mu S)^{-1} (0,5\rho\Delta P^{-1})^{0,5} = W(\mu S)^{-1} (0,5\rho\Delta P^{-1})^{0,5}, \end{aligned} \quad (5.6)$$

де H – висота вогнегасної речовини в ємності.

Вираз (5.6) описує час повного опорожнення ємності із вогнегасною речовиною.

Приклад. Якщо маса M вогнегасної речовини дорівнює 40 кг, то її об'єм W при $\rho = 8 \cdot 10^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ дорівнює $5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$.

Для $S = 7.5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ та $\Delta P = 0,4^2 \text{ МПа}$ час повного опорожнення ємності із вогнегасною речовиною буде дорівнювати 23,8 с.

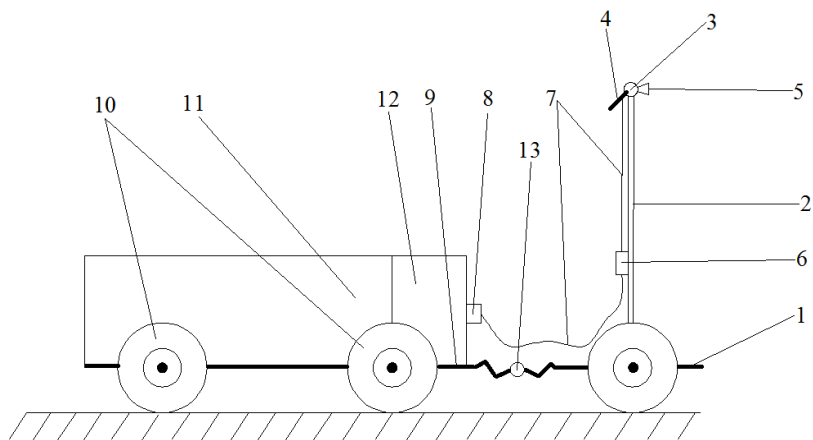


Рис. 5.3.Схема мобільної пожежної установки

Для збільшення часу повного опорожнення ємності із вогнегасною речовиною в мобільній пожежній установці можуть використовуватись додаткові ємності-контейнери [74]. На рис. 5.3 наведена схема такої мобільної установки, яка включає: 1 – платформу сігвея; 2 – рульовий стовп; 3 – кермо; 4 – органи управління; 5 – форсунка; 6 – вентиль; 7 – гнучкі шланги; 8 –редуктор; 9 – платформу; 10 – колісні пари; 11 – контейнер для вогнегасної речовини; 12 – балон із стиснутим повітрям; 13 – механізм з'єднання платформи 1 сігвея із платформою 9. Платформа 9 механічно за допомогою механізму 13 з'єднана із платформою 1 сігвея із можливістю кутового переміщення в горизонтальній та вертикальній площинах. Вихід редуктора 8 через вентиль 6 гідравлічно з'єднаний із запірним пристроєм, вихід якого гідравлічно з'єднаний через органи управління 4 із форсункою 5. Внаслідок того, що контейнер 11 із вогнегасною речовиною розміщено на окремій платформі 9, на масу вогнегасної речовини не будуть накладатися обмеження, зокрема, вантажопідйомними характеристиками сігвея, тому

запаси вогнегасної речовини в такому виконанні мобільної пожежної установки можуть бути суттєво збільшені. Так, при масі M вогнегасної речовини в 160 кг порівняно із наведеним прикладом час повного опорожнення контейнера 11 може бути збільшено в чотири рази і скласти 1,57 хвилин.

5.2. Режим подачі вогнегасної речовини

На рис. 5.4. наведена схема розташування гнучкої магістралі на рульовому стовпі сігвея.

У перерізах 0-0 та 1-1 для проекцій на вісі декартової системи координат xOy рівняння імпульсу сил буде мати місце [68].

$$\begin{aligned}\rho Q(V_0 \cos \alpha_0 - V_1 \cos \alpha_1)dt &= F_x dt; \\ \rho Q(V_0 \sin \alpha_0 - V_1 \sin \alpha_1)dt &= F_y dt,\end{aligned}\tag{5.7}$$

де Q – об’ємні витрати вогнегасної речовини в перерізах 0-0 та 1-1, $\overline{V}_0$ та $\overline{V}_1$ – швидкість потоку вогнегасної речовини в перерізах 0-0 та 1-1 відповідно, $\overline{F}_x$ та $\overline{F}_y$ – проекції вектора сили реакції $\overline{F} = -\overline{R}$, яка діє на потік вогнегасної речовини зі сторони гнучкої магістралі; $\overline{R}$ – сила, з якою потік вогнегасної речовини діє на гнучку магістраль ($\overline{F}_x = -R_x, \overline{F}_y = -R_y$).

Систему рівнянь (5.7) можна переписати наступним чином

$$\begin{aligned}\rho Q(V_1 \cos \alpha_1 - V_0 \cos \alpha_0) &= R_x; \\ \rho Q(V_1 \sin \alpha_1 - V_0 \sin \alpha_0) &= R_y,\end{aligned}\tag{5.8}$$

внаслідок чого для сили R буде мати місце

$$R = (R_x^2 + R_y^2)^{0.5} = \rho Q [V_1^2 - 2V_1 V_0 (\cos \alpha_1 \cos \alpha_0 + \sin \alpha_1 \sin \alpha_0) + V_0^2]^{0.5}. \quad (5.9)$$

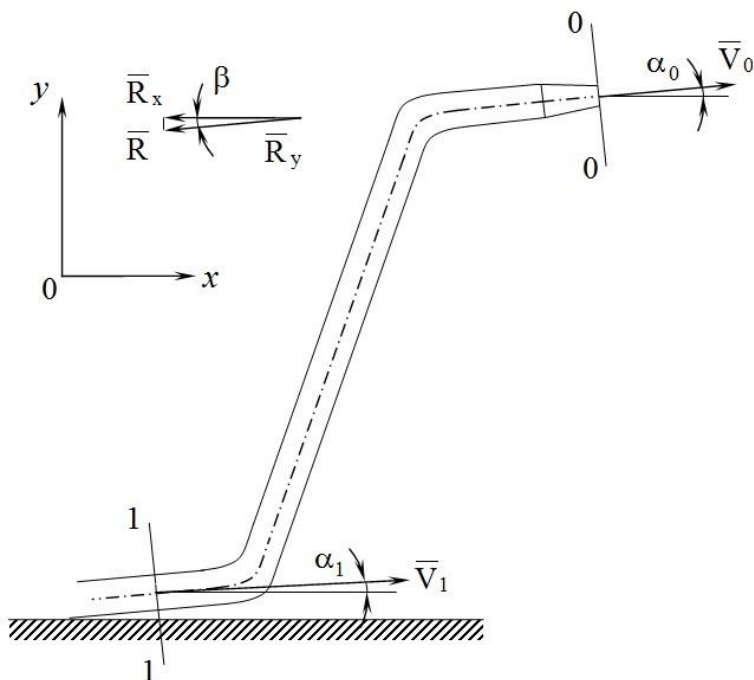


Рис. 5.4. Схема розташування гнучкої магістралі на сігвеї

Якщо виконується умова, що

$$\alpha_1 = 0, \quad (5.10)$$

то вирази (5.8) та (5.9) трансформуються наступним чином

$$\begin{aligned} R_x &= \rho Q V_0 (V_1 V_0^{-1} - \cos \alpha_0); \\ R_y &= -\rho Q V_0 \sin \alpha_0; \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$R = \rho Q V_0 \left[(V_1 V_0^{-1})^2 - 2 V_1 V_0^{-1} \cos \alpha_0 + 1 \right]^{0,5}. \quad (5.12)$$

Орієнтація вектору $\overline{R}$ сили визначається кутом β , який має наступний опис

$$\beta = \arctg(R_x R_y^{-1}) = -\arctg \left[\sin \alpha_0 [V_1 V_0^{-1} - \cos \alpha_0]^{-1} \right] \quad (5.13)$$

У першому наближенні можна положити, що

$$\begin{aligned} Q &= \pi r_0^2 V_0; \\ V_0 V_1^{-1} &= (r_1 r_0^{-1})^2, \end{aligned} \quad (5.14)$$

де r_0 та r_1 – радіуси перерізів в площині 0-0 та 1-1 відповідно.

На практиці виконується умова

$$V_0 V_1^{-1} \ll 1,0, \quad (5.15)$$

внаслідок чого для (5.12) та (5.13) можна записати

$$R \cong \rho Q V_0 = \pi r_0^2 \rho V_0^2; \quad (5.16)$$

$$\beta \cong \alpha_0. \quad (5.17)$$

Із (5.17) витікає, що вектор сили $\overline{R}$ направлений проти вектору швидкості $\overline{V}_0$ руху вогнегасної речовини. На рис. 5.5 наведені графічні

залежності $R = R(r_0, V_0)$ за умови, що $\rho = 8 \cdot 10^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$;
 $r_0 = (2,0 \div 8,0) \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-3}$; $V_0 = (10,0 \div 50,0) \text{ мс}^{-1}$.

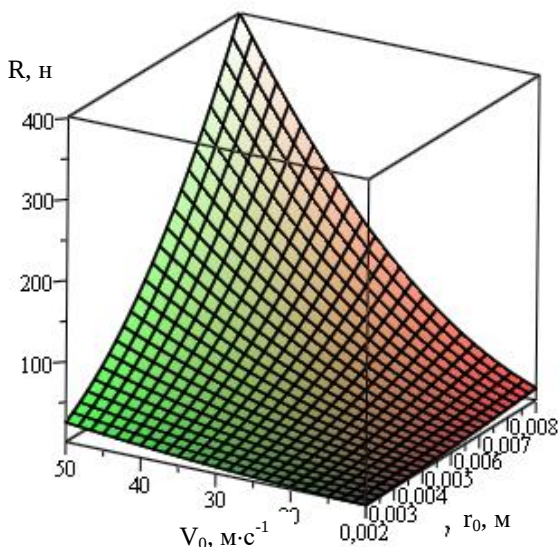


Рис. 5.5. Залежність $R = R(r_0, V_0)$

Для характерних величин параметрів r_0 та V_0 , які дорівнюють відповідно $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ та $30,0 \text{ мс}^{-1}$ величина сили реакції R дорівнює $56,5 \text{ Н}$.

Наявність сили реакції R є завадою як для процесу управління рухом мобільної пожежної установки на основі сігвею, так і для процесу гасіння пожежі. Одним із шляхів по послабленню дії такої завади є введення управління кутовим положенням форсунки, за допомогою якої здійснюється розпил вогнегасної речовини. На рис. 5.6. наведено схему мобільної установки, в якій реалізовано управління кутовим положенням форсунки [75]. На цій схемі наведено 1 – крило колеса; 2 – платформа; 3 – контейнери у

вигляді ємностей для вогнегасної речовини; 4 – балон із стисненим повітрям; 5 – повітряний редуктор; 6 – рульовий стовп; 7 – кермо; 8 – обойма із форсункою та шестернею; 9 – органи управління; 10 – гнучкий шланг для гідравлічних з'єднань; 11 – вентиль; 12 – електричний привід із редуктором. Контейнери 3 встановлені на крилах 1 коліс сігвея, балон із стисненим повітрям 4 встановлений на платформі 2. На балоні 4 встановлений повітряний редуктор 5, з'єднаний із ним. На рульовому стовпі 6 сігвея встановлений вентиль 11 та електричний привід 12 із редуктором, а на кермі – обойма із форсункою та шестернею 8, а також органи управління 9. Гнучкі шланги 10 забезпечують гідравлічне з'єднання між редуктором 5 та контейнерами 3 із вогнегасною речовиною (через вентиль 11), а також між контейнерами 3 та через органи управління 9 із форсункою, яка установлена на обоймі 8.

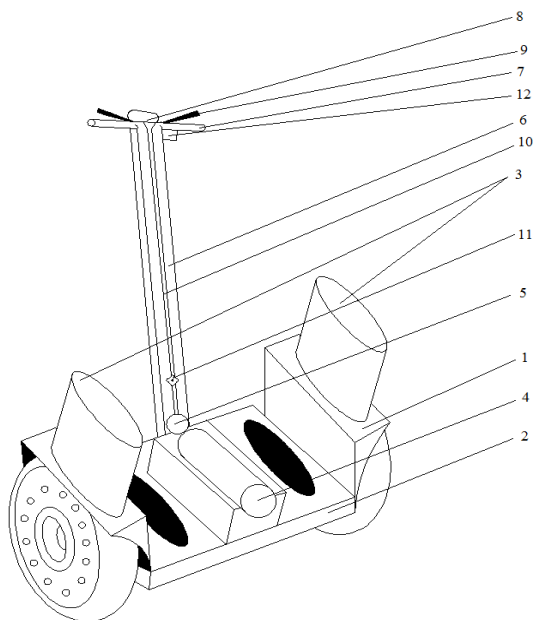
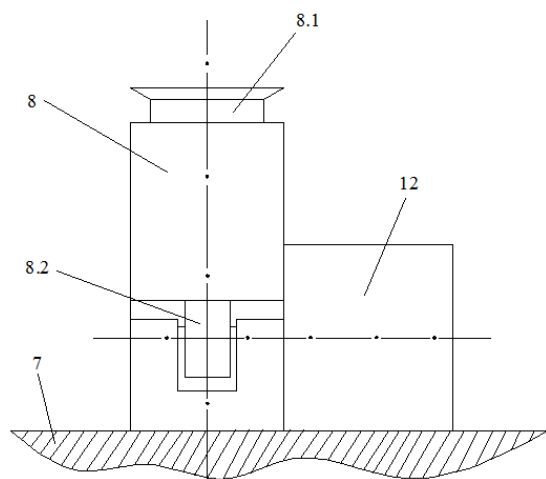
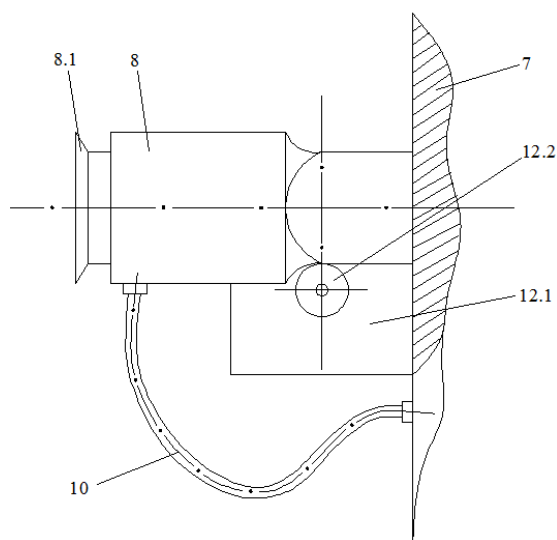


Рис. 5.6. Схема мобільної пожежної установки



а)



б)

Рис. 5.7. Схема розташування обойми із форсункою та шестернею на кермі сігвея: а) – вид зверху; б) – вид зліва

На рис. 5.7. наведена схема розташування обойми із форсункою та шестернею, де 7 – кермо; 8 – обойма; 8.1 – форсунка; 8.2 – шестерня; 12.1 електричний привід; 12.2 – редуктор; 10 – гнучкий шланг. Через гнучкий шланг 10 до форсунки 8.1 подається вогнегасна речовина. Зміна кута нахилу обойми 8 забезпечується за допомогою електричного приводу 12.1, редуктора 12.2 та шестерні 8.2.

Подача вогнегасної речовини до осередку горіння може здійснюватись як в режимі руху сігвея, так і в його нерухомому стані.

5.3. Показники роботи оператора

В першому наближенні властивості людини-оператора можна описати лінійною моделлю, яка включає три ланки [76÷80]. Перша ланка здійснює прийом сигналів і по своїм динамічним властивостям вона є ланкою запізнення, що характеризується часом запізнення τ_0 . Друга ланка – обчислювальна і вона може бути представлена безінерційною ланкою. Третя ланка по своїм властивостям є інерційною ланкою, що характеризується постійною часу τ_1 .

Таким чином діяльність людини-оператора в першому наближенні описується передаточною функцією виду

$$W(p) = K_0 \exp(-p\tau_0)(\tau_1 p + 1)^{-1}, \quad (5.18)$$

де K_0 – коефіцієнт передачі.

Такий підхід є загальним [77,79,80] і кожний конкретний випадок використання людини-оператора потребує визначення параметрів передаточної функції (5.18) [81, 82]. Стосовно до параметрів K_0, τ_0 та τ_1

людини-оператора мобільної пожежної установки [75], то вони визначаються згідно до алгоритму, який наведено в [80,83].

Згідно із цим алгоритмом на людину-оператора мобільної пожежної установки здійснюється вплив, який описується виразом

$$x(t) = A \cdot 1(t), \quad (5.19)$$

де $A = \text{const}$; $1(t)$ – функція Хевісайда.

Реакція людини-оператора на такий вплив буде мати вигляд

$$z(t) = L^{-1}[W(p)X(p)] = AK \left[1 - \exp\left(-\frac{t - \tau_0}{\tau_1}\right) \right]. \quad (5.20)$$

Для моментів часу t_1 та t_2 , причому $t_2 > t_1$, можна записати

$$t_1 = \tau_1 - \tau_0 \ln(1 - z_1); \quad (5.21)$$

$$t_2 = \tau_1 - \tau_0 \ln(1 - z_2), \quad (5.22)$$

де $z_i = z(t_i)$, $i = 1, 2$.

Після об'єднання (5.21) та (5.22) одержимо вирази для часових параметрів τ_0 та τ_1 , які мають вигляд

$$\tau_0 = [\ln(1 - z_1) - \ln(1 - z_2)]^{-1}(t_2 - t_1); \quad (5.23)$$

$$\tau_1 = [\ln(1 - z_1) - \ln(1 - z_2)]^{-1}[t_2 \ln(1 - z_1) - t_1 \ln(1 - z_2)], \quad (5.24)$$

Для визначення цих параметрів проводився експеримент. Вхідний вплив, який сприймався зоровим аналізатором оператора мобільної пожежної установки, створювався за допомогою інтерактивної дошки [84], на якій по команді від ноутбука формувалася осередок горіння. Процес появи такого осередку горіння на інтерактивній дошці формалізувався функцією Хевісайда.

Реакція оператора на такий вплив визначалась по вихідному сигналу потенціометра, механічно зв'язаного із ручкою управління, яка має один кутовий струміль свободи [74, 75]. Електричний сигнал із виходу потенціометра подавався паралельно на два компаратори [81], що виконані на підсилювачах постійного струму К140УД13, в ланцюг зворотного зв'язку яких включені діод та стабілітрон. На один компаратор подавалась опорна електрична напруга, яка дорівнювала $0,2\text{ Е}$, а на другий – $0,5\text{ Е}$, де Е – електрична напруга, величина якої обиралась $6,0\text{ В}$.

При появі на інтерактивній дошці осередку горіння оператор із максимальною швидкістю здійснював поворот ручки управління, що механічно пов'язана із потенціометром. При цьому, на виході першого компаратора формувалася прямокутний імпульс тривалості t_1 , а на виході другого компаратора – прямокутний імпульс тривалості t_2 . Ці інтервали часу вимірювались за допомогою частотомірів 43-64/1.

Для проведення експерименту заохочувалось $m = 12$ людей, у яких був відсутній досвід роботи із таким обладнанням. З кожним оператором проводилось $n = 16$ експериментів. За результатами експериментів були сформовані дві матриці, кожна розміром $m \times n$. Стовбцями цих матриць є результати вимірювань параметрів t_1 або t_2 в i -му експерименті всіма операторами, а строками матриць служать результати вимірювань параметрів t_1 або t_2 j -го оператора для всіх n -експериментів. В табл. 5.2 наведені

значення параметрів t_1 , а в табл 5.3 – значення параметрів t_2 , одержаних при проведенні таких експериментів.

За результатами вимірювань визначились математичні очікування t_{1j} та t_{2j} , для кожного із n -операторів

$$t_{1j} = n^{-1} \sum_{i=1}^n t_{1i}; \quad t_{2j} = n^{-1} \sum_{i=1}^n t_{2i}, \quad (5.25)$$

а потім – математичні очікування t_{10} та t_{20} для всіх m -операторів

$$t_{10} = m^{-1} \sum_{j=1}^m t_{1j}; \quad t_{20} = m^{-1} \sum_{j=1}^m t_{2j}. \quad (5.26)$$

За результатами експериментів були одержані значення

$$t_{10} = 0,31 \text{ с}; \quad t_{20} = 0,41 \text{ с}. \quad (5.27)$$

При цьому, середньоквадратичне відхилення для величин t_1 та t_2 відповідно складають $\tau_1 = 0,028 \text{ с}$ та $\tau_2 = 0,027 \text{ с}$.

Величинам параметрів (5.27) у відповідності із (5.21) ÷ (5.24) відповідають значення параметрів оператора $\tau_0 = 0,21 \text{ с}$ та $\tau_1 = 0,28 \text{ с}$ із середньоквадратичним відхиленнями $0,08 \text{ с}$ та $0,04 \text{ с}$ відповідно.

Із довірчою вірогідністю 0,95 значення параметрів τ_0 та τ_1 , знаходяться відповідно в межах

$$0,17 \text{ с} \leq \tau_0 \leq 0,25 \text{ с}; \quad 0,26 \text{ с} \leq \tau_0 \leq 0,30 \text{ с}; \quad (5.28)$$

Таблиця 5.2

Значення параметра t_1, c

$\begin{matrix} i \\ j \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0,35	0,33	0,30	0,31	0,34	0,29	0,31	0,28	0,31	0,29	0,28	0,27	0,28	0,27	0,27	0,26
2	0,33	0,33	0,31	0,32	0,33	0,29	0,31	0,30	0,31	0,29	0,29	0,28	0,30	0,29	0,28	0,27
3	0,37	0,35	0,36	0,34	0,34	0,33	0,35	0,32	0,33	0,31	0,31	0,29	0,29	0,28	0,30	0,28
4	0,36	0,35	0,35	0,34	0,35	0,32	0,31	0,32	0,33	0,30	0,31	0,29	0,31	0,30	0,29	0,29
5	0,36	0,38	0,36	0,34	0,35	0,31	0,33	0,34	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,29	0,29	0,29
6	0,38	0,36	0,35	0,34	0,35	0,33	0,33	0,31	0,32	0,31	0,30	0,30	0,28	0,27	0,28	0,28
7	0,37	0,36	0,36	0,34	0,36	0,33	0,31	0,32	0,30	0,31	0,30	0,29	0,29	0,28	0,27	0,27
8	0,36	0,34	0,34	0,35	0,32	0,33	0,31	0,33	0,31	0,30	0,31	0,30	0,29	0,30	0,29	0,29
9	0,39	0,37	0,36	0,33	0,34	0,32	0,31	0,32	0,30	0,31	0,30	0,30	0,30	0,28	0,29	0,28
10	0,34	0,35	0,33	0,34	0,32	0,30	0,31	0,33	0,30	0,30	0,29	0,29	0,28	0,27	0,27	0,26
11	0,35	0,36	0,32	0,34	0,33	0,34	0,32	0,32	0,31	0,30	0,29	0,29	0,28	0,26	0,27	0,27

12	0,36	0,38	0,37	0,35	0,34	0,34	0,33	0,34	0,32	0,31	0,30	0,30	0,27	0,26	0,26	0,26
----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Таблица 5.3

Значения параметра t_2, c

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0,45	0,43	0,43	0,41	0,43	0,42	0,40	0,41	0,39	0,39	0,38	0,38	0,37	0,36	0,36	0,36
2	0,47	0,44	0,43	0,44	0,42	0,41	0,43	0,41	0,40	0,40	0,39	0,39	0,39	0,38	0,38	0,37
3	0,48	0,46	0,47	0,45	0,44	0,44	0,42	0,43	0,41	0,41	0,40	0,40	0,39	0,39	0,38	0,38
4	0,45	0,44	0,44	0,42	0,43	0,41	0,41	0,40	0,42	0,40	0,40	0,39	0,38	0,38	0,37	0,37
5	0,46	0,45	0,45	0,43	0,44	0,42	0,42	0,46	0,40	0,41	0,40	0,40	0,38	0,39	0,38	0,37
6	0,49	0,46	0,45	0,45	0,42	0,41	0,42	0,41	0,40	0,40	0,39	0,40	0,37	0,37	0,36	0,37
7	0,46	0,44	0,44	0,42	0,41	0,41	0,42	0,41	0,40	0,40	0,40	0,39	0,37	0,36	0,36	0,37
8	0,47	0,40	0,43	0,43	0,42	0,43	0,42	0,41	0,41	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,37
9	0,49	0,47	0,46	0,43	0,43	0,44	0,41	0,42	0,41	0,40	0,40	0,40	0,38	0,38	0,37	0,36
10	0,48	0,46	0,45	0,45	0,44	0,43	0,42	0,43	0,41	0,41	0,40	0,40	0,37	0,37	0,36	0,36

11	0,47	0,46	0,45	0,44	0,43	0,42	0,42	0,41	0,41	0,40	0,40	0,39	0,36	0,37	0,36	0,37
12	0,46	0,44	0,43	0,43	0,42	0,40	0,41	0,40	0,40	0,39	0,39	0,36	0,36	0,38	0,37	0,36

Для визначення величини параметра K_0 використовувалось імперичне співвідношення[77]

$$K_0 = 9\tau_1, \quad (5.29)$$

що приводить до того, що $K_0 = 2.34 \div 2.97$.

На рис. 5.8 та рис. 5.9 наведені області існування параметрів t_1 та t_2 відповідно.

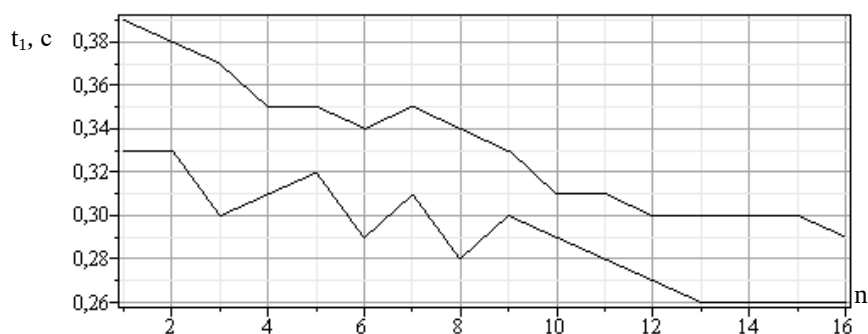


Рис. 5.8. Область існування параметра t_1

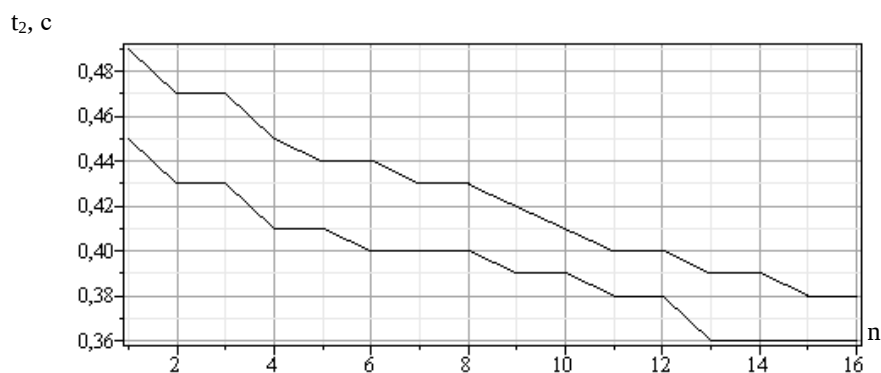


Рис. 5.9. Область існування параметра t_2

Аналіз цих залежностей свідчить, що із зростанням числа експериментів має місце тенденція до зменшення значень цих параметрів. Така тенденція обумовлена зростанням ступеня тренуваності операторів. Починаючи із 12-го експерименту, має місце стабілізація значень параметрів t_1 та t_2 . Середні значення цих параметрів асимптотично наближаються відповідно до величин 0,28 с та 0,37 с. Цим значенням відповідно до виразів (5.23) та (5.24) будуть відповідати мінімальні величини параметрів оператора мобільної пожежної установки $\tau_{0\min} = 0,19$ та $\tau_{1\min} = 0,23$ с.

Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) оператора мобільної пожежної установки згідно (5.18) описується виразом

$$W_0(j\omega) = K_0 \exp(-j\omega\tau_0)(1 + j\omega\tau_1)^{-1}, \quad (5.30)$$

а її графічна інтерпретація при $\tau_0 = 0,2$ с та $\tau_1 = 0,3$ с для $K_0 = 2,4$ та $K = 3,0$ наведена на рис. 5.10. Залежності наведені для $\omega \leq 10,0$ с⁻¹.

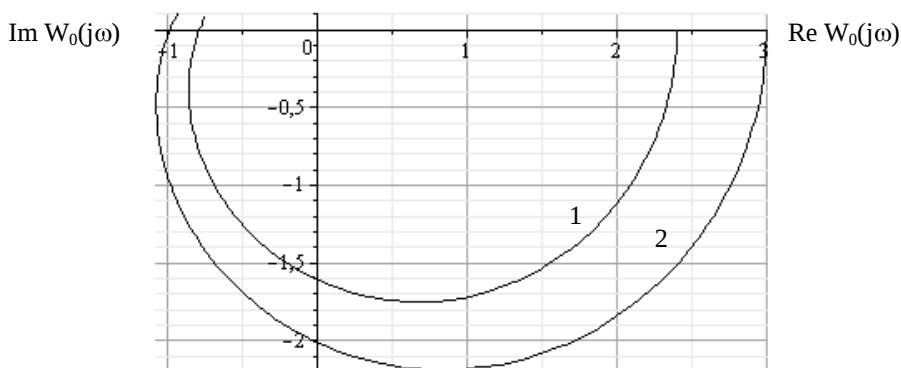


Рис. 5.10. АФЧХ оператора мобільної пожежної установки: 1 – $K_0 = 2,4$; 2 – $K = 3,0$.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) оператора мобільної пожежної установки має вираз

$$A_0(\omega) = \text{mod } W_0(j\omega) = K_0 (1 + \omega^2 \tau_1^2)^{-0.5}, \quad (5.31)$$

а її графічні інтерпретації наведені на рис. 5.11 (при $\tau_1 = 0,3$ с).

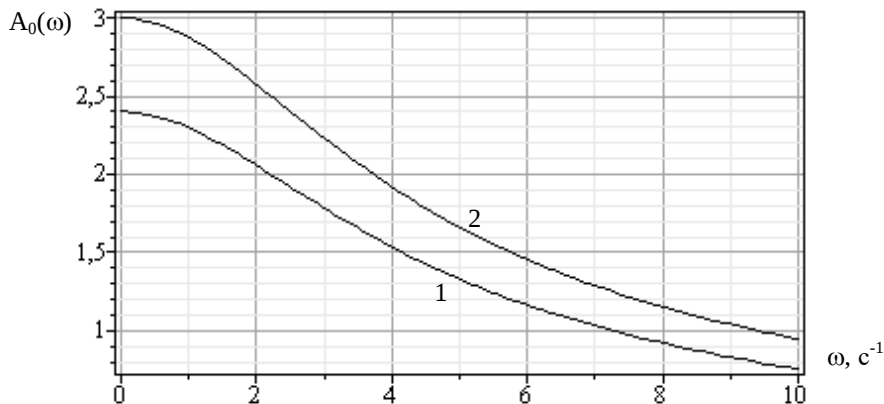


Рис. 5.11. АЧХ оператора мобільної пожежної установки: 1 – $K_0 = 2,4$; 2 – $K = 3,0$.

Для фазово-частотної характеристики (ФЧХ) оператора мобільної пожежної установки має місце залежність

$$\varphi_0(\omega) = -\omega \tau_0 - \arctg \omega \tau_1. \quad (5.32)$$

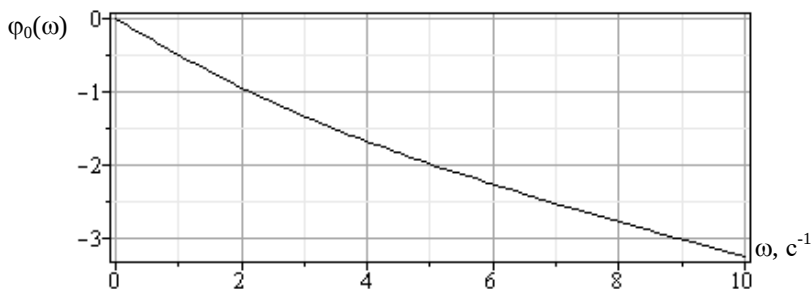


Рис. 5.12. ФЧХ оператора мобільної пожежної установки

Графік залежності $\varphi_0(\omega)$ для $\tau_0 = 0,2$ с та $\tau_1 = 0,3$ с наведено на рис. 5.12.

5.4. Параметри системи управління кутовим положенням форсунки

Управління кутовим положенням форсунки здійснюється відповідно до схеми, структура якої наведена на рис.5.8.

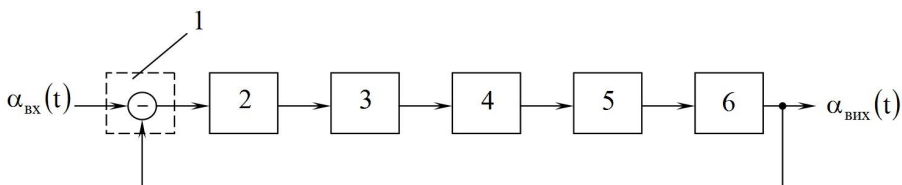


Рис. 5.13. Схема системи управління форсункою: 1 – візуальний пристрій; 2 – людина-оператор; 3 – перетворювач; 4 – підсилювач потужності; 5 – електричний двигун; 6 – редуктор

Передаточна функція розімкнутого ланцюга для такої схеми має вигляд [43]

$$W(p) = W_0(p) \exp(-p\tau_0), \quad (5.33)$$

де τ_0 – час запізнення людини-оператора; $W_0(p)$ – передаточна функція граничної системи, яка має опис

$$W_0(p) = K[p(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1)]^{-1}. \quad (5.34)$$

В цьому виразі τ_1 – постійна часу людини оператора; τ_2 – постійна часу електричного двигуна; K – коефіцієнт передачі граничної системи

$$K = \prod_{i=2}^6 K_i; \quad (5.35)$$

K_i – коефіцієнт передачі i -го елемента системи.

Величини параметрів τ_0 та τ_1 визначені експериментально і наведені в [81]. В подальшому будемо вважати, що $\tau_0 = 0,2$ с та $\tau_1 = 0,3$ с.

Для вибору параметрів τ_2 та K скористаємося критерієм Найквіста [82], згідно до якого, система, схема якої наведена на рис. 5.13, знаходиться на межі стійкості при виконанні умови

$$W(j\omega_0) = W_0(j\omega_0) \exp(-j\omega_0 \tau_0) = -1, \quad (5.36)$$

де ω_0 – граничне значення кругової частоти; j – уявна одиниця.

Умова (5.36) еквівалентна двом умовам

$$\begin{aligned} \operatorname{mod} W(j\omega_0) &= A(\omega_0) = \operatorname{mod} W_0(j\omega_0) = A_0(\omega_0) = 1; \\ \arg W(j\omega_0) &= \arg W_0(j\omega_0) - \omega_0 \tau_0 = -\tau, \end{aligned} \quad (5.37)$$

де $A(\omega_0), A_0(\omega_0)$ – значення амплітудно-частотних характеристик відповідно розімкнутої та граничної систем на частоті ω_0 .

Із другої умови (5.37) витікає, що

$$\tau_0 = (\pi - \varphi) \omega_0^{-1}, \quad (5.38)$$

де $\varphi = -\arg W_0(j\omega_0)$.

Для передаточної функції $W_0(p)$, яка описується виразом (5.34), має місце

$$\text{mod } W_0(j\omega) = A_0(\omega) = K \left[\omega \left[(1 + \omega^2 \tau_1^2) (1 + \omega^2 \tau_2^2) \right]^{0,5} \right]^{-1}; \quad (5.39)$$

$$\arg W_0(j\omega) = - \left[\frac{\pi}{2} + \arctg \omega \tau_1 + \arctg \omega \tau_2 \right]. \quad (5.40)$$

Якщо врахувати (5.39), то перша умова (5.37) буде трансформована до вигляду

$$\omega_0 \left[\tau_1^2 \tau_2^2 \omega_0^4 + (\tau_1^2 + \tau_2^2) \omega_0^2 + 1 \right]^{0,5} = K, \quad (5.41)$$

а вираз (5.38) за умови (5.40) – до вигляду

$$\frac{\pi}{2} - \arctg \omega_0 \tau_1 - \arctg \omega_0 \tau_2 = \omega_0 \tau_0. \quad (5.42)$$

Із (5.42) витікає, що

$$\arctg \omega_0 \tau_2 = \frac{\pi}{2} - \arctg \omega_0 \tau_1 - \omega_0 \tau_0. \quad (5.43)$$

На рис. 5.14 наведені графічні залежності для $f_1(\omega)$ та $f_2(\omega)$ при $\tau_2 = \text{const}$, де $\tau_2 = (0,1 \div 1,0)\text{с}$.

Ці залежності описуються виразами

$$f_1(\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctg \omega \tau_1 - \omega \tau_0; \quad (5.44)$$

$$f_2(\omega) = \arctg \omega \tau_2. \quad (5.45)$$

$f_1(\omega), f_2(\omega)$

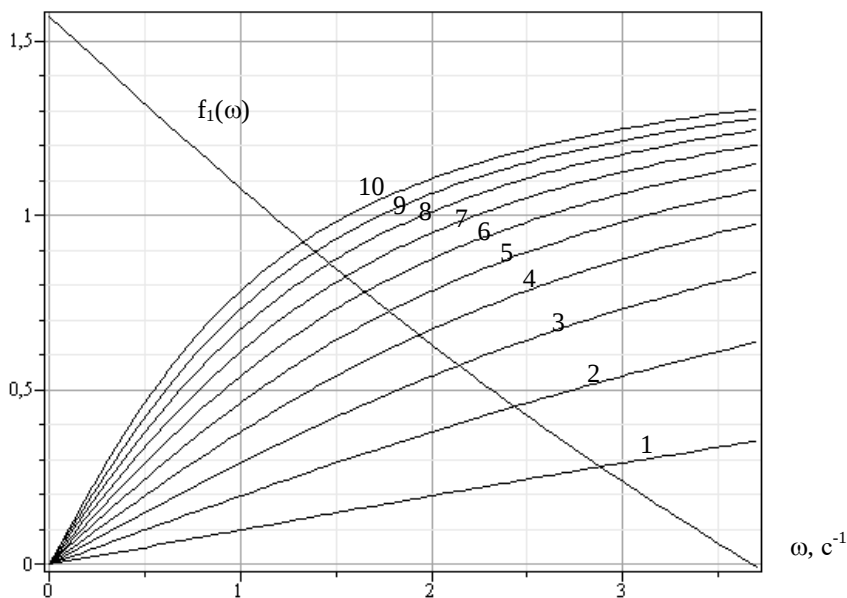


Рис. 5.14. Залежності $f_1(\omega)$ та $f_2(\omega)$ при $\tau_2 = \text{const}$: 1 – $\tau_2 = 0,1$ с; 2 – $\tau_2 = 0,2$ с; 3 – $\tau_2 = 0,3$ с; 4 – $\tau_2 = 0,4$ с; 5 – $\tau_2 = 0,5$ с; 6 – $\tau_2 = 0,6$ с; 7 – $\tau_2 = 0,7$ с; 8 – $\tau_2 = 0,8$ с; 9 – $\tau_2 = 0,9$ с; 10 – $\tau_2 = 1,0$ с.

Залежності $1 \div 10$ описуються виразом (5.45) при $\tau_2 = (0,1 \div 1,0)$ с. Точкам перетинання залежностей $f_1(\omega)$ та $f_2(\omega)$ при $\tau_2 = \text{const}$ відповідають граничні значення частот ω_0 , тобто рішення рівняння (5.43).

В табл. 5.4. наведені значення граничних частот ω_0 , які визначені таким чином.

Таблиця 5.4

Значення граничних частот

$\tau_2, \text{с}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\omega_0, \text{с}^{-1}$	3,01	2,49	2,18	1,95	1,79	1,66	1,56	1,47	1,40	1,33

Із використанням пакету Maple можна представити залежність $\omega_0 = f(\tau_2)$ у вигляді

$$\omega_0 = f(\tau_2) = \sum_{i=0}^9 a_i \tau_2^i, \quad (5.46)$$

де a_i – коефіцієнти поліному, величини яких наведені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Величини коефіцієнтів a_i

i	0	1	2	3	4
a_i	6,35	-76,86	722,11	-3951,12	13211,25
i	5	6	7	8	9
a_i	-27948,44	37585,33	-31135,91	14484,13	-2893,52

На рис. 5.15. наведена графічна залежність (5.46) для величин параметрів a_i , які приведені в табл.5.5.

$\omega_0, \text{с}^{-1}$

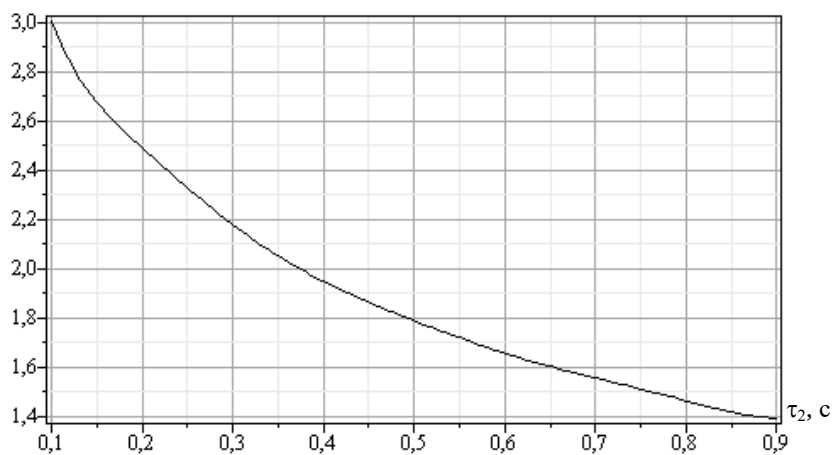


Рис. 5.15. Залежність $\omega_0 = f(\tau_2)$

На рис.5.16 представлені залежності $K = f(\omega_0)$ для $\tau_2 = \text{const}$, які визначаються виразом (5.41).

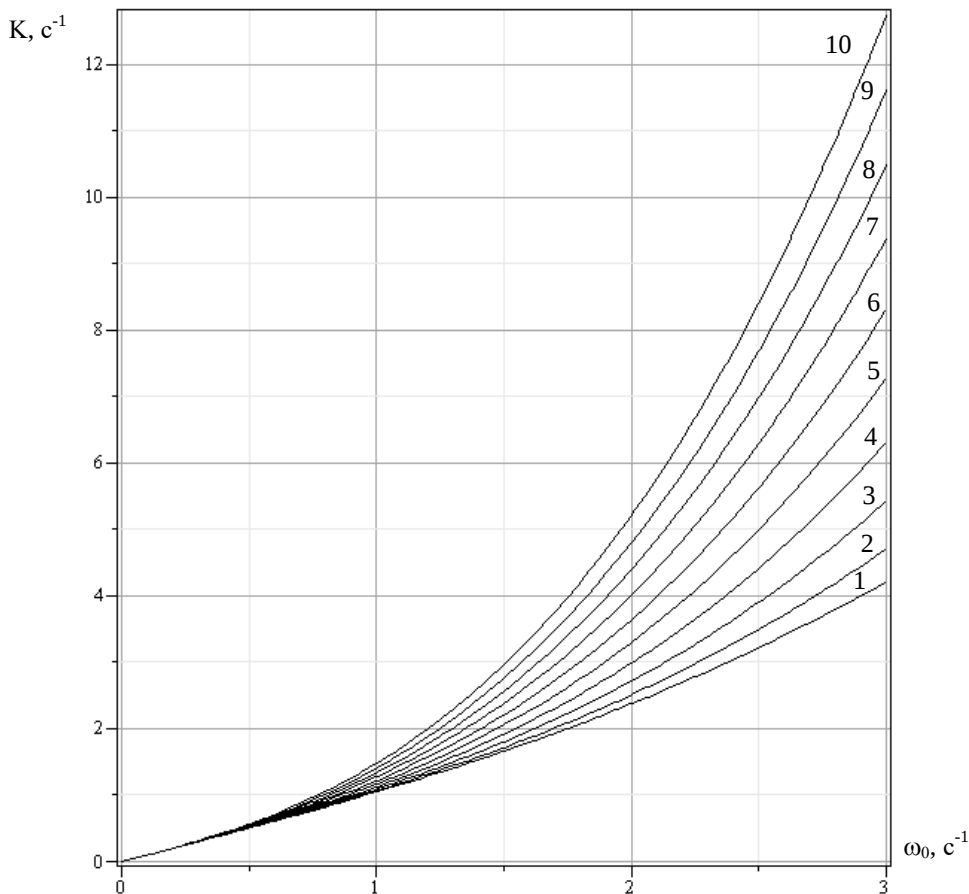


Рис. 5.16. Залежності $K = f(\omega_0)$ при $\tau_2 = \text{const}$: 1 – $\tau_2 = 0,1$ с; 2 – $\tau_2 = 0,2$ с; 3 – $\tau_2 = 0,3$ с; 4 – $\tau_2 = 0,4$ с; 5 – $\tau_2 = 0,5$ с; 6 – $\tau_2 = 0,6$ с; 7 – $\tau_2 = 0,7$ с; 8 – $\tau_2 = 0,8$ с; 9 – $\tau_2 = 0,9$ с; 10 – $\tau_2 = 1,0$ с.

Графічні залежності, наведені на рис. 5.15 та рис. 5.16, є номограми для визначення граничних значень параметрів ω_0 та K при апріорі заданій величині параметра τ_2 , а також при $\tau_0 = 0,2$ с та $\tau_1 = 0,3$ с. Алгоритм їх визначення зводиться до виконання наступних процедур:

– при апріорі заданому значенні параметра τ_2 за допомогою графічної залежності $\omega_0 = f(\tau_2)$, наведеній на рис. 5.15, визначається величина граничної частоти ω_0 ;

- за допомогою номограми, наведеній на рис. 5.16, по заданим значенням параметрів τ_2 та ω_0 визначається величина граничного коефіцієнта передачі K .

Приклад. Для величини постійної часу $\tau_2 = 0,6$ с визначити граничні значення частоти ω_0 та коефіцієнта передачі K .

Величині $\tau_2 = 0,6$ с відповідно до рис. 5.15 відповідає значення частоти ω_0 , що дорівнює $1,7 \text{ с}^{-1}$. Відповідно до рис. 5.16 таким величинам параметрів τ_2 та ω_0 буде відповідати $K \cong 2,6 \text{ с}^{-1}$.

Раніше вибір параметрів τ_2 та K проводився за умови забезпечення стійкості системи управління кутовим положенням форсунки. З цією метою використовувався критерій Найквіста [83]. Остаточне рішення стосовно величин параметрів τ_2 та K повинно прийматись з урахуванням показників якості такої системи, зокрема, з урахуванням характеру перехідного процесу, часу перехідного процесу та перерегулювання.

Для оцінки якості системи управління кутовим положенням форсунки скористаємося дійсною частотною характеристикою (ДЧХ) такої системи [90].

Передаюча функція системи управління, схема якої наведена на рис. 5.13 описується виразом

$$W_3(p) = W(p)[1 + W(p)]^{-1}, \quad (5.47)$$

де $W(p)$ – передаюча функція розімкненої системи, яка визначається виразом (5.33).

Після підстановки (5.33) в (5.47) одержимо

$$W_3(p) = K \exp(-p\tau_0) [p(\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1) + K \exp(-p\tau_0)]^{-1}. \quad (5.48)$$

Для амплітудно-фазової частотної характеристики (АФЧХ) системи буде мати місце вираз

$$W_3(j\omega) = K \exp(-j\omega\tau_0) [j\omega(1 + j\omega\tau_1)(1 + j\omega\tau_2) + K \exp(-j\omega\tau_0)]^{-1}, \quad (5.49)$$

який із урахуванням співвідношення [36]

$$\exp(-j\omega\tau_0) = \cos \omega\tau_0 - j \sin \omega\tau_0 \quad (5.50)$$

буде трансформовано до вигляду

$$W_3(j\omega) = M(\omega) + jN(\omega), \quad (5.51)$$

де $M(\omega), N(\omega)$ – дійсна частотна характеристика та уявна частотна характеристика (УЧХ) системи відповідно.

Частотні характеристики $M(\omega)$ та $N(\omega)$ описуються виразами

$$M(\omega) = K [\cos \omega\tau_0 (K \cos \omega\tau_0 - \omega^2 (\tau_1 + \tau_2)) - \sin \omega\tau_0 (\omega - \tau_1 \tau_2 \omega^3 - K \sin \omega\tau_0)] \times \\ \times [(K \cos \omega\tau_0 - \omega^2 (\tau_1 + \tau_2))^2 + (\omega - \tau_1 \tau_2 \omega^3 - K \sin \omega\tau_0)^2]^{-1}; \quad (5.52)$$

$$N(\omega) = \\ = -K [\sin \omega\tau_0 (K \cos \omega\tau_0 - \omega^2 (\tau_1 + \tau_2)) - \cos \omega\tau_0 (\omega - \tau_1 \tau_2 \omega^3 - K \sin \omega\tau_0)] \times \\ \times [(K \cos \omega\tau_0 - \omega^2 (\tau_1 + \tau_2))^2 + (\omega - \tau_1 \tau_2 \omega^3 - K \sin \omega\tau_0)^2]^{-1}. \quad (5.53)$$

Для ефективної роботи системи управління кутовим положенням форсунки доцільно, щоб перехідний процес мав монотонний характер. З цією метою необхідно, щоб виконувались умови [49]

$$\begin{aligned} M(0) &\geq |M(\omega)|; \\ \omega_{\Pi} M(0) &\geq 2 \int_0^{\infty} |M(\omega)| d\omega; \\ M(0) \cos \left[\pi \left(1 + \omega_{\Pi} \omega^{-1} \right)^{-1} \right] &\geq M(\omega), \end{aligned} \quad (5.54)$$

де ω_{Π} – полоса пропускання системи.

Між вихідним сигналом $\alpha_{\text{вих}}(t)$ системи управління кутовим положенням форсунки та ДЧХ $M(\omega)$ існує залежність [84]

$$\alpha_{\text{вих}}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} M(\omega) \omega^{-1} \sin \omega t d\omega, \quad (5.55)$$

яку для функції $M(\omega)$, що не зростає на інтервалі $0 \div \omega_{\Pi}$, можна представити у вигляді знакозмінного ряду, який сходиться,

$$\alpha_{\text{вих}}(t) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \int_{\frac{\pi n}{t}}^{\frac{\pi(n+1)}{t}} M(\omega) \omega^{-1} \sin \omega t d\omega. \quad (5.56)$$

Для такого ряду має місце обмеження [50]

$$\alpha_{\text{вих}}(t) \leq \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{t}} M(\omega) \omega^{-1} \sin \omega t d\omega, \quad (5.57)$$

яке можна підсилити, якщо замість функції $M(\omega)$ скористатись її значенням при $\omega = 0$, тобто $M(0)$. В цьому випадку вираз (5.57) приймає вигляд

$$\alpha_{\text{вих}}(t) \leq \frac{2}{\pi} M(0) \int_0^t \omega^{-1} \sin \omega t d\omega. \quad (5.58)$$

Якщо врахувати, що $y = \omega t$, то вираз (5.58) трансформується наступним чином

$$\alpha_{\text{вих}}(t) \leq \frac{2}{\pi} M(0) \int_0^\pi y^{-1} \sin y dy. \quad (5.59)$$

Внаслідок того, що [85]

$$\int_0^\pi y^{-1} \sin y dy = \text{Si}(\pi) = 1,85, \quad (5.60)$$

вираз (5.59) приймає вигляд

$$\alpha_{\text{вих}}(t) \leq \frac{3,7}{\pi} M(0) = \frac{3,7}{\pi} \alpha_{\text{уст}}. \quad (5.61)$$

Тоді у відповідності із визначенням перерегулювання σ можна записати [49]

$$\sigma = [\alpha_{\text{вих}}(t) - \alpha_{\text{уст}}] \alpha_{\text{уст}}^{-1} \cdot 100\% \leq 18,0\%, \quad (5.62)$$

звідки витікає, що максимальне значення перерегулювання в системі управління кутовим положенням форсунки при ДЧХ, яка не зростає, не перевищує 18,0 %.

Для визначення часу перехідного процесу t_n скористаємося методом, який оснований на апроксимації ДЧХ $M(\omega)$ трапецеїдальною функцією [49]. При такій апроксимації характерними параметрами є частоти ω_1 та ω_2 (рис. 5.17). Відношенням цих частот $\beta = \omega_1 \omega_2^{-1}$ є аргумент функції $t_n \omega_2$, графік якої наведено на рис. 5.18.

Алгоритм визначення часу перехідного процесу, характер зміни якого є монотонним, а величина перерегулювання не перевищує 18,0%, зводиться до наступного:

- при фіксованих значеннях параметрів τ_2 та K у відповідності із (5.52) будується залежність $M(\omega)$;
- здійснюється перевірка виконання умов (5.54);
- якщо умови (5.54) виконуються, то здійснюється апроксимація частотної характеристики $M(\omega)$ за допомогою трапецеїдальної функції;
- визначаються параметри ω_1 та ω_2 трапецеїдальної функції;
- по величині $\beta = \omega_1 \omega_2^{-1}$ із використанням залежності $t_n \omega_2 = f(\beta)$ визначається величина часу перехідного процесу t_n .

В табл. 5.6 наведені результати визначення часу перехідного процесу t_n системи управління кутовим положенням форсунки у відповідності із наведеним алгоритмом.

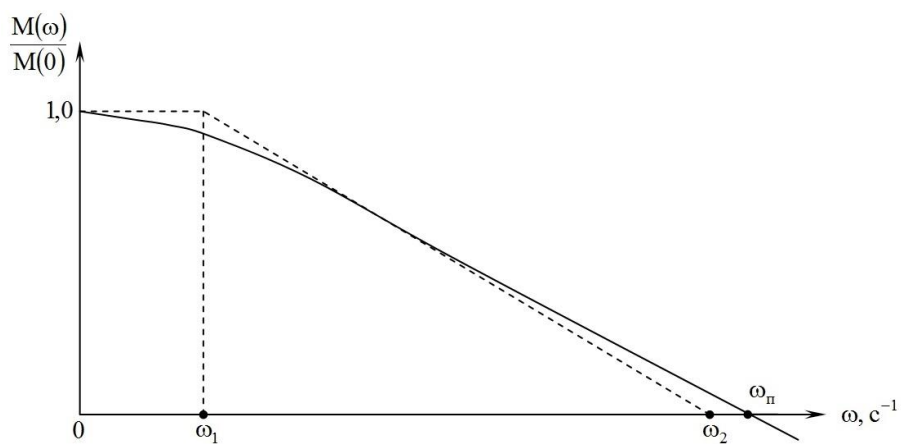


Рис. 5.17. Апроксимація ДЧХ

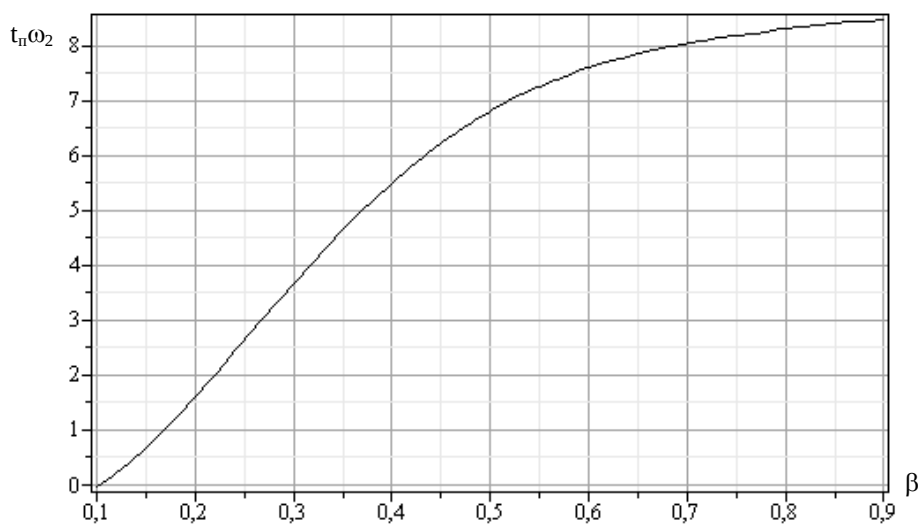


Рис. 5.18. Залежність $t_\pi \omega_2 = f(\beta)$

Аналіз цієї таблиці свідчить про те, що області найменших значень часу перехідного процесу t_{π} відповідає область, яка обмежена величинами $\tau_2 = (0,1 \div 0,4) \text{ с}$ та $K = (0,5 \div 0,9) \text{ с}^{-1}$.

Таблиця 5.6

Величина часу перехідного процесу

$\tau_2, \text{с}$	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$K, \text{с}^{-1}$	0,1	28,8	28,5	28,0	27,6	26,7
	0,3	8,7	8,3	7,8	7,1	6,5
	0,5	4,5	4,2	3,7	6,5	8,3
	0,7	2,7	2,6	5,2	5,9	
	0,9	3,4	4,0			

Мінімум часу t_{π} має місце при $\tau_2 = 0,2 \text{ с}$ та $K = 0,7 \text{ с}^{-1}$ і він дорівнює 2,6 с.

5.5. Основні експлуатаційні характеристики компактних рухомих установок на базі сігвеїв

Експлуатація мобільних пожежних установок на базі сігвеїв має особливості, які можна розділити на три групи. До першої групи належать особливості експлуатації, пов'язані із технічною реалізацією мобільних пожежних установок.

Особливістю управління рухом мобільної пожежної установки на базі сігвея є те, що воно здійснюється за рахунок зміни кута рульового стовпа. Якщо форсунка, за допомогою якої забезпечується розпил вогнегасної речовини, не має кутового ступеню свободи відносно рульового стовпа, як це має місце в [26], то виникає протиріччя між функціями управління рухом та управління подачею вогнегасної речовини до вогнища горіння. Для розв'язання цього

протиріччя в мобільній пожежній установці, схема якої наведена в [75], ці функції управління рознесені у просторі. Параметри та характеристики каналу управління кутовим положенням форсунки наведені в п. 5.4.

Час повного опорожнення ємності із вогнегасною речовиною або тривалість подачі вогнегасної речовини для мобільної пожежної установки на базі сігвею визначається виразом (5.6) і складає близько 25,0 с. Величина цього параметра може бути збільшена в 3÷4 рази за рахунок використання додаткової ємності із вогнегасною речовиною. Приклад такого технічного рішення наведено в [74].

Для підвищення ефективності використання мобільної пожежної установки може використовуватись теплозахисний екран, як це наведено на рис. 5.19 [86].

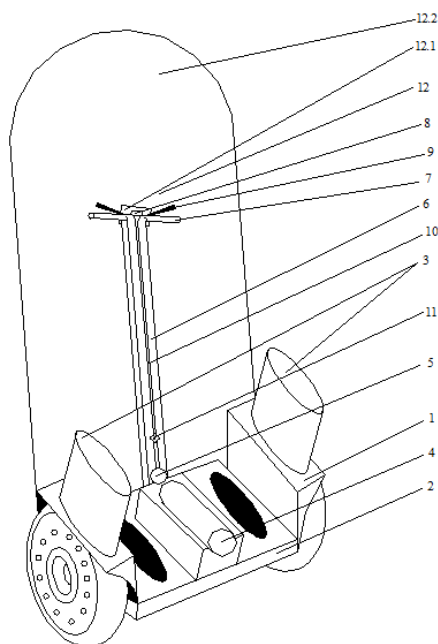


Рис. 5.19. Мобільна пожежна установка із теплозахисним екраном

На цьому рисунку зображено: 1 – крило колеса сігвея; 2 – платформа; 3 – контейнери у вигляді ємностей для вогнегасної речовини; 4 – балон зі стиснутим повітрям; 5 – редуктор; 6 – рульовий стовп; 7 – кермо; 8 – форсунка; 9 – органи управління; 10 – гнучкий шланг для гідравлічних з'єднань; 11 – вентиль; 12 – теплозахисний екран; 12.1 – отвір для форсунки; 12.2 – прозора частина теплозахисного екрану. Контейнери 3 встановлені на крилах 1 коліс сігвея, балон із стисненим повітрям 4 встановлений на платформі 2. На балоні із стисненим повітрям 4 встановлений редуктор 5, з'єднаний із балоном із стисненим повітрям 4. На рульовому стовпі 6 сігвея встановлено вентиль 11, а на кермі 7 – форсунку 8 та органи управління 9. Гнучкі шланги 10 розміщені в середині платформи 2 сігвея та в його рульовому стовпі 6 і забезпечують гідравлічне з'єднання між редуктором 5 та контейнерами 3 із вогнегасною речовиною (через вентиль 11), а також між контейнерами 3 та форсункою 8 (через органи управління 9). Теплозахисний екран 12 розміщений з фронтальної сторони сігвея.

Підвищення ефективності експлуатації мобільної пожежної установки може бути забезпечено за рахунок скорочення заміни контейнерів із вогнегасною речовиною. Приклад такого технічного рішення наведено в [87] та на рис. 5.20.

На цьому рисунку наведено: 1.1 – фіксатор; 1.2 – пружина; 1.3 – напрямні; 1.4 – отвір; 3.1 – пази зворотної форми по відношенню до напрямних 1.3; 3.2 – виступ, який має можливість входити до отвору 1.4. Для зміни контейнерів 3 підпружинений фіксатор 1.1 виводиться із контакту з виступом 3.2 контейнера і контейнер 3 по напрямних 1.3 виводиться із крила 1 коліс мобільної пожежної установки. На місце цього контейнера здійснюється установка іншого контейнера 3, який заповнений вогнегасною речовиною. Положення контейнера 3 на крилі 1 колеса мобільної пожежної установки

фіксується за допомогою підпружиненого фіксатора 1.2 внаслідок його контакту із виступом 3.2, який вводиться до отвору 1.4.

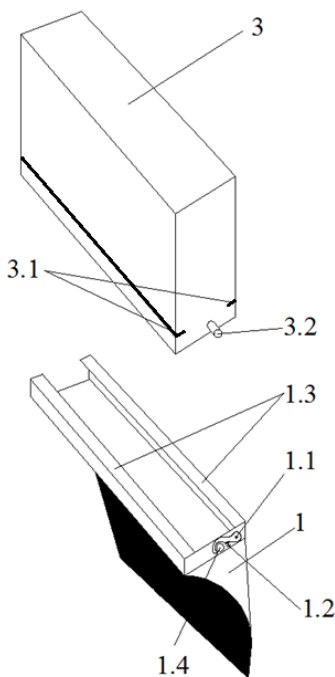


Рис. 5.20. Контейнер та крило колеса для його розміщення

Друга група особливостей експлуатації мобільних пожежних установок на базі сігвею пов'язана із наявністю людини-оператора в складі такої установки. Характеристики людини-оператора як елемента мобільної пожежної установки в режимі управління кутовим положенням форсунки визначені в п.5.3. Слід зазначити, що по мірі зростання числа експериментів має місце стабілізація часових параметрів людини-оператора. Внаслідок цього при експлуатації мобільних пожежних установок на базі сігвеїв доцільно використовувати тренажери, схеми побудови яких наведені в [84, 88].

Тренажер, схема якого наведена на рис. 5.21 [84], призначений для тренування та визначення характеристик людини-оператора в спрощеному режимі роботи.

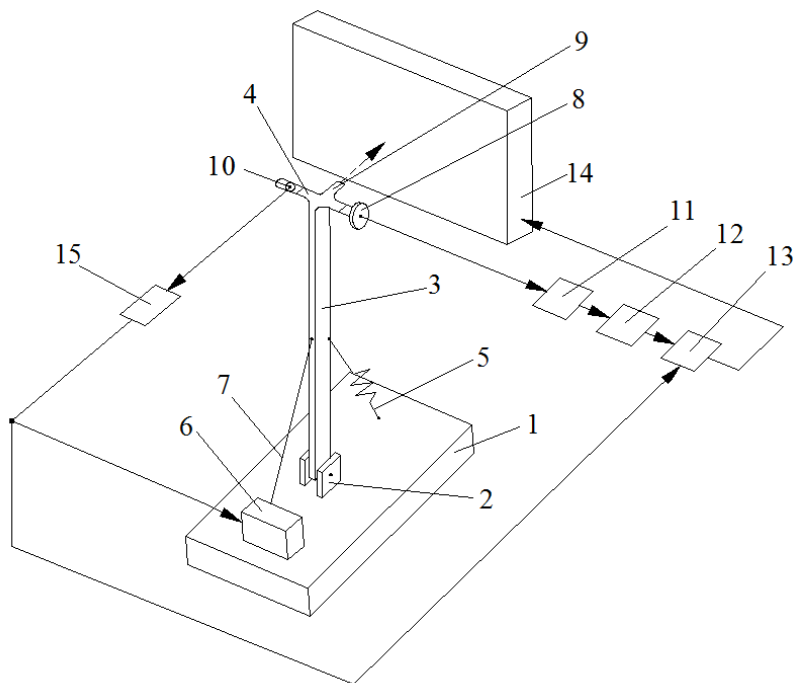


Рис. 5.21. Схема тренажера людини-оператора мобільної пожежної установки

На цій схемі зображено: 1 – платформа; 2 – кронштейни; 3 – рульовий стовп; 4 – кермо; 5 – пружина; 6 – електропривід; 7 – трос; 8 – датчик кутового положення ручки управління; 9 – датчик кутового положення рульового стовпа; 10 – кнопка ПУСК; 11 – блок вимірювань; 12 – блок обробки інформації; 13 – аналізатор; 14 – блок тестової дії; 15 – система управління. Вхід системи управління 15 з'єднаний із кнопкою ПУСК 10, яка розміщена на кермі 4, а її вихід з'єднаний із входом електропривода 6 та із другим входом аналізатора 13, перший вхід якого підключений до виходу блока обробки інформації 12. Датчик кутового положення 8 підключений до входу блока вимірювань 11,

вихід якого з'єднаний із входом блока обробки інформації 12. Вихід аналізатора 13 з'єднаний із входом блока тестової дії 14. Електропривід 6 установлений на платформі 1 і з'єднаний тросом 7 із рульовим стовпом 3. З протилежної сторони платформи 1 між рульовим стовпом 3 та платформою 1 установлена пружина 5. Рульовий стовп 3 установлений на платформі 1 за допомогою кронштейнів 2 і має один кутовий ступінь свободи (в вертикальній площині). На кермі 4 установлений датчик кутового положення 9 рульового стовпа 3, який виконаний у вигляді лазерного джерела світла. Датчик кутового положення 8 виконаний у вигляді потенціометра.

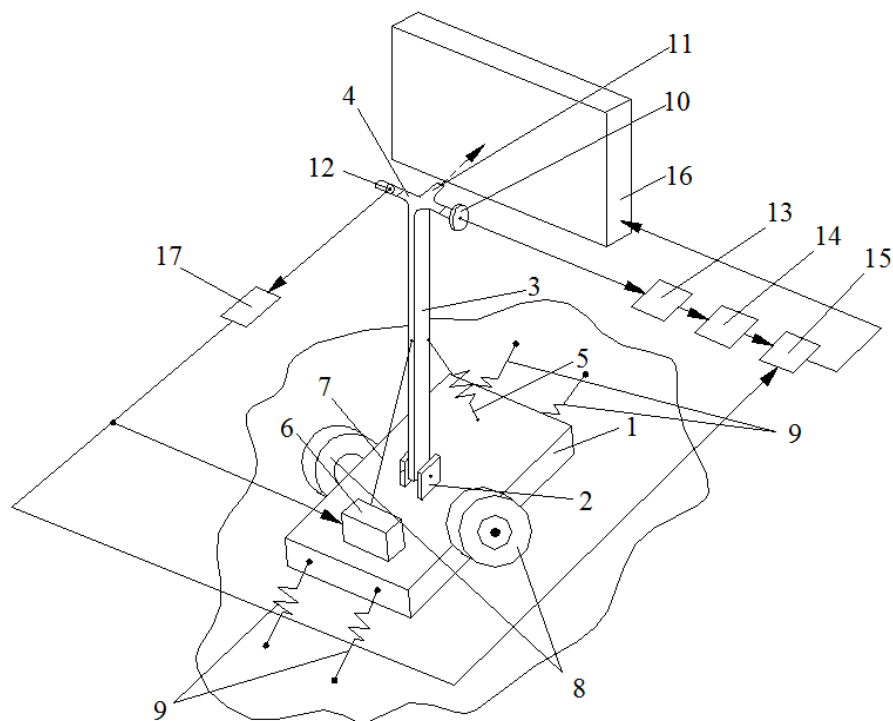


Рис. 5.22.Схема тренажера людини-оператора мобільної пожежної установки

На рис. 5.22 наведена схема тренажера згідно [88], який максимально відтворює умови роботи мобільної пожежної установки, і на якій зображено: 1 – платформа; 2 – кронштейн; 3 – рульовий стовп; 4 – кермо; 5 – пружина; 6 – електропривод; 7 – трос; 8 – колісна пара; 9 – пружини платформи; 10 – датчик кутового положення ручки управління; 11 – датчик кутового положення рульового стовпа; 12 – кнопка ПУСК; 13 – блок вимірювань; 14 – блок обробки інформації; 15 – аналізатор; 16 – блок тестової дії; 17 – система управління. Вхід системи управління 17 з'єднаний із кнопкою ПУСК 12, яка розміщена на кермі 4, а її вихід з'єднаний із входом електропривода 6 та із другим входом аналізатора 15, перший вхід якого підключений до входу блока обробки інформації 14. Датчик кутового положення 10 підключений до входу блока вимірювань 13, вихід якого з'єднаний із входом блока обробки інформації 14. Вихід аналізатора 15 з'єднаний із входом тестової дії 16. Електропривід 6 установлений на платформі 1 і з'єднаний тросом 7 із рульовим стовпом 3. З протилежної сторони платформи 1 між рульовим стовпом 3 та платформою 1 установлена пружина 5. Рульовий стовп 3 установлений на платформі 1 за допомогою кронштейна 2 і має один кутовий ступінь свободи (в вертикальній площині). На кермі 4 установлений датчик кутового положення 11 рульового стовпа. Платформа 1 установлена на колісній парі 8, причому вісь колісної пари 8 є перпендикулярною напрямку фрон-тил, вздовж якого розміщені пружини 9 платформи і які з'єднують платформу із основою.

Із використанням тренажерів, схеми яких наведені на рис. 5.21 та рис. 5.22, можуть визначатись параметри людини-оператора мобільної пожежної установки. Для цього до складу тренажерів включається пристрій, схема якого наведена на рис. 5.23 [83].

Вихід датчика 3 з'єднаний із першими входами компараторів 6,7, другі входи яких підключені до джерела опорної електричної напруги U_1 та U_2 . Виходи компараторів 6,7 через елементи НІ 9,10 з'єднані із другими входами

відповідних елементів І 12,13, перші входи яких з'єднані із виходом генератора імпульсів 8, а їх треті входи з'єднані із виходом RS тригера. Виходи елементів І 12,13 через лічильники імпульсів 14,15 з'єднані із відповідними входами аналізатора 5.

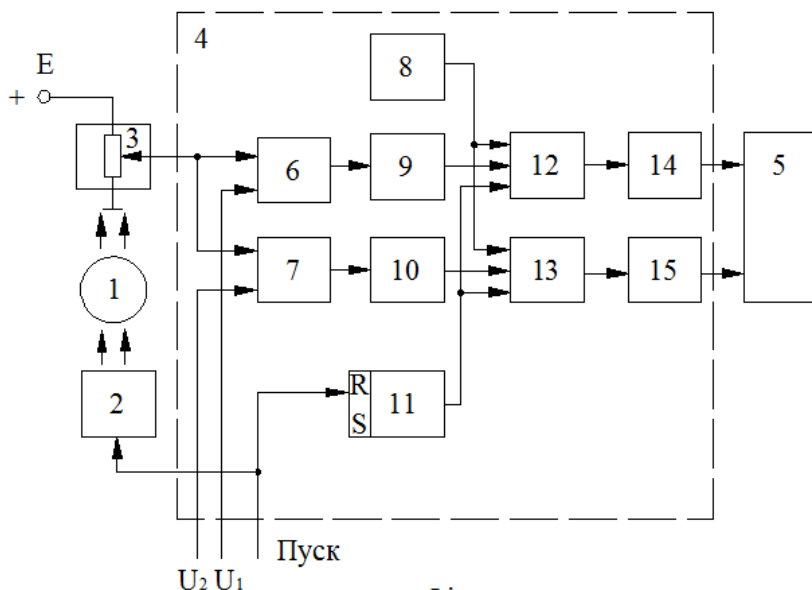


Рис. 5.23. Схема пристрою для визначення параметрів людини-оператора, на якій зображено: 1 – оператор мобільної пожежної установки; 2 – блок тест-впливу; 3 – датчик; 4 – блок обробки інформації; 5 – аналізатор; 6,7 – компаратори; 8 – генератор імпульсів; 9,10 – елементи ІІ; 11 – RS тригер; 12 – елементи І; 14,15 – лічильники імпульсів.

Пристрій працює наступним чином. По команді ПУСК блок тест-впливу 2 задає оператору 1 мобільної пожежної установки тест-інформацію, реакція якого за допомогою датчика 3 перетворюється в електричний сигнал. Цей сигнал, величина якого в режимі, що встановився, дорівнює E , подається на входи компараторів 6,7. На другі входи цих компараторів подаються сигнали

U_1 та U_2 від джерела електричної напруги, величини яких пов'язані із величиною E наступним чином

$$U_1 = K_1 E; \quad U_2 = K_2 E; \quad K_2 > K_1; \quad 0 < K_i < 1, \quad i = 1, 2. \quad (5.63)$$

Одночасно з цим RS тригер 11 дозволяє проходженню електричних імпульсів від генератора імпульсів 8 через елементи І 12,13 на входи лічильників імпульсів 14, 15.

При досягненні сигналу, який поступає від датчика 3, рівня $U_1 = K_1 E$ на другому вході елемента І 12 буде відсутній сигнал, внаслідок чого на виході лічильника імпульсів 14 буде мати місце сигнал, який несе інформацію стосовно досягнення t_1 рівня $U_1 = K_1 E$. При досягненні сигналу від датчика 3 рівня $U_2 = K_2 E$ на другому вході елемента І 13 буде відсутній сигнал, внаслідок чого на виході лічильника імпульсів 15 буде сформований сигнал, який несе інформацію стосовно часу досягнення t_2 рівня $U_2 = K_2 E$. Сигнали з виходів лічильників 14,15 поступають на входи аналізатора 5, де визначаються величини часу запізнення τ оператора мобільного пожежного робота та його постійна часу τ_0 . Для їх визначення використовуються алгоритми

$$\tau_0 = a(t_2 - t_1); \quad \tau = a(b_1 t_2 - b_2 t_1); \quad (5.64)$$

де

$$a = [\ln(1 - K_1) - \ln(1 - K_2)]^{-1}; \quad b_1 = \ln(1 - K_1); \quad b_2 = \ln(1 - K_2). \quad (5.65)$$

Вирази (5.64) витікають із того, що передаточна функція оператора мобільного пожежного робота має вигляд (5.18).

Тренажери також можуть використовуватись для здійснення контролю діяльності оператора мобільної установки [89].

Для здійснення контролю діяльності оператора мобільної пожежної установки формують параметри тест-впливу. Такими параметрами є амплітуда A та тривалість T імпульсу, який описується виразом

$$z(t) = A(1(t) - 1(t - T)), \quad (5.66)$$

де $1(t), 1(t - T)$ – функції Хевісайда.

Амплітуда A характеризує положення зображення вогнища загоряння, наприклад, на екрані інтерактивної дошки. Параметр T характеризує час, на протязі якого діє тест-вплив на оператора. Величини цих параметрів задають апіорі.

Після формування (визначення) параметрів A і T формують зображення вогнища загоряння на протязі фіксованого інтервалу часу, після чого стрибкоподібно змінюють положення цього вогнища по одній із координат (на екрані інтерактивної дошки).

Через інтервал часу, який дорівнює T , стрибкоподібно повертають зображення вогнища загоряння в початкове положення.

Такі стрибкоподібні зміни положення вогнища загоряння еквівалентні дії тест-впливу у вигляді імпульсу, амплітуда якого дорівнює A .

Реакція оператора мобільної пожежної установки буде мати вигляд сигналу, який має опис

$$i(t) = L^{-1}[W(p)Z(p)], \quad (5.67)$$

де $W(p)$ – передаточна функція оператора мобільної пожежної установки; $Z(p)$ – зображення по Лапласу тест-впливу (5.66).

Передаюча функція $W(p)$ описується виразом (5.18).

Для $Z(p)$ має місце

$$Z(p) = Ap^{-1}[1 - \exp(-pT)], \quad (5.68)$$

Після об'єднання (5.18), (5.67) та (5.68) для сигналу, який характеризує реакцію оператора мобільної пожежної установки, буде мати місце вираз

$$\begin{aligned} i(t) &= L^{-1} \left[KA[p(\tau_1 p + 1)]^{-1} [\exp(-p\tau_0) - \exp[-p(\tau_0 + T)]] \right] = \\ &= KA \left[1 - \exp[-(t - \tau_0)\tau_1^{-1}] \right] l(t - \tau_0) - \left[1 - \exp[-(t - \tau_0 - T)\tau_1^{-1}] \right] l(t - \tau_0 - T). \end{aligned} \quad (5.69)$$

При досягненні сигналу $i(t)$ рівня $0,5KA$, що складає половину максимального рівня цього сигналу, вимірюють час t_1 . Для цього часу можна записати

$$i(t_1) = 0,5KA = KA \left[1 - \exp[-(t_1 - \tau_0)\tau_1^{-1}] \right] \quad (5.70)$$

Після стрибкоподібного повернення зображення вогнища загоряння (через інтервал часу T) в початкове положення вимірюють час досягнення t_2 сигналу $i(t)$ рівня $0,5KA$. В цей момент часу буде мати місце

$$i(t_2) = -0,5KA = -KA \left[1 - \exp[-(t_2 - T - \tau_0)\tau_1^{-1}] \right] \quad (5.71)$$

Із виразів (5.70) та (5.71) витікає, що

$$\exp[-(t_1 - \tau_0)\tau_1^{-1}] = \exp[-(t_2 - T - \tau_0)\tau_1^{-1}] \quad (5.72)$$

або

$$t_2 - t_1 = T. \quad (5.73)$$

Вираз (5.73) використовується для формування критерію, згідно із яким оцінюється результат контролю діяльності оператора мобільної пожежної установки.

Згідно (5.73) результат контролю є позитивним, якщо виконується умова

$$|t_2 - t_1 - T| \leq \varepsilon. \quad (5.74)$$

де ε – апріорі задане мале число.

Третя група особливостей експлуатації мобільної пожежної установки пов'язана безпосередньо із її штатною роботою. Зокрема вираз (4.37) може бути покладений в основу побудови алгоритму випробувань мобільної пожежної установки [90]. З цією метою апріорі визначають величину концентрації вогнегасної речовини ω_0 на виході форсунки. Після цього подають вогнегасну речовину до віртуального вогнища горіння і вимірюють швидкість U_0 її подачі на виході форсунки та швидкість U_m при апріорі визначеній відстані. На цій відстані вимірюють радіус r струменя вогнегасної речовини. Результати вимірювань використовуються для визначення результату випробувань мобільної пожежної установки за критерієм

$$\left| r - 2,12 \left[1,64(1 + \omega_0) \bar{U}^{-1} - 1 \right] \omega_0 \bar{U}_m^{-1} \right|^{p,5} \leq \varepsilon, \quad (5.75)$$

де ε – апріорі задане мале число.

Для випробувань мобільної пожежної установки в режимі гасіння пожежі може бути використана система, схема якої наведена на рис. 5.24, де зображено: 1 – мобільна пожежна установка; 2 – модельне вогнище; 3 – діафрагма; 4 – пристрій управління; 5 – блок управління; 6 – датчик потоку вогнегасної речовини; 7 – датчик температури; 8 – вимірювач фази; 9 – цифро-аналоговий перетворювач; 10 – елемент НІ; $R_1 \div R_4$ – резистори; C – конденсатор; Y_1, Y_2 – підсилювачі постійного струму.

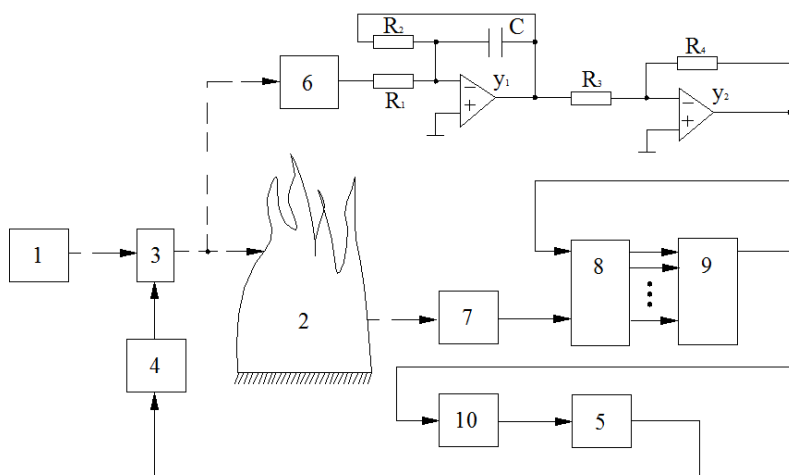


Рис. 5.24. Схема системи випробувань мобільної пожежної установки

Для величин резисторів та конденсатора має місце

$$R_2 R_1^{-1} = K; \quad R_2 C = \tau; \quad R_3 = R_4; \quad (5.76)$$

де K, τ – коефіцієнт передачі та постійна часу моделі, яка описує процес гасіння пожежі, відповідно [92].

За допомогою діафрагми 3, яка управляється від пристрою 4, забезпечується зміна потоку вогнегасної речовини за законом

$$I(t) = I_0 \sin \omega t, \quad (5.77)$$

де I_0, ω – амплітуда та частота відповідно. На виході датчика температури 7 та на виході підсилювача Y_2 будуть мати місце сигнали

$$U_1(t) = U_{01} \sin[\omega t + \varphi_1(\omega)] \quad (5.78)$$

$$U_2(t) = U_{02} \sin[\omega t + \varphi_2(\omega)] \quad (5.79)$$

де $U_{0i}, \varphi_i(\omega)$ – амплітуда та фаза відповідно.

Таблиця 5.7

Основні параметри та характеристики мобільної пожежної установки на базі сігвею

№	Параметр (характеристика)	Величина
1	2	3
1	Радіус дії, км	40 ÷ 50
2	Максимальна швидкість руху, км·год ⁻¹	20
3	Час зарядки акумуляторної батареї, год	6 ÷ 10
4	Тиск на виході редуктора, МПа	0,4
5	Тиск в балоні із стиснутим повітрям, МПа	40
6	Запас вогнегасної речовини, кг	40 ÷ 50
	Запас вогнегасної речовини із додатковим обладнанням, кг	120 ÷ 160
7	Дальність подачі вогнегасної речовини, м	≤ 15
8	Час запізнення при подачі вогнегасної речовини, с	≤ 1,0
9	Час гасіння, с	0,5 + 0,17τ ₅
10	Час повного опорожнення ємностей вогнегасною речовиною, с	≤ 25

11	Максимальна сила реакції струменю вогнегасної речовини, Н	60
12	Час заміни ємностей із вогнегасною речовиною, с	≤ 15
13	Швидкодія системи управління кутовим положенням форсунки, с	2,6
14	Потужність електричного двигуна руху, кВт	1,1 ÷ 1,5

Примітка. τ_5 – постійна часу пожежі.

Якщо виконуються умови (5.76), та параметри передаточної функції пожежі (модельного вогнища 2), яка має вигляд (2.50), та параметри передаточної функції каналу, що включає резистори, конденсатор та підсилювачі, будуть співпадати. Внаслідок цього буде мати місце

$$\varphi_1(\omega) = \varphi_2(\omega) \quad (5.80)$$

і на вхід блоку 5 надходить сигнал, наявність якого свідчить про відповідність технічного стану мобільної пожежної установки вимогам нормативної документації.

В табл. 5.7. наведені основні параметри та характеристики мобільної пожежної установки на базі сігвею.

Слід зазначити, що на сьогодні існує лише один приклад технічної реалізації мобільної пожежної установки на базі сігвею [25], орієнтованої на гасіння пожеж.

Недоліками такої мобільної пожежної установки є:

- установка не є повністю автономною внаслідок того, що залежить від постачання вогнегасної рідини від зовнішнього джерела;
- при відсутності вогнегасної рідини в магістралі установка втрачає працездатність;

- при використанні на відкритому просторі можлива відмова установки внаслідок неможливості підключення до магістралі для забору вогнегасної рідини (снігове занесення, обмерзання, бруд тощо);
- при використанні в приміщенні апіорі необхідно створення розгалуженої мережі магістралей із вогнегасною рідиною;
- виключена можливість для маневрування з метою оптимізації процесу гасіння пожежі;
- установка не визначає наявність перешкод та не ідентифікує їх характер на шляху до місця забору вогнегасної рідини;
- наявність можливих перешкод на шляху до місця забору вогнегасної рідини може призвести до відмови установки;
- наявність завад для навігатора установки (особливо при використанні в приміщеннях) може привести до відмови установки;
- необхідність в використанні додаткового обладнання для реалізації алгоритму управління установкою, а також необхідність в використанні магістралей із вогнегасною рідиною що призводить до суттєвого збільшення вартості такої мобільної пожежної установки.

Мобільна пожежна установка, яка об'єднує варіанти, наведені в [74, 75, 86, 87], вільна від цих недоліків, що обумовлює доцільність її використання при гасінні пожеж (особливо на початковій стадії).

5.6. Висновки за розділом 5

5.6.1. Показано, що час гасіння пожежі із використанням мобільної пожежної установки на базі сігвею включає постійну складову, яка дорівнює 0,5 с, та складову, яка визначається величиною постійної часу пожежі із коефіцієнтом 0,17.

5.6.2. Одержано вираз для часу повного опорожнення ємностей із вогнегасною речовиною, який визначається через геометричні та реологічні параметри ємності та речовини.

5.6.3. Показано, що сила реакції струменя вогнегасної речовини для типових умов роботи мобільної пожежної установки на базі сігвею не перевищує 60 Н, а для підвищення ефективності її роботи доцільно використовувати незалежний канал управління кутовим положенням форсунки.

5.6.4. Експериментальним шляхом одержані значення параметрів, що повністю характеризують роботу людини-оператора мобільної пожежної установки на базі сігвею, до числа яких відносяться час запізнення та постійна часу.

5.6.5. За умов монотонності перехідного процесу, мінімуму перегулювання, величина якого не перевищує 18,0 %, та мінімуму часу перехідного процесу, величина якого не перевищує 2,6 с, визначені основні параметри системи управління кутовим положенням форсунки.

5.6.6. Розроблені пропозиції стосовно технічної реалізації тренажерів, які орієнтовані на підготовку людини-оператора мобільної пожежної установки на базі сігвеїв, та створені алгоритми для контролю їх діяльності при експлуатації таких установок.

5.6.7. Виявлені особливості експлуатації мобільних пожежних установок на базі сігвеїв та розроблені алгоритми контролю їх технічного стану, в основі яких лежить визначення геометричних параметрів струменя вогнегасної речовини та формування модельного осередку горіння.

5.6.8. Наведені основні параметри та характеристики мобільної пожежної установки на базі сігвею, аналіз яких свідчить про її переваги над існуючими установками такого класу.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена актуальна наукова задача по обґрунтуванню параметрів та характеристик мобільних пожежних установок на базі сігвей, в основі якого лежить використання математичних моделей елементів таких установок, ділянки доставки вогнегасної речовини та осередку горіння.

1. Аналіз мобільних засобів пожежогасіння свідчить про те, що до перспективних відносяться мобільні пожежні установки, базовим елементом яких є сігвей і створення яких знаходиться на початковій стадії, що обумовлює необхідність в обґрунтуванні їх потенційних характеристик.

2. Показано, що формалізація процесу гасіння пожежі класу В порошковою вогнегасною речовиною, який обумовлений зменшенням швидкості виділення тепла в об'ємі полум'я внаслідок падіння величини швидкості реакції за рахунок загибелі активних центрів на поверхні часток порошка, зводиться до математичного опису у вигляді передаточної функції аперіодичної ланки, постіна часу якої визначається через реологічні, геометричні та теплофізичні характеристики полум'я.

3. Створено комплекс математичних моделей, що описує процеси в елементах мобільної пожежної установки на базі сігвею, які включають балон із стисненим повітрям, пневмомагістраль, ємність із вогнегасною речовиною та гнучку магістраль, а також рух вогнегасної речовини в просторі, що дозволило одержати динамічні характеристики такої мобільної пожежної установки в режимі гасіння пожежі, які враховують її інерційні властивості та час запізнення.

4. Показано, що основними параметрами, які характеризують струмись вогнегасної речовини при її подачі від мобільної пожежної установки до осередку горіння, є швидкість, радіус струменя та концентрація вогнегасної речовини, для яких побудовані номограми, що дозволяють оперативно

визначати оцінки цих параметрів вздовж траєкторії руху вогнегасної речовини. Показано, що похибка розбіжності між результатами, одержаними аналітичним та експериментальним методами, не перевищує 14,8 %.

5. Визначено, що час гасіння пожежі класу В мобільною пожежною установкою на базі сігвею із використанням порошкової вогнегасної речовини включає постійну складову, яка для характерних умов дорівнює, 0,5 с, та складову, яка пропорційна величині постійної часу пожежі із коефіцієнтом 0,17. Доведено, що для характерних параметрів пожежної установки час повного опорожнення ємностей із вогнегасною речовиною не перевищує 25 с, а сила реакції струменя вогнегасної речовини не перевищує 60 Н.

6. Експериментальним шляхом одержано розв'язання задачі ідентифікації динамічних параметрів людини-оператора мобільної пожежної установки на базі сігвею, яка включена в контур управління кутовим положенням форсунки для розпилювання вогнегасної речовини, і показано, що її коефіцієнт передачі дорівнює $2,34 \div 2,97$, час запізнення належить діапазону $0,17 \div 0,25$ с, а постійна часу – $0,26 \div 0,30$ с.

7. Визначені основні параметри каналу управління кутовим положенням форсунки для розпилювання вогнегасної речовини за умови максимальної його швидкодії, яка складає 2,6 с, а також наведені особливості експлуатації мобільних пожежних установок на базі сігвеїв, які розділені на три групи:

- особливості, що пов'язані із технічною реалізацією пожежних установок;
- особливості, пов'язані із наявністю людини-оператора;
- особливості, пов'язані безпосередньо із штатною роботою установки.

8. Одержані оцінки основних параметрів та характеристик мобільної пожежної установки на базі типового варіанту сігвею, які обґрунтовані із використанням математичних моделей елементів таких пожежних установок, ділянки доставки вогнегасної речовини та осередку горіння.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мобільні засоби пожежогасіння [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https:// present.com/mobilnye-sredstva-pozharotusheniya/](https://present.com/mobilnye-sredstva-pozharotusheniya/). – Дата доступу: 20.09.2017.
2. Науковці запропонували спорудити гігантські дирижаблі та «осідлати» на них стабільні повітряні потоки [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.unian.ua/science/10659024-naukovci-zaproponovali-sporuditi-gigantski-dirizhabli-ta-osidlati-na-nih-stabilni-povitryani-potoki.html> – Дата доступу: 21.02.2025.
3. Пожежні вертольоти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ukrcopter.com/firefighting> – Дата доступу: 01.02.2025.
4. Абрамов Ю.А., Рева Г.В., Росоха В.Е., Чучковский В.Н. Ідентифікація моделей швидкості розповсюдження фронту лісної пожежі та їх практичні додатки. Харків, 2004. 114 с.
5. National Interagency Fire Center (NIFC). United States supports Canada with aviation resources during 2023 wildfire season. Boise (ID), 2023. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.nifc.gov/fire-information/news-releases/us-supports-canada-aviation-resources>. Дата доступу: 10.12.2024.
6. Пожежні літаки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fireman.club/statyi-polzovateley/pozharnuie-samolety>. – Дата доступу: 23.01.2018.
7. National Interagency Fire Center (NIFC). Helicopters. Boise, ID, 2023. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.nifc.gov/resources/aircraft/helicopters> – Дата доступу: 18.01.2025.
8. Дрон-пожежний [Електронний ресурс]. – Режим доступу: alb.aero/blog/chto-takoe-dron-kakie-vidy-byvayut-zachem-oni.html. – Дата доступу: 22.03.2019.

9. Дрон для боротьби з пожежами [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https:// twitter.com/Vitauskas_A/status/991295294578053123](https://twitter.com/Vitauskas_A/status/991295294578053123). – Дата доступу: 22.03.2019.
10. South China Morning Post. Chinese AI drone system aims to hit fires in hard-to-reach places. Hong Kong, 2023. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3238211/chinese-ai-drone-system-aims-hit-fires-hard-reach-places-they-turn-big-blazes>. – Дата доступу: 28.03.2025.
11. Пожежні катери США [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https:// Korabley.net/news/pozhamy_katera_ssha/2013-03-25-1409#!](https://Korabley.net/news/pozhamy_katera_ssha/2013-03-25-1409#!). – Дата доступу: 18.03.2025.
12. Пожежний потяг: призначення, види та характеристики. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/pozharnye-poezda-vidi-xarakteristiki-pozharnyx-poezdov/>. – Дата доступу: 14.04.2019.
13. Пожежні потяги іноземного виробництва. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/pozharnye-poezda-inostrannogo-proizvodstva/>. – Дата доступу: 14.04.2019.
14. Саламов Д.О., Абрамов Ю.О., Басманов О.Є. Аналіз систем охолодження резервуарів в резервуарному парку з нафтопродуктами // Проблеми пожежної безпеки. 2018. Вип. 43. С. 156-161.
15. Jindal K., Wang A., Thakur D., Zhou A., Spurny V., Walter V., Broughton G., Krajnik T., Saska M., Loianno G. Design and Deployment of an Autonomous Unmanned Ground Vehicle for Urban Firefighting Scenarios. arXiv, 2021. [Електронний ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/2107.03582>. Дата доступу: 18.02.2025.
16. Ben Mnaouer H., Faieq M., Yousefi A., Ben Mnaouer S. FireFly Autonomous Drone Project. arXiv, 2021. [Електронний ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/2104.07758>. – Дата доступу: 18.02.2025.

17. Пожежний автомобіль [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Пожежний_автомобіль. – Дата доступу: 23.03.2025.
18. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.wiss.com.pl/ep/offer/fire-fighting-medium-vehiches/renault-medlum-300-dxi-4x4.html>. – Дата доступу: 23.05.2019.
19. Червона пантера [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://mezha.media/2023/05/31/rosenbauer-panther-ps-zsu/>. – Дата доступу: 22.01.2025.
20. Пожар внутри собора Парижской Богоматери тушил робот Colossus [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Пожежа_в_Соборі_Паризької_Богоматері. – Дата доступу: 13.02.2025.
21. Пожежний мотоцикл [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/>. – Дата доступу: 13.02.2025.
22. Пожежний мотоцикл BMW [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://fire-security.com.ua/uk/catalog/good/pogharnyy-motocikl-bmw-r-1250-rt>. – Дата доступу: 17.02.2025.
23. Burner Fire Control. Guide to Helideck Foam Fire Protection. Houston, TX, 2014. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.burnerfire.com/projects-and-media/uncategorized/cafs/helideck-fire-protection>. – Дата доступу: 17.02.2025.
24. Абрамов Ю.А., Киреев А.А. Гелеобразующі вогнегасні та вогнезахисні засоби підвищеної ефективності, що застосовуються до пожеж класу А. Харків, 2015. 254 с.
25. Роботи, схожі на сегвеї, покликані допомагати пожежникам і рятувати життя [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://newatlas.com/firefighting-robot-ffr/27849/>. Дата доступу: 21.02.2025.

26. Мобільна пожежна установка: пат. 119180 Україна. №201704071; заявл. 24.04.2017; опубл. 11.09.2017; Бюл. №17. 4 с.
27. Сігвеї. Види. Влаштування та робота. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://electrosamoru.gov.ua/naj/jelektrooborudovanie/ustrojstva/sigvei/>. Дата доступу: 29.04.2019.
28. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е., Хижняк А.А. Математичні моделі процесу тушіння пожежі об'єкту управління системи автоматичного пожежогасіння // Проблеми надзвичайних ситуацій. 2018, Вип. 2(28). С. 19-26.
29. Пономаренко С.М. Основи фізики горіння: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 85 с.
30. Бойко В.С. Хімічна кінетика та каталіз: навчальний посібник. Київ: Вища школа, 2005. 256 с.
31. Костенко В. К., Покалюк В. М., Майборода А. О., Нуянзін О. М. та ін. Фізико-хімічні процеси розвитку та припинення горіння. Навчальний посібник. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2016. 156 с.
32. Саранчук В.І., Ільшов М.О., Ошовський В.В., Білецький В.С. Основи хімії і фізики горючих копалин. – Львів: Новий Світ-2000, 2023. – 372 с.
33. Frost A.A., Pearson R.G. Kinetics and Mechanism. 3rd ed. – New York: Wiley, 1961. – 444 p.
34. Steinfeld J.I., Francisco J.S., Hase W.L. Chemical Kinetics and Dynamics. 2nd ed. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. – 512 p.
35. Абрамов Ю.А., Тищенко Е.А., Хижняк А.А. Модель тушіння пожежі // Проблеми пожежної безпеки. 2018. Вип. 43. С.3-8.
36. Korn, Granino A.; Korn, Theresa M. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review. – New York: McGraw-Hill, 1961. – 943 p.

37. Сорока Б., Згурський В. Розвиток теорії згоряння газоподібного палива з урахуванням сучасних кінетичних механізмів горіння. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2024. Т. 80, №3. С. 5–32.
38. Хрібик А., Полоні М., Магдолен Л., Майкут А., Протасов Р. Вплив складу синтезованого газу на процес згоряння суміші у двигуні внутрішнього згоряння. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Машинознавство та САПР*. 2023. №1. С. 152–159.
39. Трегубов Д. Г., Дадашов І. Ф., Мінська Н. В., Гапон Ю. К., Чиркіна-Харламова М. А. Фізико-хімічні основи розвитку та гасіння пожеж горючих рідин. Харків: НУЦЗ України, 2024. 216 с.
40. Смеляненко С. О., Лавренюк О. І., Михалічко Б. М. Теорія горіння та вибуху. Пожежі та їх ліквідація. Львів: ЛДУ БЖД, 2019. 158 с.
41. Тарахно О.В. Теоретичні основи пожежовибухонебезпеки. Харків, 2006. 395 с.
42. Frank-Kamenetskii D. A. *Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics*. 2nd ed., enl. and rev. New York: Plenum Press, 1969. XXVI, 574 p.
43. Абрамов Ю.А. Основи пожежної автоматики. Харків, 1993. 288 с.
44. Kaye G. W. C., Laby T. H. *Tables of Physical and Chemical Constants and Some Mathematical Functions*. 16th ed. London: Longman, 1995. 477 p.
45. Kuchling H. *Taschenbuch der Physik*. 22. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2022. 716 p.
46. Blackshear P. L. *Heat Transfer in Fires: Thermophysics, Social Aspects, Economic Impact*. New York: John Wiley & Sons, 1974. 516 p.
47. Janssens M. L. *Introduction to Mathematical Fire Modeling*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2000. 316 p.
48. Chassaing P. *Fundamentals of Fluid Mechanics: For Scientists and Engineers*. Cham: Springer, 2022. 600 p.

49. Saadat H. Introduction to Automatic Control. Lecture Notes. 2019. 150 p.
50. Evgrafov M. A. Series and Integral Representations. In: Gamkrelidze R. V. (Ed.) Analysis I. Berlin: Springer, 1989. pp. 1–81.
51. Dwight H. B. Tables of Integrals and Other Mathematical Data. 4th ed. New York: Macmillan, 1961. 336 p.
52. Salam A. Fundamentals of Pneumatics and Hydraulics. Singapore: Springer, 2022. 360 p.
53. Turner I. Engineering Applications of Pneumatics and Hydraulics. London: Routledge, 2020. 184 p.
54. Хижняк А.А., Абрамов Ю.О., Тищенко Є.О. Моделі пожежогасіння при використанні мобільної установки // Проблеми пожежної безпеки. 2019. Вип. 46. С.193-198.
55. Ward-Smith J. Mechanics of Fluids. 9th ed. London: Taylor & Francis, 2017. 464 p.
56. Bronshtein I. N., Semendyayev K. A., Musiol G., Mühlig H. Handbook of Mathematics. 6th ed. Berlin: Springer, 2015. 1207 p.
57. Santilli R. M. Foundations of Theoretical Mechanics I: The Inverse Problem in Newtonian Mechanics. Berlin: Springer, 1978. 250 p.
58. Redfern D. The Maple Handbook: Maple V Release 4. New York: Springer, 1996. 487 p.
59. Артюшин Л.М., Дурняк Б.В., Машков О.А., Плащенко Д.М. Теоретичні основи технічної кібернетики. Львів, 2004. 130 с.
60. Heymes F., Hoorelbeke P., Roosendans D., Dutertre A., Henschger G. An Experimental Investigation on Fire Extinguishing Powder Efficiency. In: Chemical Engineering Transactions. 2020; 82: 241–246.
61. Котов А.Г. Пожежогасіння та системи безпеки. Київ, 2010. 278 с.

62. Shingareva I., Lizárraga-Celaya C. Solving Nonlinear Partial Differential Equations with Maple. Berlin: Springer, 2011. 246 p.
63. Abramovich G. N. The Theory of Turbulent Jets. Cambridge, MA: MIT Press, 1963. 671 p.
64. Севриков В.В., Карпенко В.А., Севриков І.В. Надійність і ефективність автоматичних установок пожежогасіння. Київ: Машинобудування, 2001.
65. Zhong K., Huang X., Fu Z., Wan Y. Experimental study on the influence of nozzle structure on the fire suppression effectiveness of superfine powder. Fire Science and Technology, 2023, 42(1): 84–88.
66. Назаренко О. А., Третьяк О. І. Методи обчислень у системі комп'ютерної математики Maple: монографія. Одеса: Астропринт, 2023. 348 с.
67. Хижняк А.А., Абрамов Ю.А., Кривцова В.І. Модель струї вогнегасної речовини при гасінні пожежі // Проблеми пожежної безпеки. 2018. Вип. 44. С. 164-169.
68. Гащук П.М., Паснак І.В. Обґрунтування доцільності застосування пожежних стволів пістолетного типу // Науковий вісник НЛТУ України. 2012. Вип. 22.5. С. 122-129.
69. Баратов А.М., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. та ін. Пожежовибухонебезпечність речовин та матеріалів та засоби їх гасіння. Москва, 1990. Т.1. 496 с.
70. Баратов А.М., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. та ін. Пожежовибухонебезпечність речовин та матеріалів та засоби їх гасіння. Москва, 1990. Т.2. 384 с.
71. Корольченко А.Я. Пожежовибухонебезпечність речовин та матеріалів та засоби їх гасіння. Москва, 2000. Т.1. 709 с.
72. Корольченко А.Я. Корольченко А.Я. Пожежовибухонебезпечність речовин та матеріалів та засоби їх гасіння. Москва, 2000. Т.2. 757 с.

73. Абрамов Ю.А., Гринченко Є.І., Кірючкін А.Ю. та ін. Інформаційне забезпечення моніторингу та антикризового управління в умовах надзвичайних ситуацій. Харків, 2006. 288 с.
74. Мобільна пожежна установка: пат. 136909 Україна. № 201903554; заявл. 8.04.2019; опубл. 10.09.2019, Бюл. № 17. 4 с.
75. Мобільна пожежна установка: пат. 124928 Україна. № 201711464; заявл. 23.11.2017; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 8. 6 с.
76. Маркелова С.В. Методологія оцінки впливу людського фактора. Кібернетика і системний аналіз, 2021, №1: 34–43.
77. Poukoff K. The optimization of conection between Human and technigues in Man-Machine Systems // Preprins of JFAC-JFORS Symposium (Varna, Bulgaria, 8-11 oct. 1974). P. 419-426.
78. Ding Y., Duffy V. G. Global Research Trends of Human Factors and Ergonomics in Robots, Intelligent and Automation Systems: A Bibliometric Analysis (2010–2020). In: Automation, Collaboration, & E-Services, Springer, 2022, pp. 453–469.
79. Guastello S. J. Human Factors Engineering and Ergonomics: A Systems Approach. Boca Raton: CRC Press, 2022. 560 p.
80. Mononen K., Konttinen N., Vitasalo J., Era P. Refionships between postural balance, rifle stability and shooting accuracy among novice rifle shoting // Scand. J. Med. Sci. Sports. 2007, Vol. 17.№ 2. P. 180-185.
81. Собина В.А., Хижняк А.А., Абрамов Ю.А. Визначення параметрів моделі оператора мобільної пожежної установки // Проблеми пожежної безпеки. 2019, Вип. 45. С. 161-166.
82. Брагінський М.Я., Бурикін Ю.Г., Тараканов Д.В. Моделювання людино-машинних систем з урахуванням впливу світлових імпульсів на людину-оператора // Вісник кібернетики. 2016, Вип 1. С. 63-73.

83. Пристрій для визначення характеристик оператора мобільного пожежного робота: пат. 128951 Україна, № 2018051111; заявл. 8.05.2018; опубл. 10.10.2019, Бюл. № 19. 5 с.
84. Пристрій для визначення характеристик оператора мобільного пожежного робота: пат. 130568 Україна, № 201807407; заявл. 2.07.2018; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23. 5 с.
85. Andrews G. E., Askey R., Roy R. Special Functions. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 664 p.
86. Мобільна пожежна установка: пат. 136389 Україна, № 201903009; заявл. 27.03.2019; опубл. 12.08.2019, Бюл. № 15. 5 с.
87. Мобільна пожежна установка: пат. 132198 Україна, № 201810005; заявл. 8.10.2018; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3.6 с.
88. Пристрій для визначення характеристик оператора мобільного пожежного робота: пат. 135301 Україна, № 201900596; заявл. 21.01.2019; опубл. 25.06.2019, Бюл. № 12. 5 с.
89. Спосіб контролю діяльності оператора мобільної пожежної установки: пат. 142473 Україна, № 201911274; заявл. 19.11.2019; опубл. 10.06.2020, Бюл. № 11 5 с.
90. Собина В.О., Хижняк А.А., Абрамов Ю.О. Обґрунтування вибору параметрів каналу управління кутовим положенням форсунки мобільної пожежної установки // Проблеми пожежної безпеки. 2020. Вип. 47. 120-126.
91. Спосіб випробувань систем автоматичного пожежогасіння: пат. 132480 Україна, № 201810006; заявл. 8.10.2018; опубл. 25.02.2019, Бюл. № 4. 4 с.
92. Система для випробувань систем автоматичного пожежогасіння: пат. 136247, № 201902018; заявл. 28.02.2019; опубл. 12.08.2019, Бюл. № 15. 5 с.

93. Abramov Y., Basmanov O., Krivtsova V., Khyzhnyak A. Estimating the influence of wind exposure on the motion of an extinguishing substance // EUREKA: Physics and Engineering, 2020. – №.5. – P.51-59. DOI: 10.21303.2461-4262.2020.001400.

94. Роботизовані системи. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.alpha-wolf.de/en/alpha-wolf-r1/>. Дата доступу: 21.02.2025.

ДЛЯ НОТАТОК

ДЛЯ НОТАТОК

ДЛЯ НОТАТОК

Наукове видання

Хижняк Андрій Анатолійович

Кириченко Оксана Вякславівна

Мотрічук Роман Борисович

**ІННОВАЦІЙНІ РІШЕННЯ У СТВОРЕННІ МОБІЛЬНИХ ПОЖЕЖНИХ
СИСТЕМ НА БАЗІ ПЕРСОНАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ
(СІГВЕЇВ)
*Монографія***

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.

Підписано до друку 25.06.25. Формат 60х84/16.

Папір 80 г/м². Ум.друк. арк. 11,3

Тираж 50 прим. Обл.вид арк. 4,0

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