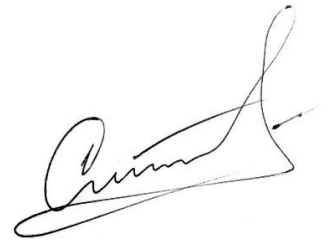


ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ



СТАСЬ СЕРГІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 614.842:532.525

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ
ГЕНЕРУВАННЯ СТРУМЕНІВ ВОДНОЇ ВОГНЕГАСНОЇ РЕЧОВИНИ**

21.06.02 – пожежна безпека

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Черкаси – 2026

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному університеті цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

**Науковий
консультант:**

доктор технічних наук, професор
ТИЩЕНКО Євген Олександрович,
Національний університет цивільного захисту України,
професор кафедри автоматичних систем безпеки та
електроустановок навчально-наукового інституту
пожежної та техногенної безпеки

Опоненти:

доктор технічних наук, професор
КОВАЛИШИН Василь Васильович,
Львівський державний університет безпеки
життєдіяльності, професор кафедри експлуатації
транспортних засобів та пожежно-рятувальної техніки
навчально-наукового інституту пожежної та
техногенної безпеки;

доктор технічних наук, професор
КОСТЕНКО Віктор Климентович,
ДВНЗ «Донецький національний технічний
університет», завідувач кафедри природоохоронної
діяльності навчально-наукового інституту гірництва та
геоінженерії;

доктор технічних наук, професор
ШНАЛЬ Тарас Миколайович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри будівельних конструкцій та мостів
Інституту будівництва, інфраструктури та безпеки
життєдіяльності.

Захист відбудеться о 14⁰⁰ 11 вересня 2026 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.707.01 в Національному університеті цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій за адресою: вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету цивільного захисту України за адресою: вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, а також на сайті спеціалізованої вченої ради Д 64.707.01 за електронною адресою: <https://nuczu.edu.ua/ukr/nauka/spetsializovani-vcheni-rady?view=article&id=6945&catid=45>.

Автореферат розісланий 31 липня 2026 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 64.707.01
доктор технічних наук, професор



Олександр НУЯНЗІН

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Узагальнені статистичні дані про пожежі та їх наслідки свідчать, що з 2015 до 2025 року у державі зареєстровано понад 934 тисячі пожеж, унаслідок яких загинуло та було травмовано десятки тисяч людей. При цьому, за 2022-2025 роки середня кількість зафіксованих пожеж майже не змінилася й зросла лише на 2% відносно 2015-2021 років (водночас у 2024 та 2025 роках кількість пожеж зросла відповідно на 24 % та 19 %). Однак середнє значення прямих збитків за період 2022-2024 років зросло майже у 12 разів, а у 2025 році зросло ще у 2,1 рази (відносно 2024 року) й склало понад 52 млрд гривень. Основним чинником цього є пожежі й руйнування, спричинені наслідками повномасштабного вторгнення. Показовим є те, що для ліквідації всіх зафіксованих пожеж вода, а також водні розчини піноутворювачів, використовувалися понад 915 тисяч разів, що становить майже 98% від загальної кількості пожеж. Таким чином, для реалізації державної політики у сфері захисту населення і територій від наслідків надзвичайних ситуацій, насамперед під час гасіння пожеж і забезпечення пожежної та техногенної безпеки, вода була й залишається одним із ключових ресурсів.

Вода є найбільш широко використовуваною речовиною для пожежогасіння, що зумовлено сукупністю її фізичних і хімічних властивостей, які забезпечують високу ефективність та обумовлюють її використання як основного вогнегасного ресурсу. Основними причинами пріоритетності її застосування є нетоксичність, здатність до розпилення, висока питома теплота пароутворення, доступність та дешевизна порівняно з іншими рідинами.

Випаровуючись, вода, як засіб пожежогасіння, має високу охолоджувальну здатність (питому теплоту пароутворення) 2,26 МДж/кг. Однак, під час реального пожежогасіння така потужність досягається шляхом використання значно більшої кількості води, а повне використання величезної охолоджувальної потужності води можливо лише у випадку, якщо вона повністю випаровується у вогнищі пожежі. Наближення до так званого «сухого» пожежогасіння можливе за умови підвищення частки вогнегасної речовини (води), що безпосередньо бере участь у відведенні тепла від осередку пожежі. Також важливо забезпечувати зменшення енергетичних втрат на транспортування рідин.

Забезпечити зростання ефективності застосування водних вогнегасних речовин у такому випадку мають пожежні стволи й насадки, що використовуються як елементи систем формування струменів для забезпечення гасіння пожеж і (або) проведення пожежно-рятувальних робіт.

Практичний досвід показує, що для достовірного прогнозування руху рідини у струмені в багатьох випадках важливо враховувати особливості формування потоку у відповідних елементах гідравлічної системи – зокрема, у насадках різних типів та пожежних стволах. Це має особливе значення вже на етапі проектування відповідного обладнання.

Ще однією важливою особливістю зазначеної проблеми є необхідність урахування реологічних властивостей рідини, яка використовується під час формування вогнегасних гідравлічних струменів. Існує потреба у розробленні та вдосконаленні технологій застосування технічних засобів, призначених для локалізації та ліквідації пожеж, захисту людей, матеріальних цінностей і довкілля від впливу небезпечних факторів пожежі. Такі засоби повинні забезпечувати формування різних типів струминних потоків, необхідних для пожежогасіння, а також реалізацію функцій теплового захисту й тепловідведення об'єктів промислового призначення.

Дослідженнями у галузі розробки й застосування протипожежної техніки та гідравлічного пожежного обладнання з метою отримання різного типу струменів для потреб цивільного захисту загалом та пожежогасіння зокрема у своїх роботах розглядали Ando H., Clanet C., Emmons H. W., Fan Q., Chen F., Heyden J., Kokot-Gura S., Lofting J., Merci B., Oldakovsky H., Plateau J., Rayleigh L., Grimwood P., Söderqvist S., Theobald S., Taylor G. I., Villiermaux E., Zhang S., Абрамов Ю. О., Антонов А. В., Басманов О. Є., Вамболь С. О., Виноградов А. Г., Виноградов С. А., Грицина І. М., Дендаренко Ю. Ю., Желяк В. І., Жартовський В. М., Жартовський С. В., Жданов Ю. А., Кондратенко О. М., Ковалишин В. В., Кравчуновський В. Ф., Кремена А. П., Лазаренко О. В., Міщенко І. В., Огурцов С. Ю., Ольшанський В. П., Остапов К. М., Росоха С. В., Сенчихін Ю. М., Сізіков О. О., Халипа В. М., Шаповалова О. О., Шкарабура М. Г., Яхно О. М.

Однак, нині залишаються не повністю розв'язаними задачі визначення основних гідродинамічних параметрів потоків у вогнегасних струменях, ролі сил інерції при конвективному прискоренні та поверхневих сил під час розпорошення струменів, урахування аномалії в'язкості вогнегасних рідин, а також впливу геометричних особливостей струминоформувальних пристроїв на параметри отримуваних струменів. Слід констатувати відсутність надійних методів і алгоритмів розрахунку задач, що враховують дію зазначених сил на процеси формування та розпаду вогнегасних струменів. Розв'язання цієї задачі дає змогу зменшити похибку гідравлічних розрахунків параметрів струменів і підвищити адекватність математичних моделей відтворенню реальних фізичних процесів у вогнегасних потоках. Окрім того, отримані результати можуть бути використані для більш коректного обґрунтування, розрахунку та проєктування технологічних і конструктивних параметрів робочих елементів струминного обладнання у сфері пожежної безпеки, призначеного для генерування гідравлічних вогнегасних струменів.

Відсутність надійних методів проєктування та розрахункових методик конструювання пожежних стволів і насадок, а також потреба у визначенні оптимальних параметрів вогнегасних струменів для кожного конкретного випадку пожежогасіння, зумовлюють необхідність проведення досліджень процесів струминоформування з урахуванням конструктивних особливостей відповідного гідравлічного пожежного обладнання, режимів його використання та реологічних властивостей застосовуваної вогнегасної речовини.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до Державної цільової програми забезпечення пожежної безпеки на період до 2010 року (Постанова КМУ від 1 липня 2002 р. № 870), Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2012–2015 роки (Постанова КМУ від 27 червня 2012 р. № 590), Положення про єдину державну систему цивільного захисту (Постанова КМУ від 09 січня 2014 року № 11), Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року (Постанова КМУ № 942 від 07.09.2011 р.), Програм наукової і науково-технічної діяльності Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля на 2007–2012 та 2013–2018 роки, Програм наукової діяльності ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України у 2016–2020 та 2021–2025 роках, науково-дослідних робіт «Розробка способу створення розпиленого потоку рідини» (номер державної реєстрації 0111U009148, керівник НДР, 2011 р.) та «Розробка методу створення розпиленого водяного струменя вогнегасної речовини» (номер державної реєстрації 0121U109415, відповідальний виконавець НДР, 2021 р.).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розкриття закономірностей впливу реології рідини та геометричних параметрів пожежних стволів й насадок на характеристики струменів водних вогнегасних речовин, що ними формуються, як наукового підґрунтя для розроблення нових та удосконалення існуючих конструкцій пожежних стволів та насадок з істотним зменшенням енергетичних втрат на транспортування рідин.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі наукові завдання:

- проаналізувати сучасні підходи до проектування та технології застосування технічних засобів формування струменів водної вогнегасної речовини із урахуванням особливостей струминоутворення у різних типах гідравлічного пожежного обладнання, передусім водяних пожежних стволах і насадках;
- обґрунтувати критеріальну базу щодо узагальненого теоретичного підходу для розрахункового оцінювання гідродинамічних параметрів струменів водних вогнегасних речовин, яка базується на системному підході і дозволяє уніфікувати розрахунки для різних типів пожежних стволів і насадок;
- розробити методику та з її використанням провести експериментальні дослідження закономірностей впливу окремих і комбінованих чинників формування струменів водних вогнегасних речовин на їх параметри при проектуванні пожежних стволів і насадок;
- дослідити процеси формування імпульсних та пульсуючих потоків водних вогнегасних речовин у пожежних стволах із застосуванням математичної моделі пульсаційного руху. За результатами моделювання розробити програмне забезпечення для розрахунку та візуалізації параметрів імпульсних і пульсуючих струменів;
- дослідити особливості гідродинаміки потоку вогнегасної рідини в системі «пожежний ствол – вільний струмінь» з урахуванням умов перехідної зони потоку водної вогнегасної речовини;

- провести математичне моделювання потоків водної вогнегасної речовини при застосуванні пожежних стволів та насадок із різними типами поперечного перерізу струминоформувального каналу з урахуванням впливу низьковідсоткових водних розчинів піноутворювачів на втрати напору в потоці вогнегасної речовини в пожежних стволах, насадках та експериментально підтвердити результати цього моделювання у розгалужених трубопроводах систем автоматичного водяного пожежогасіння й рукавних лініях;
- розробити метод оцінювання енергоефективності технічних засобів генерування водяних струменів на основі результатів аналізу їх гідравлічної системи струминоутворення шляхом застосування критеріїв ексергетичної оптимізації.

Об’єкт дослідження – процес формування струменів водної вогнегасної речовини пожежними стволами та насадками.

Предмет дослідження – вплив чинників формування водних струменів на їх параметри при транспортуванні, формуванні, спрямуванні та подаванні вогнегасних речовин технічними засобами протипожежної техніки.

Методи дослідження. У роботі застосовано аналітичні, статистичні та числові методи дослідження. Аналітичний метод використано для аналізу попередніх досліджень стосовно створення і застосування засобів отримання струменів вогнегасних речовин. Процеси руху потоків рідини у струминоформувальних каналах пожежних стволів та насадок у полі дії сил в’язкості, поверхневих сил та сил інерції від конвективного прискорення досліджувалися методами математичного моделювання із застосуванням відомих законів й рівнянь гідродинаміки. Методи розв’язання системи рівнянь Нав’є–Стокса в циліндричних координатах застосовано для моделювання процесів розподілу швидкостей вогнегасної рідини вздовж внутрішнього каналу пожежного ствола. Рівняння І. Мещерського використані для опису руху водної вогнегасної речовини й визначення залежностей витрати рідини й перепаду тиску на ділянці подачі до пожежного ствола чи насадки. Метод Буссінеска застосовано при визначенні втрат енергії у випадку плинуненьютонівських рідин в стволах із круговим і плоскощільним перерізами. Для чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, моделювання процесу і візуалізації тривимірного плинуньї рідини, побудови графічних залежностей використовувалися системи автоматизованого проєктування та чисельного моделювання. Методи планування експерименту та математичної статистики застосовано для раціонального планування досліджень, коректної обробки отриманих результатів і визначення оптимальних значень чинників формування водних струменів.

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі отримані нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності забезпечують вирішення актуальної науково-технічної проблеми у сфері пожежної безпеки, а саме раціонального використання водної вогнегасної речовини за рахунок застосування ефективних механізмів формування водяних струменів із науково обґрунтованими параметрами. При цьому одержано такі наукові результати.

Уперше:

1) методами математичного моделювання на основі аналізу розмірностей теорії подібності встановлено механізм формування струменів водної вогнегасної речовини, який відрізняється врахуванням впливу гідродинамічної початкової ділянки струменя на дальність подачі вогнегасної речовини та густину потоку (інтенсивність) шляхом застосування критеріїв відношення густин повітря й вогнегасної рідини $\rho_{\text{пов}}/\rho_r$ та відношення площі перерізу струменя до квадрата вихідного діаметра пожежного ствола S/d_0^2 , які дозволяють здійснювати керування параметрами ділянки переходу від суцільного до розпиленого струменя вогнегасної речовини;

2) встановлено закономірності впливу конструктивних параметрів насадок на енергію струменів водних вогнегасних речовин шляхом проведення числового повного факторного експерименту у вигляді регресійної моделі, що описується рівнянням у нормованому просторі $y = 1244 + 192x_1 + 149x_2 + 77x_3 + 22x_2x_3 + 66x_1x_2x_3$, де x_1, x_2, x_3 – фактори, що відповідають витраті рідини Q , діаметру насадки d_0 та тиску p_0 , яка вказує, що найбільший вплив на параметр оптимізації мають чинники витрати рідини Q і діаметра вихідного отвору насадки d_0 ;

3) встановлено закономірність падіння тиску струменів водної вогнегасної речовини на виході з насадок і отримано узагальнену залежність відносного тиску $J(D)$ від конструктивних характеристик насадок для струменів з круглим поперечним перерізом, яка описується рівнянням $J(D) = -2,533 \cdot 10^{-10} \cdot D + 0,231$, що досягнуто шляхом введення узагальненого параметра $l/d_0 \cdot Re = D$, який враховує геометричні та гідродинамічні характеристики потоку та дозволяє розглядати початкову ділянку компактної частини струменя за аналогією з моделлю нестабілізованої течії в пожежному стволі або насадці;

4) встановлено закономірності формування пульсаційних режимів у системі транспортування водної вогнегасної речовини залежно від гідродинамічних параметрів струменів шляхом аналізу взаємозв'язку безрозмірних критеріїв $u/(nv)^{1/2}$ та $Q(n/v)^{3/2}$, що характеризують імпульсні потоки, де u означає швидкість струменя, n є частотою пульсацій, v характеризує кінематичну в'язкість рідини, а Q визначає об'єм разового викиду рідини;

5) встановлено закономірність виникнення ексергетичного ефекту під час транспортування водних вогнегасних речовин до пожежних стволів та насадок залежно від аномалії в'язкості рідин, що є основою методу оцінювання енергоефективності технічних засобів генерування струменів.

Удосконалено:

методичну та експериментальну бази досліджень струменів та потоків рідин у пожежних стволах й насадках. Розроблено лабораторні установки системи подачі водної речовини до пожежного ствола та дослідження течій в'язкої та аномально-в'язкої рідин зі змінною масою протікання по довжині каналів пожежного обладнання для транспортування вогнегасних рідин.

Набула подальшого розвитку:

система методів створення та удосконалення технічних засобів формування струменів водної вогнегасної речовини.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробленні удосконалених методів проєктування технічних засобів генерування водяних вогнегасних струменів для підвищення ефективності застосування водних вогнегасних речовин. Додавання низьковідсоткових водних розчинів піноутворювачів в потік вогнегасної речовини в пожежних стволах, насадках, розгалужених трубопроводах систем автоматичного водяного пожежогасіння й рукавних лініях дозволяє забезпечити сталі витрати рідини при одночасному зменшенні енергетичних втрат на 12%, що призводить до відчутного економічного ефекту. Результати дисертаційної роботи втілено при розробці п'яти патентів України на корисну модель щодо способу створення розпиленого потоку рідини (Пат. 60500 U України), конструкцій пожежного ствола (Пат. 58516 U України), портативного піногенератора (Пат. 121256 U України), водяного кавітаційного пожежного ствола (Пат. 146639 U України) та мобільної установки для гасіння пожеж тонкорозпиленою водою (Пат. UA 152183 U України). Запропоновані у роботі положення забезпечують зниження енергоємності системи генерування розпилених потоків на 5,4 % при потужності двигуна 85 кВт для пожежної автоцистерни АЦ 2,0-40(30) Hyundai компанії «ТІТАЛ» (м. Київ). Теоретичні та методологічні положення роботи використані в освітньому процесі Національного університету цивільного захисту України для підготовки здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти в галузі знань 26 «Цивільна безпека» зі спеціальності 261 «Пожежна безпека» під час викладання навчальної дисципліни «Протипожежне водопостачання», а також у Черкаському державному технологічному університеті для підготовки здобувачів вищої освіти за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти в галузі знань 12 «Інформаційні технології» зі спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» під час викладання навчальної дисципліни «Конструювання програмного забезпечення».

Отримані результати можуть бути використані у підрозділах Державної служби України з надзвичайних ситуацій, а також у науково-дослідних і проєктних організаціях для обґрунтування, розроблення та впровадження нових зразків пожежних стволів і насадок, а також для підготовки відповідної нормативної документації.

Обґрунтування та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджуються використанням відомих систем диференційних рівнянь тепломасообміну для аналізу технічних систем транспортування рідин та моделювання гідродинамічних процесів у технічних та природних умовах. Зазначені підходи апробовано чисельними методами інтегрування рівнянь тепломасообміну та підтверджено задовільною збіжністю розрахункових та експериментальних даних, отриманих під час транспортування рідин, формування та спрямування струменів вогнегасних речовин із застосуванням водяних пожежних стволів, насадок, трубопроводів систем автоматичного водяного пожежогасіння та напірних рукавних ліній.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні наукової проблеми в галузі пожежної безпеки, визначенні мети, завдань, об'єкта та предмета

дослідження, а також у створенні концепції розвитку технічних засобів пожежогасіння та підвищення ефективності роботи пожежно-рятувальної техніки. Автором самостійно проаналізовано наукові праці та нормативну літературу, які становлять основну джерельну базу дослідження, розроблено методичні засади експериментальних і теоретичних досліджень, виконано обробку експериментальних даних, здійснено узагальнення результатів та сформульовано основні висновки дисертаційної роботи. Здобувач особисто організував і провів значну частину експериментальних досліджень у лабораторних і натурних умовах, а також узяв участь у розробленні та випробуванні експериментального обладнання.

Усі положення, винесені на захист, та результати досліджень представлені в працях [1–69], з яких роботи [10, 13, 21, 23–30, 50, 53, 54, 58, 62, 69] опубліковані здобувачем одноосібно.

У наукових розвідках, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача такий: [1] – математичне моделювання процесів дестабілізації потоків у каналах зі змінною витратою, визначення умов переходу течії в нерівномірний режим; [2] – моделювання неусталеної течії з урахуванням стисливості рідини в трубопроводах пожежогасіння та визначення впливу цього фактора на тиск і витрату; [3] – дослідження кавітаційних процесів у замкнених порожнинах шестеренних насосів, оцінювання впливу їх на подачу та ресурс обладнання для оцінки втрат на перекачування рідини; [4] – визначення впливу гуанідинових полімерів на параметри роботи систем водяного пожежогасіння, обґрунтування їх використання для підвищення ефективності; [5] – проведення повномасштабних експериментів з вимірювання подовження пожежних рукавів типу Т та формування узагальнених аналітичних залежностей; [6] – дослідження впливу низьких доз піноутворювачів на витрату рідини під час її транспортування рукавами, визначення оптимальних концентрацій; [7] – дослідження гідродинамічно активного реагенту для енергозбереження, встановлення його впливу на режими течії, втрати напору та можливість оптимізації систем пожежогасіння; [8] – формування теоретичних положень щодо удосконалення стаціонарних систем автоматичного водяного пожежогасіння; [9] – розроблення теоретичних основ формування розпиленіх струменів і шляхів підвищення їх ефективності; [11] – визначення реологічних характеристик розчинів поверхнево-активних речовин, дослідження їх структурних змін при зсувних деформаціях та особливостей поведінки в умовах пожежогасіння; [12] – участь у створенні спеціалізованих систем і компонентів техніки, зокрема оцінювання їх функціональних можливостей та гідравлічних характеристик; [14] – аналіз принципів роботи вібраційної пожежно-рятувальної техніки, проведення випробувань обладнання для формування пульсуючих струменів та оцінювання їх ефективності в гасінні пожеж; [15] – вивчення розподілу швидкості та тиску на початковій ділянці компактної частини струменя, визначення впливу геометрії насадки на структуру потоку; [16] – дослідження умов руху струменя на виході з насадки, зокрема пошук закономірностей стабілізації, руйнування та зміни форми водяного факела; [17] –

розроблення лабораторної установки для вимірювання параметрів повітряно-пінних стволів ежекційного типу, створення методики експериментів і формування критеріїв оцінювання якості піни; [18] – участь у створенні комбінованої системи виявлення й гасіння пожеж у житлових приміщеннях, включно з розрахунком характеристик подачі води та оцінюванням чутливості системи виявлення; [19] – дослідження доцільності використання кремнійорганічних покриттів для елементів пожежної техніки, оцінювання їх властивостей; [20] – аналіз особливостей течії в'язких рідин у насадках різних типів, визначення умов виникнення втрат енергії; [22] – проведення ексергетичного аналізу струминних потоків для визначення ефективності перетворення енергії та можливостей підвищення енергетичної віддачі систем подачі рідини; [24] – створення науково-експериментальної установки для дослідження водяних струменів з перспективою розроблення програм вимірювань та методів оцінювання структури потоку; [25] – дослідження гідродинамічних характеристик потоків у спеціальних пожежних стволах щільного типу, визначення впливу форми каналу на витратні показники та структуру факела; [26] – системний аналіз конструкцій і принципів формування струминних потоків у пожежогасінні, класифікація типів стволів і насадок; [27] – участь у створенні спеціальних струминоформувальних насадок, уточнення їх геометричних параметрів та оцінювання експлуатаційних характеристик; [29] – експериментальні дослідження потоків у каналах стаціонарних систем водяного пожежогасіння та оцінювання впливу гідравлічних втрат на роботу системи; [32] – проведення серії експериментів для вивчення течії рідини уздовж каналів у стаціонарних системах пожежогасіння та формування бази даних для подальших розрахунків; [33] – дослідження швидкості, тиску та турбулентності водяного струменя на виході зі ствола, визначення умов стабілізації потоку; [34] – виконання натурних експериментів для дослідження геометричних змін і деформацій пожежних рукавів під час подачі рідини, установлення закономірностей подовження; [35] – визначення повного комплексу реологічних властивостей різних піноутворювачів, аналіз їх стійкості та поведінки за різних температурних умов; [36] – дослідження ефективності систем пожежогасіння при використанні полімерних добавок, включно з аналізом зміни структури потоку та зменшення втрат тиску; [37] – аналіз деформацій пожежних рукавів при роботі зі стволом Protek-366 та встановлення залежностей між тиском, витратою та подовженням; [38] – опрацювання натурних вимірювань подовження експлуатованих рукавів; [40] – виконання розширених експериментальних досліджень гідродинаміки потоків зі змінною масою вздовж каналу, зокрема встановлення закономірностей перерозподілу маси та її впливу на стійкість течії; [41] – детальне визначення та кількісний аналіз змін геометричних параметрів пожежних рукавів під дією різних тисків та витрат води, а також формування узагальнених залежностей деформації; [42] – проведення експериментів із оцінювання структури, форми та просторової неоднорідності зон зрошення, сформованих стволом Protek-366, включно з визначенням впливу тиску; [43] – участь у створенні конструкції пожежного

стволо з підвищеною ефективністю формування струменя; [44] – розроблення способу генерування розпиленого потоку рідини та визначення його оптимальних параметрів; [45] – участь у створенні портативного піногенератора з удосконаленими характеристиками подачі піни; [46] – розроблення нової конструкції пожежного ствола з комбінованим механізмом формування струменя; [47] – участь у створенні мобільної установки для гасіння тонкорозпиленою водою та оцінюванні її працездатності; [48] – визначення ключових факторів впливу на гідродинаміку потоку в'язких рідин у пожежних стволах; [49] – аналіз параметрів гідравлічних потоків, що застосовуються у процесі пожежогасіння, з визначенням закономірностей зміни витрати та тиску; [51] – дослідження особливостей формування гідравлічних струменів низького тиску та умов їх стабільної роботи; [52] – участь у створенні та випробуванні експериментальної установки для генерування водяних струменів; [55] – визначення реологічних параметрів поверхнево-активних добавок і факторів, що впливають на піноутворення; [56] – аналіз можливостей регулювання газообміну під час пожежі шляхом використання спрямованих водяних струменів; [57] – дослідження процесів розпаду гідравлічних струменів низького тиску; [59] – додаткові експериментальні дослідження потоків зі змінною масою, уточнення моделей їх поведінки; [60] – визначення впливу стисливості рідини на динаміку тиску в системах пожежогасіння; [61] – дослідження особливостей формування імпульсних водяних струменів і їх застосування в спеціальних системах гасіння; [63] – аналіз характеристик низьконапірних струменів, визначення умов їх ефективної роботи; [64] – дослідження руху вогнегасних речовин крізь рукавні розгалуження та оцінювання додаткових гідравлічних втрат; [65] – участь у створенні методики визначення основних характеристик насосно-рукавних систем; [66] – розроблення пристрою з підвищеною витратою для формування розпиленої води й оцінювання його параметрів; [67] – визначення швидкісних характеристик струменя на виході зі ствола та встановлення факторів їх зміни; [68] – виконання натурних експериментів із визначення подовження рукавів типу Т в реальних умовах роботи.

Апробація результатів дисертації. Основні результати і окремі розділи роботи доповідались на науково-практичних конференціях, семінарах, симпозіумах та форумах різних рівнів, як всеукраїнських, так і міжнародних. Основні з них такі.

Міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (м. Черкаси, 2014, 2017-2020, 2023, 2024), Міжнародна науково-технічна конференція «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Київ, 2004, 2018; м. Львів, 2005; м. Мелітополь, 2007, 2010; м. Кременчук, 2008; м. Чернігів, 2012; м. Харків, 2016; м. Черкаси, 2017), Міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Київ, 2004, 2006, 2013, 2023, 2024; м. Краматорськ, 2005; м. Кременчук, 2008; м. Чернівці, 2009; м. Вінниця, 2011), Міжнародна конференція «Прогресивна техніка і технологія» (м. Севастополь, 2004–2007, 2010–2013; м. Київ, 2008, 2020, 2021), Міжнародна науково-технічна

конференція «Вібрації в техніці та технологіях» (м. Вінниця, 2004), Науково-технічна конференція, присвячена 60-річчю Національного транспортного університету (м. Київ, 2004), Науково-практична конференція «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення боєздатності пожежно-рятувальних підрозділів» (м. Харків, 2004), Міжнародна конференція UniTech (м. Габрово, Республіка Болгарія, 2005–2006, 2008–2019, 2023), Міжнародна конференція AmTech (м. Габрово, Болгарія, 2007), Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси, 2023), Міжнародна науково-практична конференція «Пожежна безпека» (м. Київ, 2005; м. Черкаси, 2007; м. Київ, 2013), Міжнародна науково-практична конференція «Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту» (м. Черкаси, 2008, 2010), 21 Всеукраїнська науково-практична конференція «Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах» (м. Київ, 2019).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 69 друкованих праць, в тому числі 7 статей у двох різних періодичних виданнях, що індексуються в наукометричній базі Scopus, 2 монографії, 29 наукових статей у наукових фахових виданнях, внесених до Переліку наукових фахових видань України, 4 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, 5 патентів України на корисну модель, 22 у матеріалах або збірниках тез доповідей вітчизняних і міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних скорочень, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Дисертація містить 411 сторінок друкованого тексту (з них 325 сторінок основної частини дисертації), 154 рисунки, 45 таблиць, 381 найменування у списку використаних джерел, 6 додатків на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, задачі, об'єкт і предмет досліджень, відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості щодо апробації та опублікування основних результатів досліджень.

У **першому розділі «Аналіз процесів генерування рідинних вогнегасних струменів»** проведено критичний аналіз сучасного стану наукових досліджень процесів формування водяних струменів та визначено особливості струминоутворення у різних типах гідравлічного пожежного обладнання, передусім у пожежних стволах й насадках.

Ефективність застосування різних типів гідроструменів пожежно-рятувальними підрозділами ОРС ЦЗ України під час використання пожежно-рятувальної техніки для гасіння пожеж та проведення аварійно-рятувальних робіт, спрямованих на локалізацію зон впливу небезпечних чинників, визначається сукупністю багатьох факторів. Серед них ключову роль відіграє відповідність параметрів сформованих вогнегасних гідроструменів тим, які

мають бути забезпечені у певний момент часу в конкретному місці. Це зумовлено особливостями динаміки розвитку пожеж і свідчить про те, що оптимальним з позиції ефективності застосування вогнегасних струменів є забезпечення можливості їх оперативного коригування – за видом, формою та параметрами відповідно до поточних умов розвитку пожежі.

Діапазон основних параметрів вогнегасних струменів, їхня структура та умови формування забезпечуються застосуванням широкої номенклатури гідравлічного струминного обладнання. Водночас питання особливостей гідродинаміки потоку у пожежних стволах, насадках та протипожежному гідравлічному обладнанні, а також відповідні теоретичні та експериментальні дослідження на сьогодні залишаються розрізненими та недостатньо систематизованими. Наразі відсутні надійні методики визначення кінематичних і динамічних характеристик водяних вогнегасних струменів за межами пожежних стволів і насадок та оцінювання впливу на них різноманітних конструктивних і режимних факторів.

Наразі відсутня достатньо обґрунтована відповідь на питання щодо розрахунку пульсуючих та імпульсних струменів, впливу аномалій в'язкості рідини, а також прогнозування процесів дроблення струменя та його розпилення. Існуючі теоретичні положення щодо механізмів відриву крапель від поверхні струменя та розвитку явищ у граничному шарі поки що не отримали повного експериментального підтвердження. Залишається також невирішеним завдання детального експериментального аналізу систем струминоформування у пожежогасінні.

У зв'язку з викладеним актуальним є проведення теоретичних та експериментальних досліджень вільних гідравлічних струменів, узагальнення результатів експериментального аналізу, а також розроблення єдиної методики розрахунку гідродинамічних параметрів систем формування водяних вогнегасних струменів із застосуванням пожежних стволів та насадок.

У другому розділі «Дослідження процесів генерування рідинних вогнегасних струменів» розглянуто питання гідроструминних технологій та процесів і особливостей генерування водяних вогнегасних струменів, конструктивні особливості пожежних стволів, насадок та гідравлічного пожежного обладнання, врахування особливостей руху вогнегасних струменів на виході з пожежного ствола, а також особливості проектування струминоформувальних насадок із різними профілями поперечного перерізу.

Відповідно до класифікації гідравлічного струминного обладнання, пожежогасіння можна розглядати як окрему технологічну операцію, що має свої особливості, порядок виконання та технічні засоби для її проведення. Зважаючи на це, процес гасіння пожежі повинен ґрунтуватися на певному порядку (технології) отримання вогнегасного струменя з необхідними характеристиками, що забезпечується застосуванням відповідних технічних засобів – пожежних стволів, насадок та гідравлічного пожежного обладнання.

Насадку розглянуто як канал, що забезпечує звуження потоку, а безпосередньо за її входом починається так звана гідравлічна початкова ділянка

$Z_{п.д.}$. Потік у насадці поділяємо на три ділянки (рис. 1): ділянку поза кільцевою ізольованою зоною; ділянкою, де спостерігається звуження потоку; ділянкою нестабілізованого потоку довжиною $Z_{п.д.}$. У межах $Z_{п.д.}$ спостерігається деформація епюри швидкостей між перерізами 3–3 та 4–4, зумовлена дією сил інерції внаслідок конвективного прискорення потоку. Вважаємо, що в межах цієї області виконується така нерівність

$$\left(\frac{\partial U_x}{\partial x}\right) \ll \left(\frac{\partial U_x}{\partial y}\right),$$

де $U_x = f(x, y)$ – поздовжня складова швидкості.

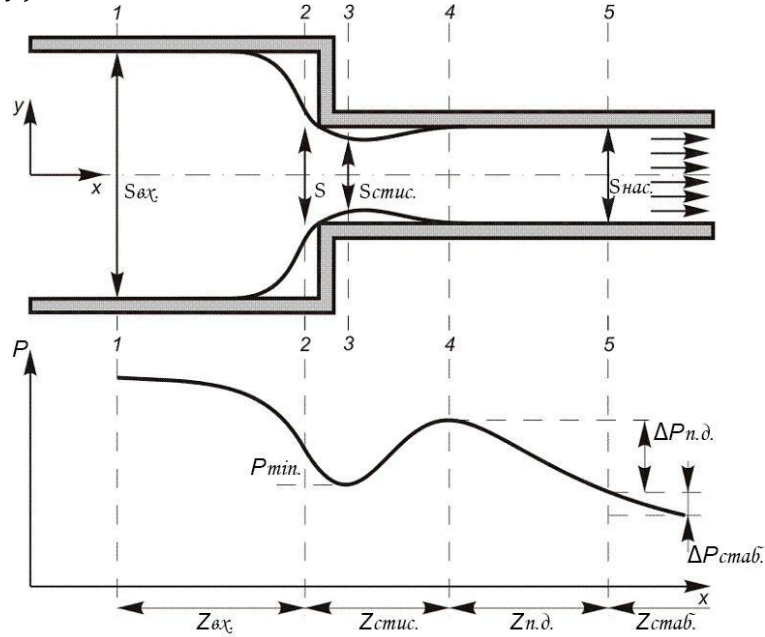


Рис. 1 – Схема потоку рідини (води) в насадці з позицій існування гідродинамічної початкової ділянки

На рис. 1 $S_{вх}$, $S_{стис.}$, $S_{нас.}$ – діаметри відповідно входу, зони стиснення та насадки, $P_{п.д.}$, P_{min} , $P_{стаб.}$ – тиск у зонах початкової ділянки, стиснення та стабілізації потоку.

У зв'язку із проявом сил інерції, зумовлених конвективним прискоренням, градієнт тиску на початковій ділянці є несталим, тобто $\partial P / \partial x \neq const$.

Це дало можливість для всієї даної зони вважати, що у ядрі потоку виконується умова:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{y=y_{ядра}} = -\rho U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + \left. \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right|_{y=y_{ядра}}, \quad (1)$$

де P – тиск рідини, Па, ρ – густина, кг/м^3 , τ_{xx} – нормальні напруження, $y_{ядра}$ – координата, що визначає ядро потоку на початковій ділянці. Перетворення рівняння руху дає змогу отримати такі залежності:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho g} \right) S_{стис} = \frac{-1}{g} \int \tau_{ст} dx - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha^k}{g} U_{сер}^2 \cdot S \right),$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{U_{\text{сер}}}{g} \right) S_{\text{стис}} = \frac{-1}{g} \int \tau_{\text{ст}} U_{\text{сер}} dx - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha^E}{g} U_{\text{сер}}^3 \cdot S \right),$$

а також

$$S(x) \frac{dU_{\text{сер}}}{dx} + U_{\text{сер}}(x) \frac{dS}{dx} = 0, \quad (2)$$

де $S_{\text{стис}}$ – площа потоку в стислому перетині, м^2 ; S – площа поперечного перерізу насадки, м^2 ; $U_{\text{сер}}$ – середня швидкість потоку в насадці; $\tau_{\text{ст}}$ – дотичні напруження, а коефіцієнти кількості руху та енергії визначаються формулами відповідно:

$$\alpha^k = \frac{\int_S U^2 dS}{U_{\text{сер}}^2 S} \quad \text{та} \quad \alpha^E = \frac{\int_S \Delta U_x^2(x, y) dS}{U_{\text{сер}}^2 S}. \quad (3)$$

Із аналізу поданих залежностей (2) випливає, що втрати енергії в насадках зумовлюються як дією сил інерції, так і дією сил в'язкого тертя, що підтверджує коректність методики розрахунку гідродинамічної початкової ділянки.

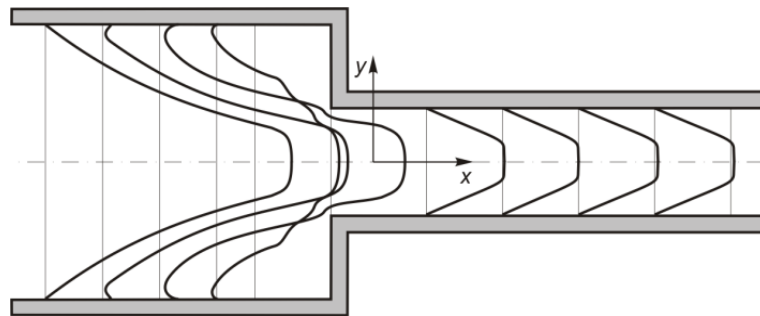


Рис. 2 – Деформація епюри швидкостей при раптовому звуженні потоку

Подібна картина має місце й за площиною раптового звуження потоку, де величина тиску швидко відновлюється. У загальному випадку для насадки, як каналу, що забезпечує раптове звуження потоку, мають місце чотири характерні точки-зрізи, дві з яких є екстремумами (рис. 1, точки 3 і 4).

Точка 2 – характерна точка при визначенні переходу від перетину потоку площею S до перетину площею $S_{\text{стис}}$. Точка 3 визначає ступінь розширення в області вторинних плинів, а точка 4 відповідає перетину, починаючи з якого формуються поля швидкостей у вузькій частині каналу, тобто на початковій ділянці $Z_{\text{п.д.}}$. Втрати тиску при раптовому звуженні й розширенні визначаються відповідно різницями $(p_2 - p_3)$ й $(p_3 - p_4)$.

Основними ділянками незатоплених струменів є компактна (у межах якої струмінь зберігає свою циліндричну форму), роздроблена та розпорошена. Ділянка Z_1 (рис. 3) є ядром струменя; Z_2 – початкова ділянка, на якій ще не спостерігаються поверхневі вихори рідини; Z_3 – основна ділянка струменя; Z_4 – ділянка струменя із втратою стійкості поверхні; Z_5 – ділянка повного розпаду струменя.

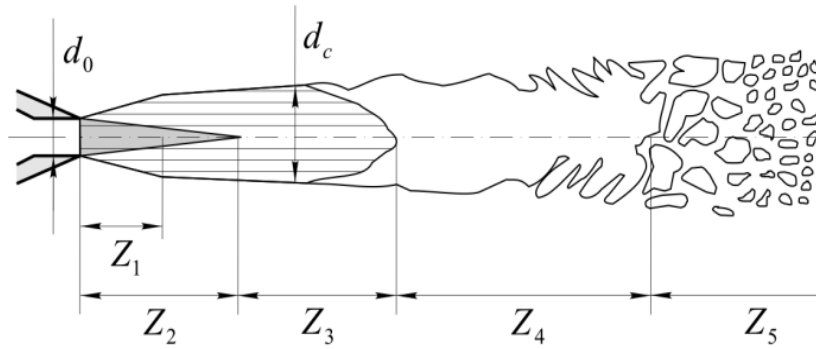


Рис. 3 – Схема структури вільного незатопленого турбулентного струменя

Був розглянутий випадок, коли рідина однорідна, тобто ньютонівська. Аналіз руху струменя на виході з насадки можна провести на основі теорії розмірностей. У результаті проведеного аналізу руху рідинних струменів у повітряному середовищі було встановлено, що сила F , з якою струмінь взаємодіє з перешкодою або осередком пожежі, залежить від середнього тиску струменя $P_{\text{сер}}$, визначеного в його перерізі площею S . Також сила F залежить від швидкості струменя на виході з насадки u_0 , діаметра насадки d_0 , густини повітря $\rho_{\text{пов}}$ і густини рідини ρ_r , динамічної в'язкості рідини μ і прискорення g . Зауважимо, що сила взаємодії струменя F залежить і від ряду інших факторів, які в кінцевому результаті не чинять істотного впливу на характер руху рідини, принаймні з позицій даного підходу:

$$F = f(P_{\text{сер}}, u_0, \mu, \rho_r, \rho_{\text{пов}}, S, d_0, g), \quad (4)$$

де u_0 , ρ_r та d_0 є величинами з незалежними розмірностями. Використовуючи метод аналізу розмірностей, отримано такі безрозмірні комплекси:

$$\Pi = \frac{F}{\rho_r u_0^2 d_0^2}, \Pi_1 = \frac{P_{\text{сер}}}{\rho_r u_0^2}, \Pi_2 = \frac{\mu}{\rho_r u_0 d_0}, \Pi_3 = \frac{g}{u_0^2} d_0, \Pi_4 = \frac{\rho_{\text{пов}}}{\rho_r}, \Pi_5 = \frac{S}{d_0^2}.$$

Фактично Π_1 – критерій Ейлера, який характеризує подібність струменів, де домінуючою є дія сил тиску,

Π_2 – критерій Re^{-1} , який визначає режим течії на виході з насадки,

Π_3 – критерій Фруда, що характеризує вплив масових сил на поведінку струменя,

Π_4, Π_5 – критерії, що характеризують вплив геометричних параметрів і властивостей середовища на характер руху струменя, а саме Π_4 вказує на вплив густинних властивостей рідини, а Π_5 – на зміну геометричних параметрів струменя залежно від відстані до насадки. Таким чином, дані критерії по суті характеризують силу взаємодії струменя з перешкодою, яка в безрозмірному вигляді виражається співвідношенням, де сила дії струменя віднесена до геометричних параметрів ствола.

Розглянуто випадок, коли рідина є аномально в'язкою, наприклад, підпорядковується закону Оствальда-де Віля. Рівняння (4) набуває вигляду:

$$F = f(P_{\text{сер}}, u_0, \mu, \rho_r, \rho_{\text{пов}}, S, d_0, g, k, \dot{\gamma}), \quad (5)$$

де k – консистентна стала ($\tau = k \cdot (\dot{\gamma})^n$), а $\dot{\gamma}$ – градієнт швидкості.

Використовуючи той самий підхід, що і для ньютонівських рідин, визначено для даного випадку систему критеріїв. Природно, якщо u_0 , ρ_p та d_0 є величинами з незалежними розмірностями, то новими будуть тільки два критерії Π_6 та Π_7 :

$$\Pi_6 = \frac{k \cdot u_0^n}{\rho \cdot d_0^{n+1}}, \Pi_7 = \frac{\dot{\gamma} \cdot d_0}{u_0}. \quad (6)$$

Детальний аналіз критеріїв (6) слугує основою для пояснення фізичних особливостей формування суцільних і розпорошених водяних вогнегасних струменів, сприяти отриманню рішення задачі якісного управління характером водяних вогнегасних струменів. Як видно зі співвідношень безрозмірних комплексів, багато з них є характеристиками пристроїв подачі рідини. Вони визначають зв'язки між силою взаємодії струменя та геометричними параметрами насадок, реологічними властивостями рідини, співвідношенням фізичних властивостей середовища (рідина-повітря) тощо.

Новими критеріями, які пропонується застосовувати для характеристики сили взаємодії струменя з перешкодою для рідинних осесиметричних вогнегасних струменів, є відношення густин повітря й вогнегасної рідини $\rho_{\text{пов}}/\rho_p$ та відношення площі перерізу струменя до квадрата вихідного діаметра пожежного ствола S/d_0^2 .

У третьому розділі «Аналіз чинників впливу на процес формування струменів» розглянуто питання аналізу систем струминоформування, що дає змогу стверджувати, що пожежний ствол або насадка є визначальними елементами процесу формування струменів із заданими параметрами. Слід розрізняти дві складові процесу струминоформування: технічні засоби, які безпосередньо забезпечують генерування водяних струменів, та навколишнє середовище, що суттєво впливає на параметри струменя, проте можливість керування струменем у ньому, на відміну від технічної складової, зведено до мінімуму.

Основними факторами впливу на параметри водяних струменів є реологічні особливості рідини, шорсткість внутрішнього каналу, конусність каналу, довжина гідродинамічної початкової ділянки, а також наявність відривних течій чи зон.

Як техніко-економічний параметр оптимізації, що дозволяє здійснювати регулювання процесу гідравлічного руйнування, прийнято енергію струменя E . Аналогічно як параметр оптимізації також обрано дальність генерування водяного струменя (за крайніми краплями).

Форми струменя при сталій витраті й різних кутах розпилення та при мінімальному куті розпилення й різних витратах наведено на рис. 4. Зліва: витрата – 475 л/хв; кут розпилення а – мінімальний, b = 15°, c = 30°, d = 110°.

Справа: кут розпилення – мінімальний, витрата а – 115 л/хв, б = 230 л/хв, с = 360 л/хв, d = 475 л/хв.

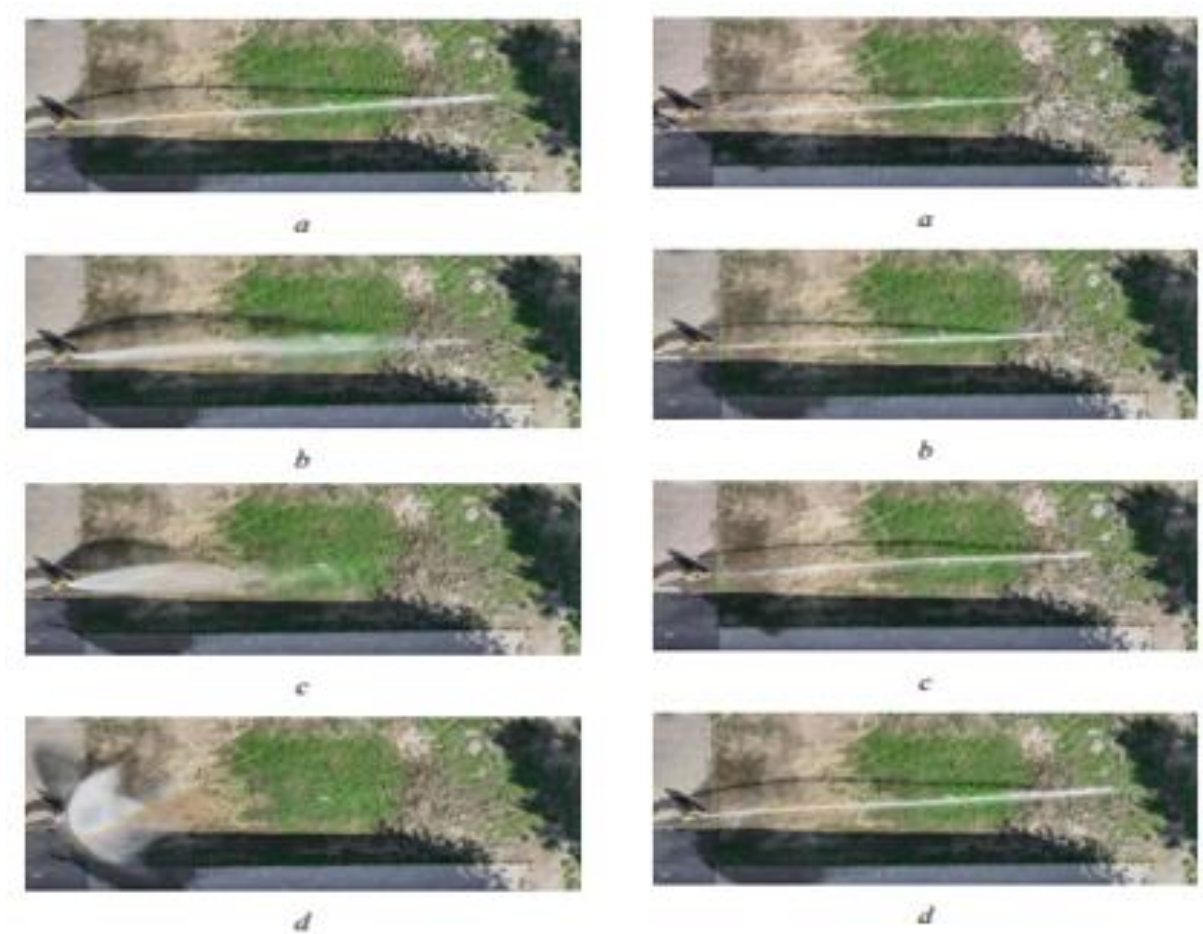


Рис. 4 – Залежність довжини струменя від кута розпилу й витрати рідини

Наведено приклади основних типів насадок у системах формування струменів, які досліджувалися у даній роботі (рис. 5), де D_0 – вхідний діаметр, θ – конусність каналу.

Основними характеристиками насадок є коефіцієнти витрати μ , стискання ξ та швидкості φ . Коефіцієнт витрати μ в загальному випадку для насадок є функцією критеріїв Рейнольдса (Re); Фруда (Fr) і Вебера (We), які взаємопов'язані через параметр p , а також відношення довжини каналу до його діаметра Z/D , тобто:

$$\mu = f(Re, Fr, We, Z/D), \quad (7)$$

де $Re = D/\nu \sqrt{2p/\rho}$; $Fr = 2p/(\rho g D)$; $We = 2pD/\sigma$; $p = \rho g H$;
 ν – кінематична в'язкість води, м²/с;
 H – напір перед насадкою, м;
 σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м.

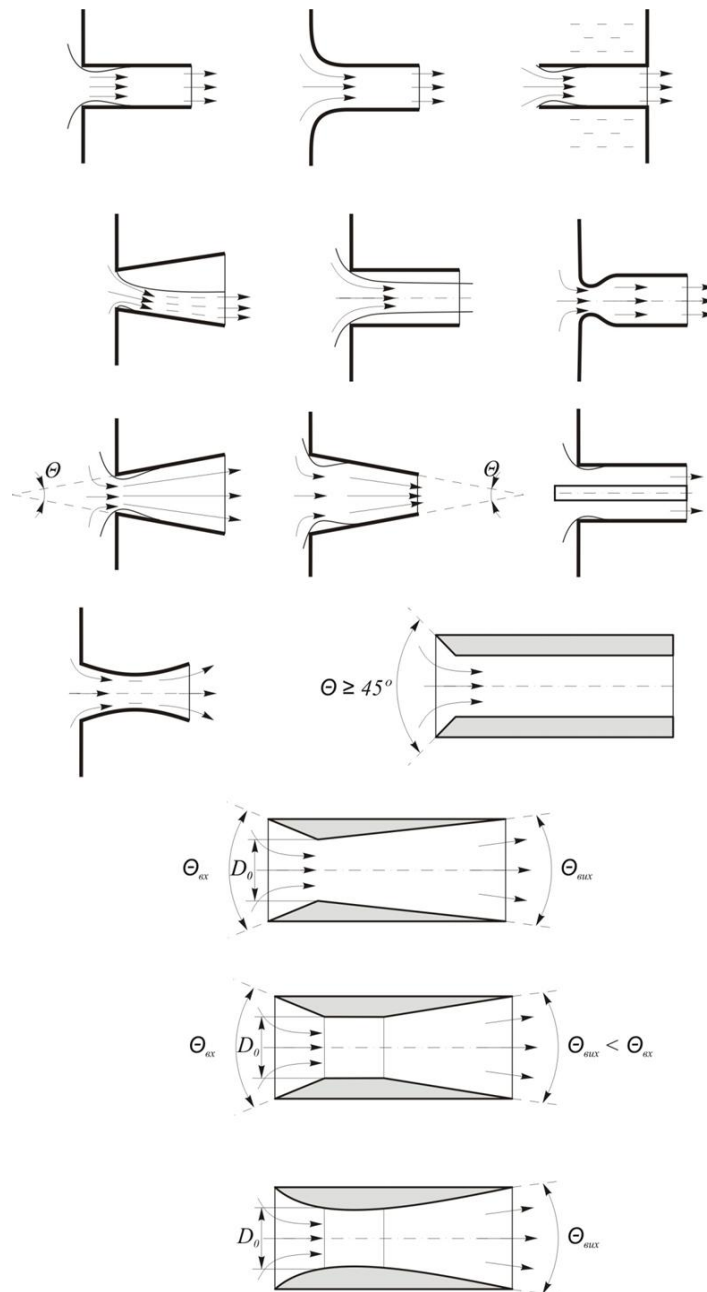


Рис. 5 – Схематичний вигляд різних типів насадок з круговими поперечними перерізами

Скориставшись кореляційним аналізом для зменшення числа вихідних параметрів, тобто для обґрунтованого зменшення розмірності факторного простору та скорочення кількості експериментів, визначено основні фактори, що впливають на величину енергії струменя E : вхідний тиск p_0 , МПа; вихідний діаметр насадки d_0 , м і витрата рідини Q , л/с. У результаті планування експерименту отримане рівняння математичної моделі $\hat{y} = 1244 + 192x_1 + 149x_2 + 77x_3 + 22x_2x_3 + 66x_1x_2x_3$, де x_1, x_2, x_3 – відповідно кодовані значення факторів витрати рідини Q , діаметра насадки d_0 та вхідного тиску системи p_0 . У моделі коефіцієнти $b_1 = 192$, що відповідає фактору x_1 (витрата рідини), і $b_2 = 149$, що відповідає фактору x_2 (діаметр вихідного отвору насадки) чинять найбільший вплив на параметр оптимізації. Використовуючи критерій

Стьюдента, зроблено висновок, що результати повторних дослідів можна вважати статистично достовірними, а перевірку однорідності дисперсій виконано за критеріями Фішера та Кохрена.

Для пожежних стволів й насадок, з урахуванням режимів їх експлуатації, практично важливим буде випадок, коли $Re \geq 10^5$. Встановлено, що коефіцієнт витрати насадки μ пожежного ствола має максимум, який зі збільшенням числа Re зникає, і при $Re \geq 10^5$ значення коефіцієнта μ стабілізується в межах 0,97–0,98.

Результати проектування насадок, залежно від режимів їх функціонування, суттєво впливають на характеристики формованих струменів і фактично визначають їх. Це особливо характерно для неньютонівських рідин, для яких основними параметрами потоку в насадках є довжина каналу та його діаметр, продуктивність (витрата) і перепад тиску між входом і виходом. Зазначені величини зазвичай розглядаються як функції в'язкості, температури та густини рідини.

В загальному вигляді для насадок можна використовувати критеріальну залежність у вигляді $\varphi = f(Ho, Fr, Eu, Re) = 0$, де окрім критеріїв гомохромності Ho , Фруда Fr й Ейлера Eu , присутній критерій Рейнольдса Re (окрема для рідин, що відповідають закону Оствальда–де Віля). При описанні витікання рідини із циліндричних насадок можна знехтувати силою тяжіння, тобто критерієм Фруда й для стаціонарного випадку записати $\varphi_1 = (Eu, Re, Wi) = 0$.

Структуру потоку в насадці в цьому випадку можна описувати на основі уявлень про гідродинамічну початкову ділянку, а геометричні параметри насадки визначати з урахуванням довжини гідродинамічної початкової ділянки $Z_{п.д.}$, яка в загальному випадку може бути функцією не тільки числа Рейнольдса Re , але й числа Вайссенберга Wi .



Рис. 6 – Приклади насадок із квадратним, кругло гвинтовим і щілинним перерізами

Серед конструкцій струминоформувальних пристроїв, що мають некруглий поперечний переріз вихідного отвору слід окремо виділяти плоскощілинні насадки (рис. 7). Вони відрізняються конструктивними особливостями, сферами застосування й режимами експлуатації.

У результаті серії експериментів із використанням насадки зі щілинним отвором було відзначено формування водяної завіси з помітною нерівномірністю товщини захисної перепони (рис. 7,б). Отримані результати підкреслили необхідність створення пристроїв, що забезпечують рівномірний розподіл витрати струменя по всій ширині щілинного отвору.

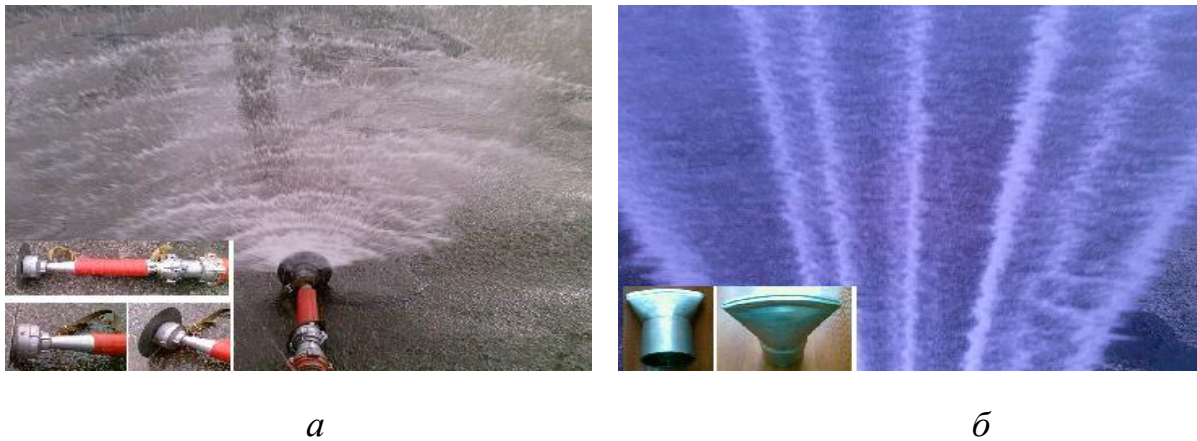


Рис. 7 – Формування водяної завіси щілинною насадкою-прозпилювачем РВ-12 (а) й плоскощілинною насадкою (б)

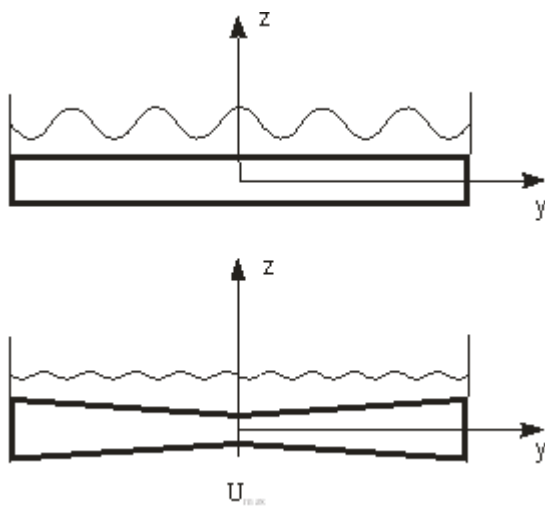


Рис. 8 – Форма вихідного отвору щілинного типу

Здійснено гідродинамічний розрахунок щілинних насадок із застосуванням рівняння руху потоку в каналі з некруглою формою поперечного перерізу. Для щілинних насадок при робочому тиску $P = 0,2 \dots 0,6$ МПа та витраті $Q = 1,7 \dots 7,4$ л/с експериментально встановлено залежність форми струменя від особливостей геометрії вихідного отвору. Так, незначне (до 12 %) звуження висоти струминоформувального каналу (вісь z , рис. 8) вздовж напрямку руху рідини призводило до покращення рівномірності розподілу витрати по ширині вихідного отвору (вісь y , рис. 8).

Серед методів підвищення довговічності стволів і насадок було обрано застосування покриттів внутрішньої порожнини струминоформувального обладнання. У дослідженнях використовувалися кремнійорганічні покриття на основі полісілоксанового ланцюга, що складається з почергово розташованих атомів кремнію (Si) та кисню (O).

Необхідно зазначити, що подібні покриття мають водовідштовхувальну дію, є біологічно інертними та забезпечують достатньо високий кут змочування, що є важливим при вирішенні задач зі зменшення гідравлічних опорів.

В дослідках кут змочування отриманої поверхні складав $90^{\circ}3' \dots 102^{\circ}24'$.

Втрати напору в каналах досліджуваних стволів РС-50 з кремнійорганічним покриттям були меншими, ніж у сталевих трубах до 3,3 разу, а розкид значень нормального радіуса хмари розпилу струменя вдалося зменшити з 39 % до 29%

(рис. 9, сіра зона). Верхньому графіку на рис. 9 відповідають значення нормальних радіусів R хмар розпилу струменів (в порядку зростання значень) для 10-ти стволів, а нижньому – для тих самих стволів з кремнійорганічним покриттям.

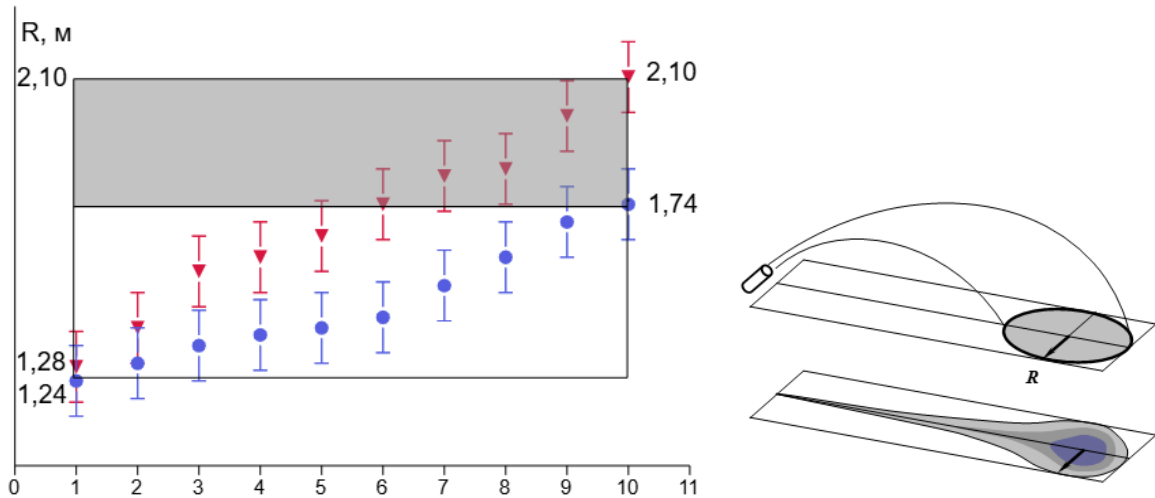


Рис. 9 – Нормальний радіус R хмари розпилу струменя

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів залежно від форми поверхні після нанесення кремнійорганічного покриття

Без покриття				
з оргскла	34,395	-0,437	0,0017	0
нова стальна	269,161	-9,750	0,123	0
З покриттям				
$\alpha = 90^\circ 3'$	62,140	-2,126	0,026	0
$\alpha = 95^\circ 11'$	90,404	-3,369	0,046	0
$\alpha = 98^\circ 6'$	105,465	-3,430	0,038	0,0150
$\alpha = 102^\circ 24'$	149,854	-4,900	0,058	0,0023

Сталеві труби з покриттями зазначеного типу використовувалися для визначення гідравлічних опорів потоків в'язких та аномально в'язких рідин як у ламінарному, так і в турбулентному режимах. Як робочі рідини застосовувалися вода та водні розчини карбоксиметилцелюлози. Використовувалися сталеві труби з різними значеннями шорсткості. Залежно від типу покриття можна було змінювати кут змочування α .

Розв'язання задачі формування водяних завіс було забезпечене шляхом застосування спеціальних плоскощілинних насадок як кінцевих елементів системи генерування водяного потоку. Основною проблемою при конструюванні плоскощілинних насадок було зменшення нерівномірності потоку по ширині насадки або забезпечення необхідного параметра однорідності струменя чи завіси $V \cdot I$, що визначається відношенням $V \cdot I = Q_{min}/Q_{max}$, де Q_{min} та Q_{max} – відповідно мінімальна і максимальна локальні витрати на виході з струминоформувального каналу, $V \cdot I$ – індекс різновтовщинності.

У четвертому розділі «Формування імпульсних та пульсуючих вогнегасних рідинних потоків» розглянуті пульсуючі й імпульсні потоки. Серед основних їх переваг необхідно відзначити зменшення витрат рідини за практичної відсутності зниження ефективності пожежогасіння порівняно з суцільними струменями, високий коефіцієнт ексергії, підвищену здатність до розпорошення струменів.

Створення пульсуючих та імпульсних потоків забезпечене застосуванням у системі генерування вогнегасних струменів окремого елемента – генератора пульсацій. Розробка методів розрахунку та створення вогнегасних струменів дозволило реалізувати принцип накладення нестационарних пульсацій на стаціонарний потік. Вплив нестационарних пульсацій на процес розпаду струменя був описаний з використанням уявлень про хвильовий рух на поверхні рідини, запропонованих В. Г. Левічем.

Виділено п'ять основних типів генераторів імпульсних струменів (залежно від принципу дії та способу генерування струменя): клапанні, поршневі, роторні, гідроударні та кумулятивні.

Питання руху в'язкої рідини в циліндричному стволі з круговим поперечним профілем висвітлено відповідно до робіт для ламінарного пульсуючого руху Л. Г. Лойцяньського. Диференціальне рівняння для ламінарного нестационарного руху в циліндричному стволі з круговим поперечним профілем, записане у циліндричних координатах (якщо направити вісь руху рідини вздовж осі насадки Oz, а серед компонент u, v, ω вважати відмінною від 0 тільки осьову компоненту швидкості), відповідно до рівнянь Нав'є–Стокса для ізотермічного потоку, коли густина ρ і коефіцієнт в'язкості μ є сталими, а розподіл швидкостей у стволі:

$$\omega(r, t) = \frac{A}{\omega} \cdot \left\{ \left[1 - \frac{bei\left(a \cdot \sqrt{\frac{\omega}{v}}\right) \cdot bei\left(r \cdot \sqrt{\frac{\omega}{v}}\right)}{ber^2\left(a \cdot \sqrt{\frac{\omega}{v}}\right) + bei^2\left(a \cdot \sqrt{\frac{\omega}{v}}\right)} - \frac{ber\left(a \cdot \sqrt{\frac{\omega}{v}}\right) \cdot ber\left(r \cdot \sqrt{\frac{\omega}{v}}\right)}{ber^2\left(a \cdot \sqrt{\frac{\omega}{v}}\right) \cdot bei^2\left(a \cdot \sqrt{\frac{\omega}{v}}\right)} \right] \cdot \sin(\omega t) + \right. \\ \left. + \frac{bei\left(a \cdot \sqrt{\frac{\omega}{v}}\right) \cdot ber\left(r \cdot \sqrt{\frac{\omega}{v}}\right) - ber\left(a \cdot \sqrt{\frac{\omega}{v}}\right) \cdot bei\left(r \cdot \sqrt{\frac{\omega}{v}}\right)}{ber^2\left(a \cdot \sqrt{\frac{\omega}{v}}\right) \cdot bei^2\left(a \cdot \sqrt{\frac{\omega}{v}}\right)} \cdot \cos(\omega t) \right\}. \quad (8)$$

Рівняння записане з врахуванням, що рух осесиметричний. У момент часу $t = 0$ початкова умова $\omega = \omega_0(r)$, а гранична умова – $\omega = 0$ для точки $r = a$ (a – радіус внутрішньої поверхні ствола). Сталий пульсуючий рух описується залежністю $f(t) = \rho A \cos(\omega t)$, функції Кельвіна $ber(x)$ та $bei(x)$ – дійсні й уявні частини бесселевої функції нульового порядку від комплексного аргументу.

Аналіз роботи генераторів пульсацій проведено на основі теорії розмірностей. На підставі аналізу принципів роботи поршневих генераторів імпульсних струменів та результатів випробувань деяких із них можна записати:

$$u = f(n, \rho, \nu, p, N, Q, n_i, \delta), \quad (9)$$

де n, ρ, ν є величинами, які мають незалежні розмірності. Здійснюючи нескладні розрахунки, отримуємо безрозмірні комплекси:

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{u}{\sqrt{n\nu}}, \Pi_1 = \frac{p}{n\rho\nu}, \Pi_2 = \frac{N}{\rho\nu^2\sqrt{n\nu}}, \\ \Pi_3 &= \frac{Q\sqrt{n^3}}{\sqrt{\nu^3}}, \Pi_4 = \frac{n_i}{n}, \Pi_5 = \frac{\delta\sqrt{n}}{\sqrt{\nu}}, \end{aligned} \quad (10)$$

де u – швидкість струменя на виході генератора, м/с; p – тиск спрацювання клапана, Па; N – потужність генератора, Вт; Q – об'єм разового викиду речовини, м³; n та n_i – відповідно частота обертання приводного валу і частота імпульсів, с⁻¹; ν – в'язкість речовини, м²/с, δ – зазор між поршнем і циліндром, м.

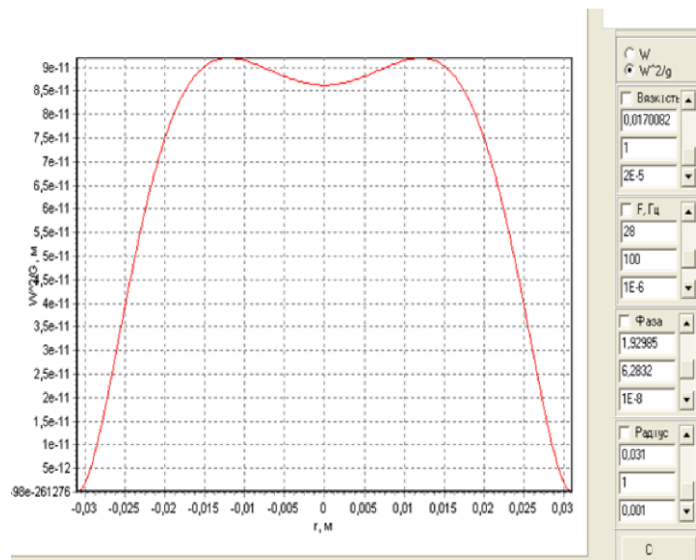


Рис. 10 – Приклад моделювання потоку в насадці, абсциса – радіус каналу, м.

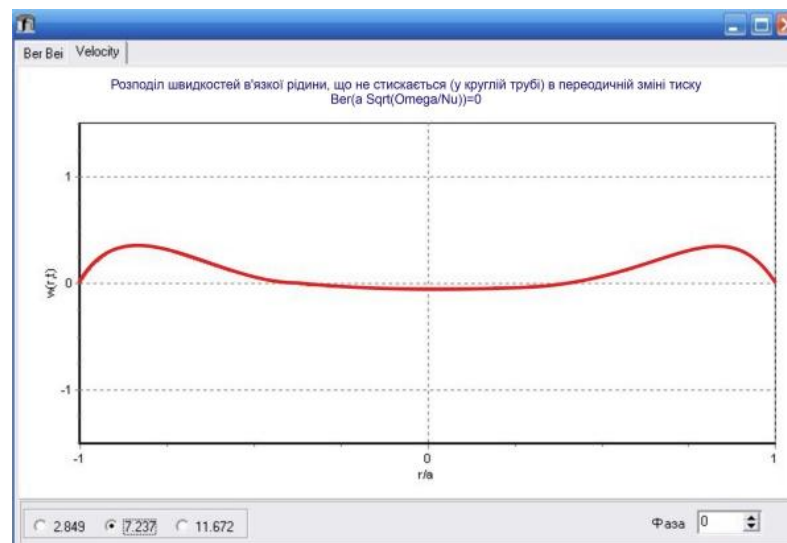


Рис. 11 – Приклад роботи програми моделювання потоку в каналі Tube1.1[©]

Для одержання максимального ефекту дії струменя за показником його ударної сили, що забезпечує необхідну дальність генерування струменя, форма епюри в межах ядра струменя на виході з насадки повинна бути наближеною до прямокутної. Максимальні розміри площі прямокутника свідчать про максимальну кінетичну енергію струменя, що досягається шляхом добору його параметрів (у першу чергу фази й частоти).

Кожен із елементів системи транспортування рідини (двигун – насос – рукав – ствол) чинить вплив на загальний рівень ексергії, спричиняючи додаткові втрати внаслідок тертя, теплових втрат, турбулентності потоків та інших незворотних процесів. У сукупності ці фактори визначають ефективність транспортування рідини та ступінь корисного використання її енергетичного потенціалу.

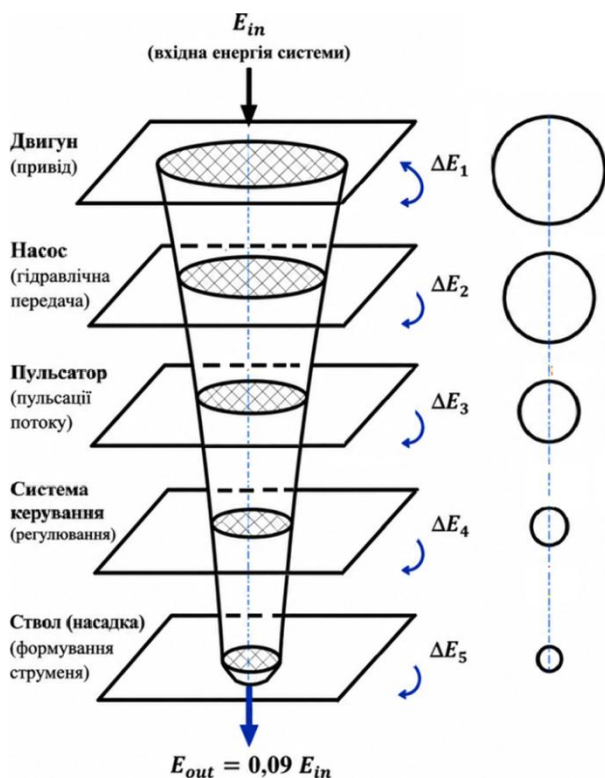


Рис. 12 – Каскадні енергетичні втрати в системі генерування потоків

При цьому певне зменшення втрат енергії можна забезпечити у рукавній лінії та пожежному стволі.

Подана схема (рис. 12) дає можливість зрозуміти значимість кожного і-блоку у формуванні системи передачі енергії від двигуна автоцистерни до моменту повного розпилу струменя. Використовувана у вітчизняній протипожежній техніці система дозволяє передавати близько 9 % енергії порівняно з ідеалізованою системою генерації потоків:

$$K_{\text{двиг}} \cdot K_{\text{насос}} \cdot K_{\text{пульс}} \cdot K_{\text{керув}} \cdot K_{\text{ствол}} = 0,35 \cdot 0,3 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,95 \approx 0,09.$$

У п'ятому розділі «Аналіз гідродинамічних особливостей потоку в'язкої рідини в системі «пожежний ствол – вільний струмінь»» розглянуто питання залежності характеристик гідравлічних струменів від особливостей гідравлічного пожежного обладнання, яке їх формує, варіанти традиційних струменів та струменів з некруглим поперечним перерізом, а також змішуваних течій. Оскільки після витікання вогнегасного гідравлічного струменя з пожежного ствола впливати на нього суттєво ускладнено, усі його характеристики мають бути сформовані ще на етапі проходження рідини внутрішніми каналами пожежного обладнання.

Характер розподілу динамічних тисків по перерізу струменя рідини на виході з насадки визначається закономірностями взаємодії водяного потоку, що рухається з певною швидкістю в повітряному середовищі. Для перерізу струменя на виході з пожежного ствола характерним є приблизно рівномірний розподіл динамічних тисків, близький до прямокутної епюри. При віддаленні струменя від насадки розподіл динамічних тисків поступово змінюється внаслідок криволінійного розподілу векторів поздовжніх швидкостей у периферійних частинах струменя.

При цьому швидкості та динамічні тиски розподіляються в перерізах струменя відповідно до закону Гауса $u/u_{oc} = \exp(-\varphi(r_x/r_{0,5})^2)$, $p_x/p_{oc} = \exp(-\varphi(r_x/r)^n)$, де u – швидкість струменя на відстані r_x від осі; r – радіус струменя в досліджуваному перерізі; $r_{0,5}$ – радіус струменя в точці, де швидкість становить половину осьової швидкості; u_{oc} – осьова швидкість струменя в певному перерізі; p_x та p_{oc} – відповідно динамічний тиск струменя в досліджуваній точці й осьовий динамічний тиск у цьому ж перерізі; φ – емпіричний коефіцієнт; n – показник степеня, який для водяних струменів дорівнює 2.

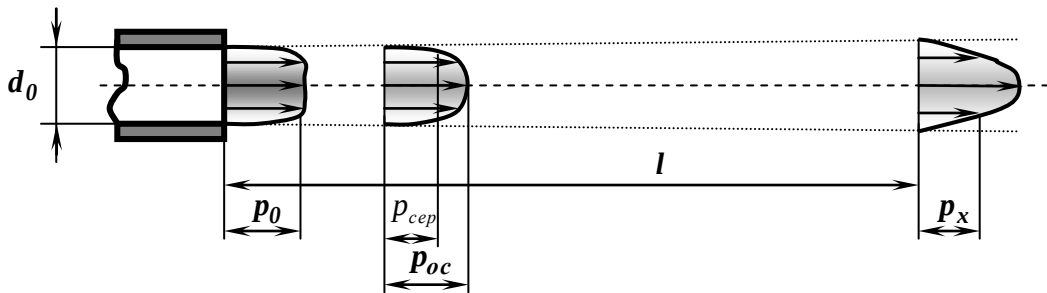


Рис. 13 – Тиски на гідродинамічній початковій ділянці компактної частини струменя на виході з насадки

В межах (11, а) та за межами (11, б) початкової ділянки рівняння середнього динамічного тиску струменя можуть бути подані у безрозмірному вигляді:

$$\begin{aligned} p_{cер}/p_0 &= 1,45(10^6 \cdot d_0/(l \cdot Re))^{0,2} \text{ (a),} \\ p_{cер}/p_0 &= 194(10^6 d_0/(l \cdot Re))^{1,22} \text{ (б),} \end{aligned} \quad (11)$$

де $p_{cер}$, p_0 – відповідно середній динамічний і початковий тиск струменя, Па; d_0 – діаметр насадки, м; l – відстань від насадки до досліджуваного перерізу по осі руху струменя, м. Відповідно до пропозицій Мерзлякова В. Г. та Бафталовського В. Є. безрозмірний параметр ld_0^{-1} може бути використаний як надійний узагальнюючий параметр для зазначених струменів.

Визначення параметрів гідродинамічної початкової ділянки компактної частини струменя на виході з насадки для струменів з некруглим поперечним перерізом може забезпечувати формування плоскої струминної течії, яка переходить у плівкову течію по вертикальних охолоджуваних поверхнях. Така течія є високоефективним засобом інтенсифікації теплообмінних процесів,

важливих для забезпечення пожежної безпеки певних технічних засобів і технологічних процесів, зокрема для рівномірного охолодження великих площ вертикальних поверхонь зовнішніх стінок ємностей з горючими речовинами.

Слід враховувати, що при послідовному розташуванні зрошувачів уздовж трубопроводу живлення для забезпечення рівномірності їх витрат необхідно розв'язувати задачу дискретного відбору рідини. В іншому випадку витрата першого та останнього зрошувача може суттєво відрізнятись.

Схема течії за таких умов може бути представлена, як показано на рис. 14. Обравши систему координат xu (x – вертикальна координата) рівняння руху можуть бути представлені у вигляді:

$$(\vec{u}\nabla\vec{u})_x = g_x - \left[\text{grad} \frac{p}{\rho} \right]_x + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}; \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0, \quad (12)$$

де $\vec{u}(u_x, u_y)$ – вектор швидкості; g_x – прискорення вільного падіння, м/с^2 , τ – дотичне напруження, Па; τ_{xx} та τ_{xy} – складові тензора напружень, Па.

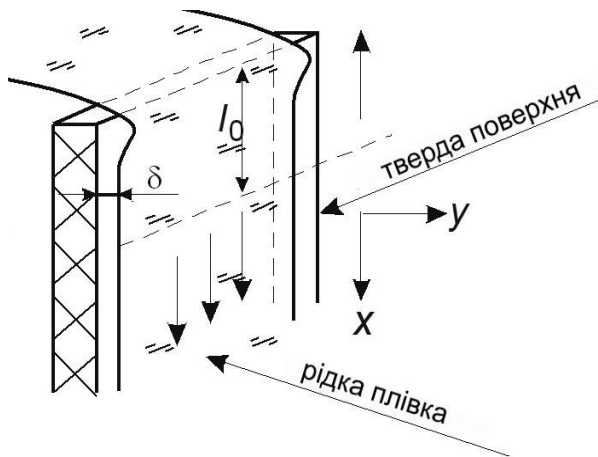


Рис. 14 – Схема плівкової течії по вертикальній гладкій поверхні

Розв'язання рівнянь (12) дозволяє визначити дві основні характеристики плівкової течії: товщину стікаючої плівки δ та витрати зрошення поверхні Q . Для встановлення залежності між товщиною стікаючої рідини δ й швидкістю u_x , можна використати співвідношення, отримані Воронцовим Є. Г. та Яхно О. М.

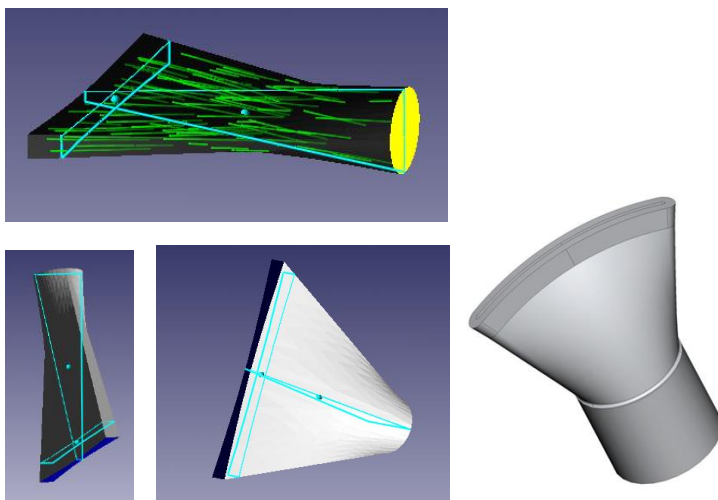


Рис. 15 – Модель щілинної насадки для формування рівнотовщинної плівки

Розрахункова модель щілинної насадки була опрацьована у спеціалізованому програмному комплексі для чисельного моделювання стаціонарних і нестаціонарних потоків рідини й газу. Подібно до щілинної насадки дослідження проводилися й для інших типів насадок з конусністю каналу 0° , а також 5° (відповідно – нижній та середній ряди, рис. 16).

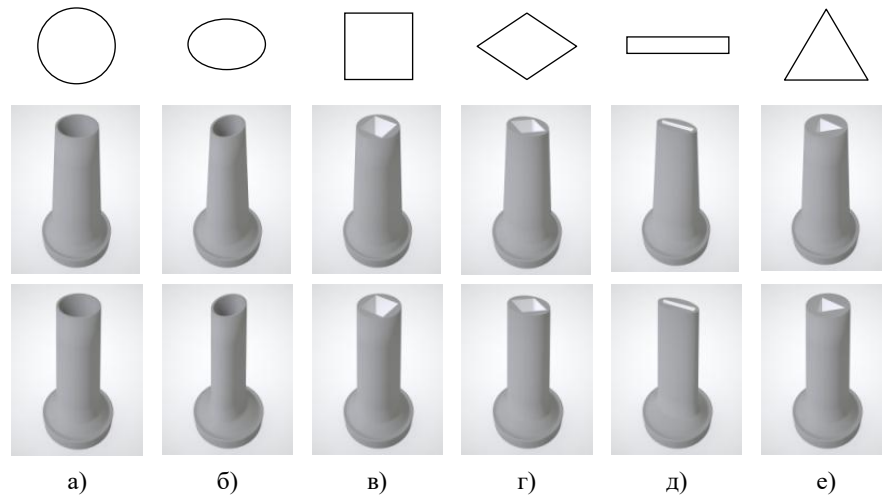


Рис. 16 – Основні типи досліджуваних насадок (за формою вихідного отвору а – кругла; б – овальна; в – квадратна; г – ромбова; д – щілинна; е – трикутна) з конусністю каналу $\theta = 5^\circ$ (другий ряд) та $\theta = 0^\circ$ (третій ряд)

Оскільки струмінь рухається в газовому середовищі, в'язкість якого суттєво нижчою, ніж у вогнегасної рідини, в'язкістю газу з деяким наближенням можна знехтувати. Шорсткість (нерівності), що утворюються на поверхні рідини будь-яким способом, мають тенденцію до зростання. Чим більша швидкість відносного руху, тим сильніше проявляється цей ефект. У разі зростання амплітуди шорсткостей на поверхні струменя це сприяє полегшенню умов відриву крапель від його поверхні. Для такого випадку показано, що довжина суцільної частини струменя $z_{\text{суц}}$ може бути обчислена:

$$z_{\text{суц}} \approx Tu_{\text{пов}} \approx \sqrt{\frac{\rho}{\rho_{\text{пов}}}} \cdot a \approx 30a, \quad (13)$$

де T – час, с; ρ – густина рідини, кг/м^3 ; $\rho_{\text{пов}}$ – густина повітря, кг/м^3 ; a – вихідний діаметр, м.

Критерії, які можуть бути використані для різних довжин струменя за наявності зовнішніх сил, а саме сили тяжіння, відцентрової сили та інерційних сил:

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu}; Bo = \frac{\rho_2 g d^2}{\sigma}; We = \frac{\rho u^2 d}{\sigma}; \frac{\rho_1}{\rho_2}; \frac{\mu_1}{\mu_2}, \quad (14)$$

У цих критеріях прийняті такі позначення: u – швидкість суцільного середовища (газу, повітря), м/с ; ρ_1, ρ_2 – густини відповідно газу та рідини, кг/м^3 ; μ_1, μ_2 – динамічні в'язкості відповідно газу та рідини, $\text{Па}\cdot\text{с}$; d – характерний діаметр крапель, м; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м .

У шостому розділі «Фізичне моделювання гідравлічної системи формування рідинних вогнегасних струменів» розглянуті питання розробки, створення та застосування лабораторних установок з метою проведення

гідродинамічних випробувань та дослідження вогнегасних струменів. Моделювання здійснювалося на установках, які зберігали природу явищ при фізичній подібності. При проведенні фізичного моделювання на створених установках між процесами в об'єкті-оригіналі (системі пожежогасіння) і в моделі виконувалися співвідношення подібності, що впливали зі схожості фізичних явищ і режимів роботи реального об'єкта та лабораторних установок. Установки створювалися й експлуатувалися в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля та Національному університеті цивільного захисту України упродовж останніх 20 років за участі автора цієї роботи.

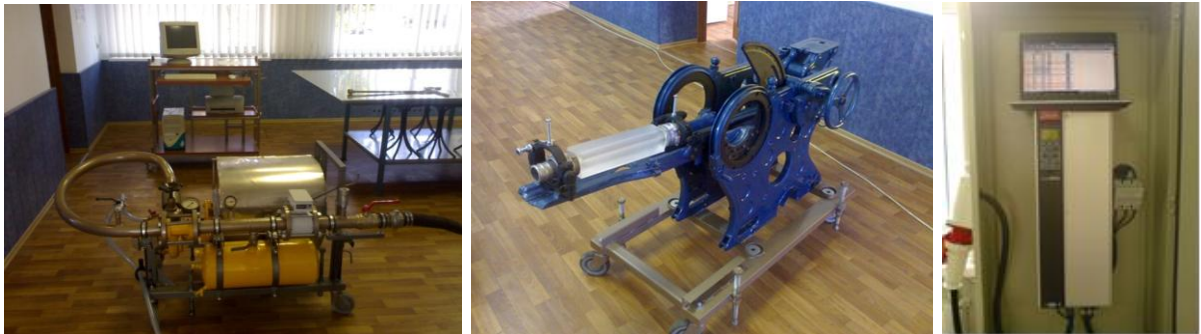


Рис. 17 – Блоки генерування, формування, керування й оброблення інформації експериментального стенда для генерування водяних струменів

При створенні лабораторних установок важливим моментом було створення окремого модуля, головним завданням якого було забезпечення збору експериментальних даних та їх оброблення сучасними засобами обчислювальної техніки.



Рис. 18 – Стенд моделювання течії рідини із змінною вздовж потоку масою

Використання спеціального обладнання та авторського програмного забезпечення дозволило скоротити кількість експериментів і час їх проведення, оскільки вдалося здійснювати «плавну» зміну режимів роботи установок під час їх функціонування при постійному знятті вихідних даних експериментів.

У такий спосіб суттєво спростилася задача пошуку оптимальних режимів роботи установок.

Подовження напірних пожежних рукавів (далі – НПР) призводить до зростання гідравлічних втрат, що зумовлює збільшення енергії, необхідної для транспортування вогнегасної рідини. Врахування цих втрат є необхідним для коректного ексергетичного аналізу системи подачі та формування вогнегасних струменів, оскільки саме рукавна лінія спричиняє значну частку загальної ексергійної деструкції.



Рис. 19 – Фрагменти експериментів з визначення подовження напірних пожежних рукавів

Для шести однотипних латексованих НПР діаметром 77 мм та середньою довжиною 1960 см розкид величини подовження становив близько 12 % (73, 77, 79, 81, 82, 83 см). Для шести латексованих НПР діаметром 51 мм розкид величини подовження становив близько 9 %. При використанні пожежного ствола Protek 366 максимальне подовження було зафіксоване при генеруванні потоку вогнегасної рідини з використанням латексованого рукава діаметром 77 мм при тиску на його вході 1,0 МПа та витраті 1,9 л/с. Зміна довжини становила 830 мм. Подовженню латексованого рукава діаметром 77 мм на 79 см відповідав тиск на його вході 0,8 МПа, а сила, що забезпечувала такий розтяг F , становила 2,04 кН.

У пожежних рукавах, як правило, реалізується турбулентний режим течії з розвиненою структурою вихорів, а основні втрати напору зумовлені в'язкісним тертям, турбулентним переносом імпульсу та взаємодією потоку з внутрішньою поверхнею рукава. У рівнянні Нав'є–Стокса для нестисливої рідини саме дисипативний член, пов'язаний із в'язкісними напруженнями, визначає інтенсивність цих втрат і характеризує перетворення механічної енергії потоку на необоротно розсіяну енергію.

Частина енергії, яка повинна забезпечувати транспортування вогнегасної речовини рукавними лініями, втрачається на розтяг та утримування рукавної лінії в розтягнутому стані. Для встановлення факту розтягу та отримання значень динамічних зусиль, що спричиняють розтяг НПР, застосовувалися методи емпіричного дослідження, а саме: спостереження, вимірювання та експеримент.

Зменшення енерговитрат на транспортування рідин пожежними рукавами може бути забезпечене шляхом зменшення гідравлічних втрат за рахунок додавання поверхнево-активних речовин до транспортованих рідин.

Для проведення експериментів були відібрані випадковим чином напірні пожежні рукава з латексним покриттям діаметром 51 мм. Довжина рукавної лінії становила 200 м, температура навколишнього середовища становила близько 20 °С, тиск на насосі становив 4...6 бар. Застосовувалися вода та вода із додаванням піноутворювачів «Пірена-1», «Софір», «Альпен» та «Барс».



Рис. 20 – Фрагмент експерименту з дослідження енергетичних втрат при транспортуванні вогнегасних рідин

Максимальне зростання витрати (11,5 %) було зафіксовано при додаванні 0,021 % піноутворювача «Барс».

Водночас зростання спостерігалось лише у вузькому діапазоні концентрацій доданого піноутворювача, а для інших піноутворювачів не можна стверджувати про збільшення витрати рідини, оскільки воно не перевищує похибку результатів експериментів.

Встановлений факт може бути використаний для зменшення енергетичних витрат на транспортування рідин пожежними рукавами або гнучкими трубопроводами.

Отримані експериментальні результати дозволяють припускати наявність ознак прояву ефекту Томса при додаванні малих концентрацій поверхнево-активних речовин у потік вогнегасної рідини. Це проявляється у зміні гідравлічних характеристик системи транспортування та потенційному зниженні втрат напору порівняно з базовим випадком. Разом із тим, для однозначного підтвердження ефекту необхідні додаткові дослідження структури турбулентного потоку та розподілу швидкостей.

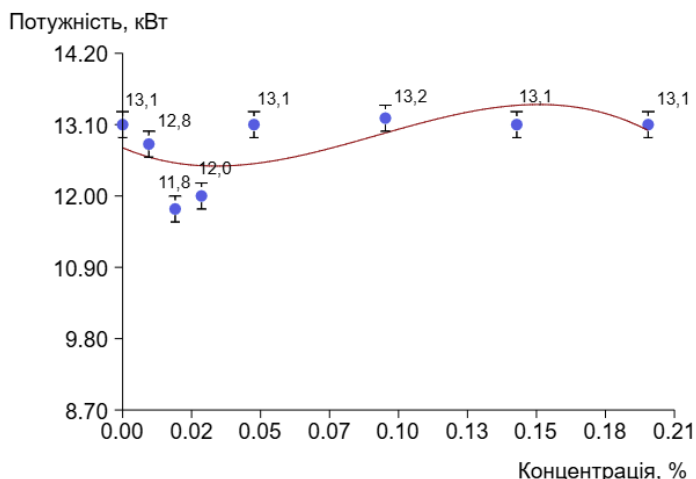


Рис. 21 – Залежність потужності W , що забезпечує транспортування рідин, із додаванням піноутворювача «Барс»

Застосування наприкінці рукавної лінії додаткових пристроїв, наприклад пожежного ствола, може суттєво змінити умови транспортування рідини, передусім внаслідок зміни значення гідравлічного опору, перерозподілу швидкісного поля та виникнення додаткових локальних втрат енергії, а також знизити ефект зростання витрати рідини при застосуванні мікродоз піноутворювачів.

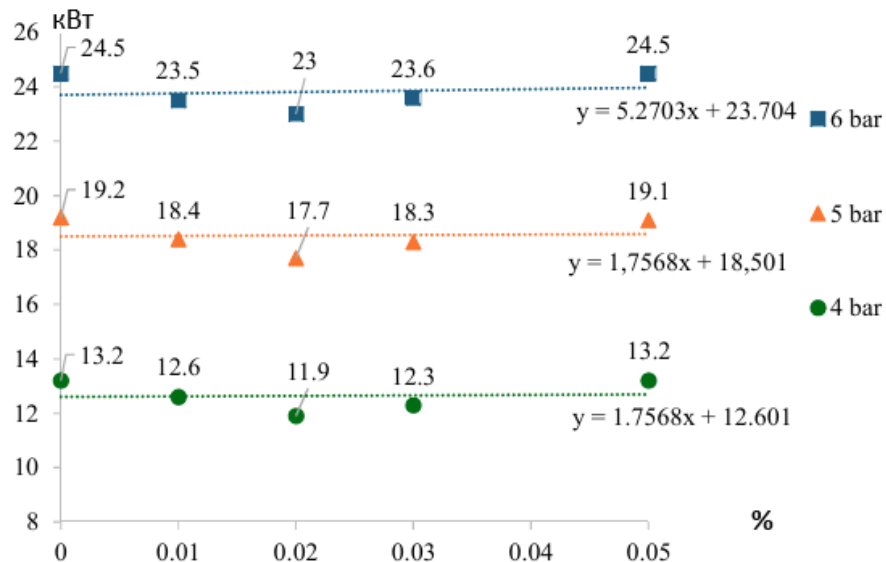


Рис. 22 – Залежності потужності W при транспортуванні рідин із додаванням піноутворювача «Барс» у різних відсотковій концентрації для різних значень тиску на виході насоса

Окрім того, підтверджено, що отримання водних вогнегасних речовин на основі поверхнево-активних речовин є ефективним способом зниження гідравлічного опору. Так, за рахунок додавання до води концентрацій 0,03–0,29 % полігексаметиленгуанідин гідрохлориду, при сталому значенні тиску встановлено зростання витрати водної вогнегасної речовини щонайменше у 1,20 раза за умов тиску на вході 0,3–0,8 МПа.

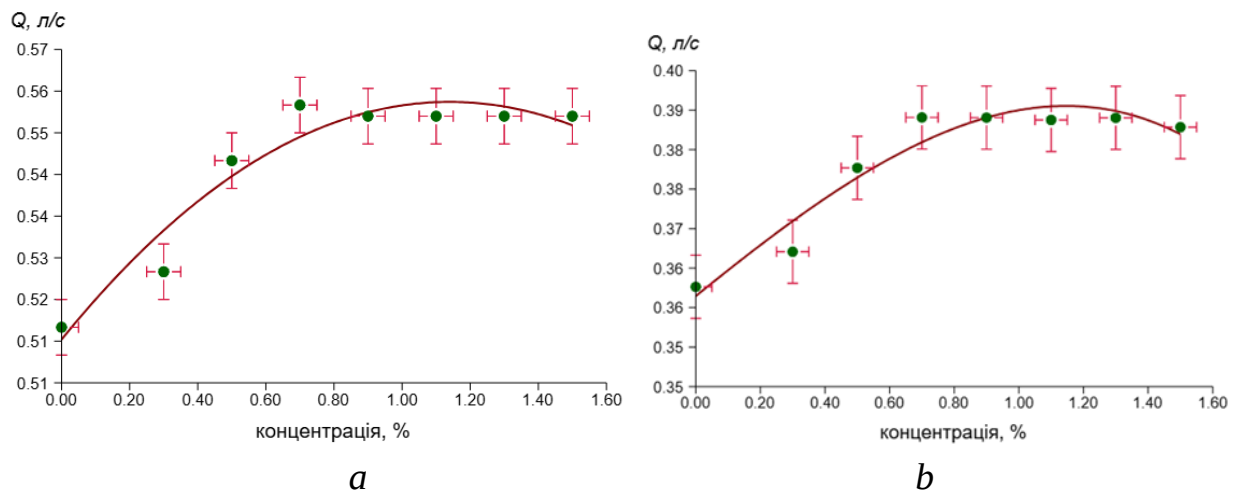


Рис. 23 – Витрати водної вогнегасної речовини на основі полігексаметиленгуанідину гідрохлориду: *a* – трубопровід довжиною 1 м; *b* – трубопровід довжиною 13 м

Для розгалужених трубопроводів систем автоматичного водяного пожежогасіння встановлено збільшення витрат водної вогнегасної речовини з дренчерних зрошувачів в діапазоні концентрацій 0,3–1,4% полігексаметиленгуанідину гідрохлориду вздовж досліджуваних трубопроводів 1 м та 13 м до 7,69 % (рис. 23). Провівши статистичну обробку

даних, було отримано залежність витрати від концентрації полімеру у вигляді полінома $y = -0,0065x^3 - 0,009x^2 + 0,0461x + 0,03632$ для трубопроводу довжиною 13 м. Ця залежність дає змогу розраховувати витрати водного вогнегасного розчину залежно від концентрації полімеру. Достовірність апроксимації експериментальних даних, залежно від порядку полінома, становить 94–99% (для полінома 3 степеня – 96%).

Були проведені експерименти залежності дальності подачі вогнегасного розчину від кута нахилу ствола відносно горизонту, дальності струменя в залежності від тиску на вході ствола, наявності чи відсутності пульсатора тиску у гідравлічній схемі установки. В цілому результати експериментів збігалися із відомими даними із літератури. Однак, крива залежності дальності подачі вогнегасного розчину від кута нахилу ствола була більш опуклою, ніж прийнято вважати, окрім того, максимальна дальність подачі водяного струменя спостерігалась при $\alpha \approx 30^\circ$, що також у середньому дещо нижче прийнятого значення. Проведено ряд експериментів з дослідження різних типів насадок для формування водяних струменів. Базовими типами вибрані насадки (рис. 5, ряд 1 та ряд 3). При цьому здійснене вивчення ефективності та перспектив застосування насадок для використання в різних умовах кожного конкретного типу пожежі. Експериментально перевірено теоретичні результати, отримані при моделюванні руху водяних потоків у каналах стволів та насадок й отримані результати для насадки «класичного» типу (перша позиція, рис. 5) для п'яти базових перерізів (на ділянках Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 та на початку ділянки Z_1 , рис. 3).

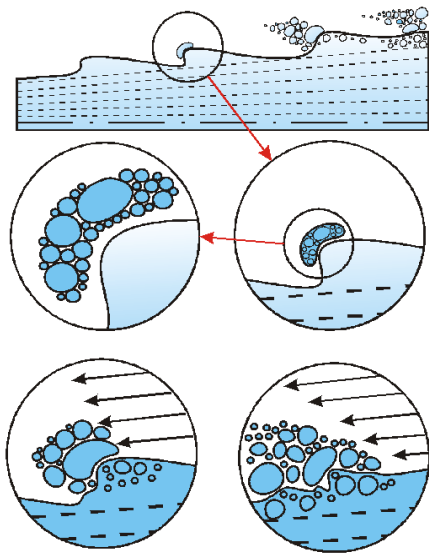


Рис. 24 – Подання процесу відриву крапель від компактної частини струменя

У випадку порівняно малих швидкостей руху компактна частина струменя досить велика. Розпад струменя (його дроблення) відбувається під дією капілярних сил. Поверхнева енергія циліндричного струменя рідини в цьому випадку не мінімальна. При розпаді на краплі ця енергія зменшується, оскільки відбувається наближення до оптимальної фігури рідини зі сферичною поверхнею.

Результати фізичного моделювання співставлялися у випадках застосування лабораторного стенда генерування водяних струменів (рис. 17) й лабораторної установки системи подачі речовини до струминоформуючого пристрою на базі пожежної автоцистерни.

Аналіз експериментальних результатів засвідчив можливість і необхідність удосконалення традиційних методів розрахунку основних параметрів водяного струменя. У результаті проведених досліджень встановлено уточнені залежності

дальності дії струменя від кута його подачі до горизонту. Причому при використанні ствола РС-50, тиску на виході 0,6 МПа, у діапазоні від 17 до 65 градусного нахилу вихідного струменя дальність змінювалася не більше ніж на 2,7 м.

При ідентичних умовах подачі води до вогнища пожежі, коли довільно було обрано 10 прямоточних пожежних стволів з використанням експериментального стенда генерування водяних струменів, результати дальності струменів відрізнялися на 1,4 м, що становило похибку в 5,6 %. Поясненням такого «розкиду» результатів могли стати тільки відмінності у використовуваних стволах, пов'язані з технологією виробництва останніх. Вплив навколишнього середовища на результати експерименту вважався несуттєвим, оскільки експерименти із використанням стволів проводились у довільному порядку, а результати для конкретних стволів повторювалися. Хмара розпилу на максимальній відстані від пожежного ствола мала нормальний радіус 1,28...2,10 м (розкид 39 %). Відповідно горизонтальна й об'ємна щільність розпилу, дисперсність речовини, суттєво відрізнялися для кожного з 10 використовуваних пожежних стволів. Отримані результати експериментів вказують на важливість якості виготовлення навіть найпростіших пожежних стволів, оскільки характеристики хмари розпилу сформованого струменя є одними з визначальних чинників ефективності пожежогасіння.

Застосування різного виду покриттів внутрішньої поверхні каналів дозволило не тільки збільшити строк експлуатації стволів, але і сприло зниженню гідравлічних втрат енергії за рахунок появи при наявності покриття пристінкових ефектів (типу «ковзання» і «прослизання»). Врахування даних ефектів дало можливість одержати рекомендації з розрахунку гідравлічних опорів.

У цьому розділі «Методики розрахунку і застосування гідравлічного пожежного обладнання для генерування рідинних вогнегасних струменів» наведено методики розрахунку елементів пожежного обладнання.

Гідравлічна система формування струменів, що забезпечує найвищу ефективність під час локалізації та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, має забезпечувати формування широкого спектра струменів, необхідних для роботи в різних умовах: суцільних, розпилених, розпорошених та імпульсних; із застосуванням різних робочих речовин (води, водних розчинів, піни, порошоків); з різною фазністю та компонентним складом («рідина–газ», «рідина–рідина», «рідина–тверді частинки»); а також у широкому діапазоні основних характеристик, зокрема тиску на вході до струменеформувального пристрою, швидкості струменя на виході, витрати робочої речовини, дальності генерування, висоти подачі, силової дії струменя на перешкоду, дисперсності зони розпорошення тощо.

Оскільки, як зазначалося раніше, співвідношення «пролітої» на місці пожежі води до води, використаної для її гасіння, нині має вкрай низьке значення, а найефективніше застосування значного охолоджувального потенціалу води можливе лише у випадку її повного випаровування у вогнищі

пожежі, то для створення ефективної системи пожежогасіння потрібно сформулювати схему, що дозволяла б передати енергію від двигуна пожежного автомобіля, виходячи з вимог мінімізації початкової енергії та максимізації показників ексергії гідравлічної системи формування струменів.

Розробка методів, що забезпечували б створення струменів із заданими характеристиками, має ґрунтуватися на використанні напрацювань у галузі створення об'єктів нової техніки (методів, що базуються на використанні теорії систем, методів системного аналізу, теорії моделювання, об'єктно-орієнтованого або системного проєктування) із подальшим застосуванням їх ексергетичного аналізу.

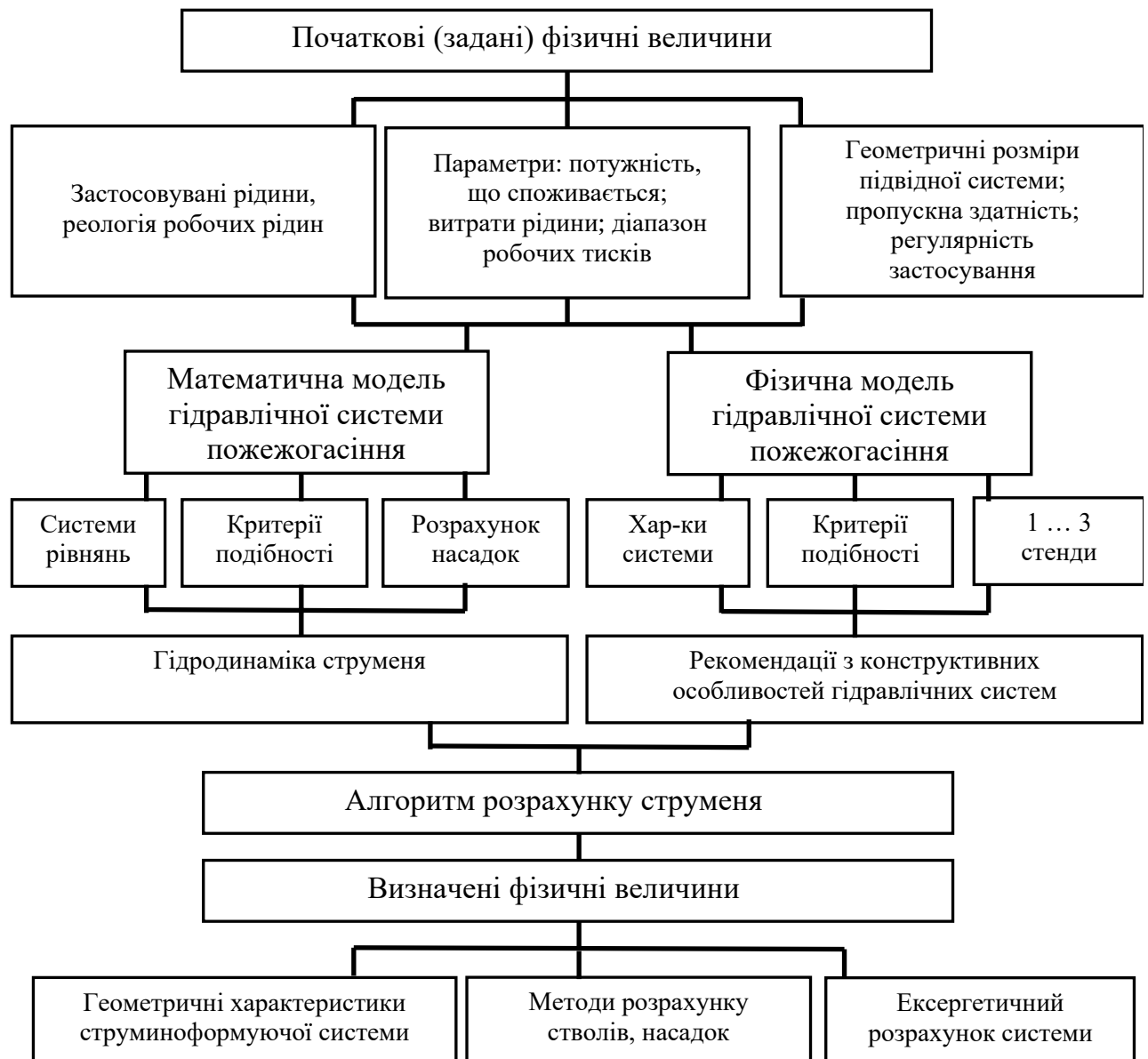


Рис. 25 – Структура створення гідравлічної системи пожежогасіння

Застосування категорії «прогнозування» стосовно гідравлічної системи формування струменів із заданими характеристиками пояснюється прагненням завчасно визначити можливі сценарії гідродинамічної поведінки вогнегасного струменя. Знаючи параметри системи струминоутворення, зокрема потужність

насоса, довжину водопінних комунікацій, довжину рукавної лінії, а також конструктивні особливості ствола та насадки, можна визначити прогностні значення довжини гідродинамічної ділянки, суцільної частини та загальної довжини струменя, форму плями покриття поверхні, розподіл розмірів краплин та інші характеристики. Це дає змогу для існуючої протипожежної техніки розраховувати параметри отримуваних струменів, а для перспективної – визначати їх оптимальні значення.

У межах дослідження виконано узагальнення відомих і отриманих результатів для прогнозування параметрів системи струминоутворення. Перевага запропонованої схеми полягає в тому, що, на відміну від підходів інших авторів, де окремі елементи струминоформувальних систем розглядалися ізольовано, у ній реалізовано їх комплексне об'єднання з урахуванням взаємозв'язку між визначальними факторами. Зокрема, враховано залежності між потужністю насоса, видом струминоформувального пристрою та середнім розміром краплин у зоні розпилення струменя.

Запропонований підхід забезпечує системне розв'язання задачі струминоформування, орієнтоване на підвищення ефективності гідродинамічних рішень на сучасному етапі та обґрунтований вибір струминоформувальних пристроїв за геометричними характеристиками під час розроблення перспективних зразків пожежного обладнання.

Зокрема, для випадку застосування запропонованого підходу до створення гідравлічної системи пожежогасіння (рис. 25) можуть бути використані рівняння руху в'язкої рідини, записані для випадку змінних за довжиною витрат, а також, з урахуванням наукових положень Б. М. Сіова, – для опису руху рідини у насадках. При цьому відповідна математична модель дає змогу описати особливості гідродинамічної початкової ділянки у насадках різних типів, які застосовуються, зокрема, як кінцеві елементи систем автоматичного водяного пожежогасіння.

Сутність математичної моделі полягає в урахуванні стабілізованої течії рідини в каналах, що визначається відомими залежностями, зокрема формулою Дарсі–Вейсбаха. Водночас, на відміну від класичного випадку стабілізованої течії, що характеризується переважно дією сил в'язкого тертя, у досліджуваній системі додатково враховуються сили інерції, зумовлені конвективним прискоренням. Унаслідок цього рівняння, що описують зміну тиску на початковій ділянці, набувають уточненого вигляду. Таким чином, математична модель фактично відображає гідродинамічний підхід до опису процесів у пожежних стволах, насадках та безпосередньо у струменях.

З огляду на наведене можна стверджувати, що за певних початкових умов, які є відомими завдяки визначенням технічним характеристикам наявної протипожежної техніки та пожежного обладнання, можливо отримувати струмені з наперед заданими параметрами, найбільш придатними для розв'язання конкретних завдань пожежогасіння. Важливим результатом є узагальнення наявних знань у сфері струминоформування як для мобільних систем пожежогасіння, кінцевим елементом яких є пожежний ствол, так і для

стаціонарних систем автоматичного пожежогасіння, у яких процес транспортування та подачі вогнегасної речовини відбувається в умовах змінного рівня витрат рідини в трубопроводах.

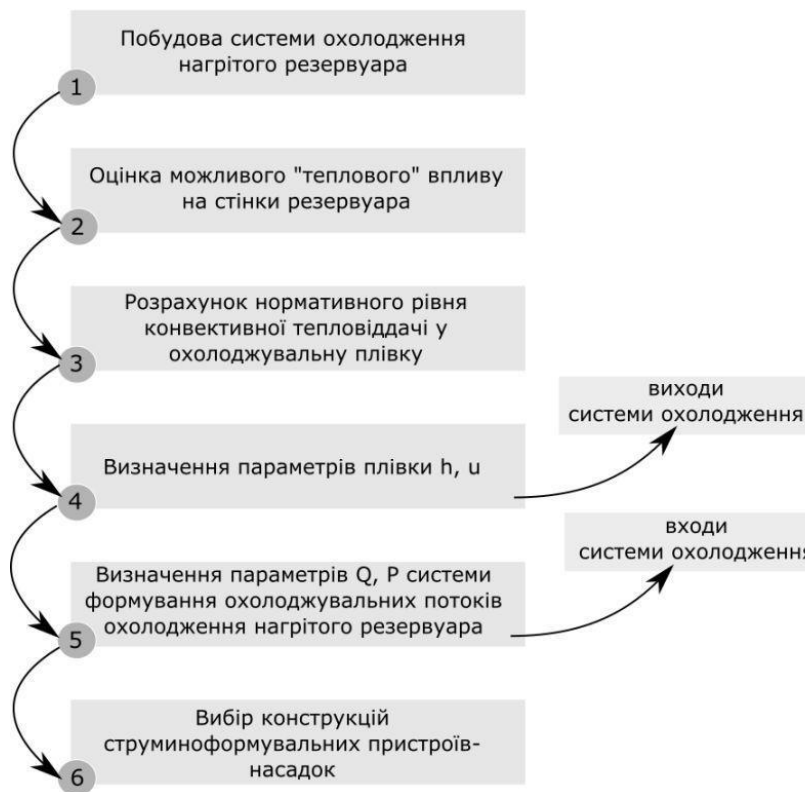


Рис. 26 – Етапи вибору насадок для охолодження резервуара

Виконання п. 4 (рис. 26) може бути забезпечене реалізацією відомих розрахункових методів щодо визначення товщини та швидкості стікання охолоджувальної плівки. Для цього можна скористатися відомими залежностями для визначення товщини та швидкості плівки. Підходи різних авторів до розрахунку товщини та швидкості плівки є схожими, проте відрізняються областю застосування та значенням характеристичного числа Нуссельта для товщини плівки. Nu .

Зокрема, як приклад, для насадки з вихідною щілиною, подібною до щілинної насадки (3×140 мм) товщина плівки $h = 3$ мм формується за умов витрати 1,05 л/с, $Re = 30176$, швидкість плівки $u_{\text{плівки}}$ складатиме близько 2,5 м/с. За таких умов теоретична ширина рівнотовщинної плівки $h = 3$ мм для насадки із витратою щілинної насадки (витрата 12 л/с) складатиме 1,68 м.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, наведено розв'язання актуальної науково-технічної проблеми у сфері пожежної безпеки – раціонального використання водної вогнегасної речовини за рахунок застосування ефективних механізмів формування водяних струменів із науково

Для випадку реалізації відомих розрахункових методів щодо визначення товщини та швидкості стікання охолоджувальної плівки у даному випадку не виконується оцінка рівня конвективної тепловіддачі у водну плівку при охолодженні нагрітого резервуара пожежними стволами. Такі дослідження іншими авторами були виконані раніше і можуть у подальшому бути використані для створення узагальненої методики охолодження резервуарів, що включатиме питання формування охолоджувальних плівок.

обґрунтованими параметрами. При цьому отримано наступні наукові і практичні результати:

1. За результатами проведеного аналізу літературних джерел щодо сучасного стану розвитку наукової бази створення нових і удосконалення існуючих технічних засобів пожежогасіння встановлено, що існує потреба у розробленні нового підходу, заснованого на врахуванні фізичних особливостей формування струменів пожежними стволами та насадками, який дозволить підвищити ефективність використання водних вогнегасних речовин.

2. Розроблено нову критеріальну базу для характеристики взаємодії струменя з перешкодою на основі введення безрозмірних комплексів, що визначають зв'язок між характеристиками струменя і геометричними параметрами пожежних стволів та насадок, реологічними властивостями рідин, а також співвідношенням фізичних властивостей середовища «рідина–повітря», при цьому використовуються відношення густини повітря до густини вогнегасної рідини $\rho_{\text{пов}} / \rho_r$ та відношення площі перерізу струменя до квадрата вихідного діаметра пожежного ствола S/d_0^2 .

3. Розроблено методику та з її використанням проведено експериментальні дослідження закономірностей впливу окремих і комбінованих чинників формування струменів водних вогнегасних речовин на їх параметри. У результаті встановлена залежність енергії водяного струменя E від витрати рідини Q , діаметра ствола d_0 та вхідного тиску у системі p_0 у вигляді: $y = 1244 + 192Q + 149d_0 + 77p_0 + 22d_0p_0 + 66Qd_0p_0$. Отримані результати є адекватними і достовірно описують вплив факторів, що досліджувалися, оскільки критерії Стьюдента й Фішера при довірчій ймовірності 0,95 знаходяться у межах табличних значень, а відносна похибка не перевищує 7%.

4. Досліджено вплив кремнійорганічних покриттів, нанесених на внутрішню поверхню каналів пожежних стволів, на характеристики потоку водної вогнегасної рідини. Встановлено, що кремнійорганічні покриття знижують гідравлічний опір на 21 %, а втрати напору в таких каналах є меншими, ніж у сталевих трубах, у 3,3 раза. У результаті розкид значень нормального радіуса хмари розпилу струменя вдалося зменшити з 39 % до 29 %.

5. У результаті дослідження процесів формування імпульсних та пульсуючих потоків водних вогнегасних речовин запропоновано новий підхід до встановлення оптимальних параметрів пожежних стволів та насадок шляхом максимізації енергії потоку. На основі даного підходу розроблено програмне забезпечення для розрахунку та візуалізації параметрів імпульсних і пульсуючих струменів. Встановлено, що для діаметрів вихідних отворів до 15 мм та витрати вогнегасної рідини понад 3 л/с на виході зі ствола для забезпечення максимальної кінетичної енергії потоку форма епюри в зоні ядра струменя повинна бути близькою до прямокутної, Це відповідає круглому вихідному отвору радіусом 6,5 мм й кінематичній в'язкості $1,019 \dots 1,033 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ при температурі 20 °С. Застосування запропонованого підходу дозволило підвищити рівномірність руху потоку вогнегасної рідини на 38 %.

6. Шляхом математичного моделювання досліджено особливості гідродинаміки потоку вогнегасної рідини в системі «пожежний ствол – вільний струмінь». В результаті запропоновано уточнену математичну модель формування струменя залежно від довжини його суцільної частини, на основі чого удосконалено розрахунковий метод прогнозування параметрів водяних струменів, сформованих пожежними стволами з круглим поперечним перерізом струминоформувального каналу з урахуванням впливу їх геометричних особливостей, реологічних властивостей рідини та довжини гідродинамічної початкової ділянки потоку рідини.

7. Проведено математичне моделювання потоків водної вогнегасної речовини із урахуванням впливу низьковідсоткових водних розчинів піноутворювачів на втрати напору. Експериментально встановлено, що введення 0,010...0,054 % поверхнево-активних речовин дозволяє збільшити витрати рідини на 9...24 % без зміни режимів і параметрів роботи системи. Встановлено, що для стволів типу Protek-366 можуть бути застосовані добавки піноутворювачів до 0,03 % з метою підвищення кінетичної енергії потоку вогнегасної рідини. Максимальне збільшення витрати (11,5 %) було зафіксовано при додаванні 0,021 % піноутворювача «Барс» до транспортованої води, а однакові витрати рідини забезпечувалися за рахунок зменшення на 12 % втрат потужності на її транспортування.

8. Розроблено метод оцінювання енергоефективності технічних засобів генерування струменів водних вогнегасних речовин шляхом застосування критеріїв ексергетичної оптимізації, що визначаються відношенням транзитної та витраченої енергій, для аналізу потоку рідини у водяних пожежних стволах та насадках, трубопроводах установок водяного пожежогасіння, а також у пожежних рукавних лініях.

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у періодичних виданнях, включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection:

1. Яхно О. М., Семінська Н. В., Колесніков Д. В., Стась С. В. Дестабілізація потоку в каналі зі змінною по довжині витратою. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. № 3/7. С. 45–49.

2. Яхно О. М., Стась С. В., Гнатів Р. М. Врахування стисливості рідини за неусталеної течії в напірних трубопроводах систем пожежогасіння. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. № 3/7. С. 38–42.

3. Kostiuk D., Kolesnikov D., Stas S., Yakhno O. Research into cavitation processes in the trapped volume of the gear pump. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 4/7 (94). P. 61–66.

4. Maglyovana T., Nyzhnyk T., Stas S., Kolesnikov D., Strikalenko T. Improving the efficiency of water fire extinguishing systems operation by using guanidine polymers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 1/10 (103). P. 20–25.

5. **Stas S.**, Bychenko A., Kolesnikov D., Myhalenko O., Pustovit M., Myhalenko K., Horenko L. Determining the elongation of T-type pressure fire hoses based on full-scale experiments. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 3/1 (123). P. 13–20.

6. **Stas S.**, Kolesnikov D., Bychenko A., Borsuk O. Establishing the effect of low-percentage doses of foaming agents on increasing fluid consumption at its transportation by fire hoses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 2, No. 10 (134). P. 53–61.

7. Nyzhnyk T., Mahlovana T., Strikalenko T., Kolesnikov D., Zemlianskyi O., **Stas S.**, Kopytin D. Experimental study of the hydrodynamically reagent for energy saving. *Scientific journal «Ecological Engineering & Environmental Technology»*. 2025. Vol. 26, No. 6. P. 29–36.

Монографії:

8. Колесніков Д. В., **Стась С. В.** Удосконалення стаціонарних систем автоматичного водяного пожежогасіння : монографія. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. 100 с.

9. Колесніков Д. В., **Стась С. В.**, Мигаленко К. І. Створення розпиленних струменів води для автоматичних установок пожежогасіння : монографія. Черкаси : ЧПБ НУЦЗ України, 2023. 122 с.

Статті в наукових виданнях, що входять до Переліку наукових фахових видань України:

10. Шкарабура М. Г., **Стась С. В.** Особливості пульсаційної течії рідини в циліндричних насадках. *Вісник Черкаського державного технологічного інституту*. 2004. № 2. С. 68–71.

11. Шкарабура М. Г., **Стась С. В.**, Деревинський Д. М. Реологічні особливості розчинів з поверхнево-активними речовинами, що використовуються для ліквідації горіння. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування*. 2004. № 45. С. 152–154.

12. Бабенко В. С., **Стась С. В.** Створення спеціалізованих систем та їх елементів для МНС України. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2004. № 3 (9). С. 120–122.

13. **Стась С. В.** Моделювання елементів аварійно-рятувальної техніки та пожежно-технічного обладнання на базі САПР із бібліотекою тривимірних математичних функцій. *Вісник ЖДТУ*. 2004. № 4 (31). Т. 2. С. 156–160.

14. Шкарабура М. Г., **Стась С. В.**, Биченко С. М. Вібраційна пожежно-рятувальна техніка для створення пульсуючих струменів для гасіння пожеж. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2005. № 1 (39). С. 55–58.

15. Шкарабура М. Г., **Стась С. В.**, Яхно О. М. Про розподіл швидкості та тиску вздовж гідродинамічної початкової ділянки компактної частини струменя та на виході з насадки. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2005. № 2 (8). С. 87–91.

16. Шкарабура М. Г., Стась С. В. Питання дослідження руху пожежних струменів на виході з насадки. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування*. 2005. № 46. С. 125–127.

17. Стась С. В., Макаревський П. В., Биченко С. М. Розробка лабораторної установки для проведення робіт з визначення параметрів повітряно-пінних стволів ежекційного типу. *Вісник Черкаського державного технологічного інституту*. 2005. № 2. С. 113–117.

18. Шкарабура М. Г., Стась С. В., Бурляй І. В. Розроблення комбінованої системи виявлення та гасіння пожеж у житлових приміщеннях. *Вісник Черкаського державного технологічного інституту*. 2005. № 3. С. 125–127.

19. Шкарабура М. Г., Стась С. В., Яхно О. М. Про доцільність використання кремній-органічних покриттів в пожежній техніці. *Пожежна безпека*. 2006. № 9. С. 165–170.

20. Шкарабура М. Г., Стась С. В., Яхно О. М. Аналіз особливостей течії в'язкої рідини в насадках. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2007. № 1 (15). С. 32–36.

21. Стась С. В. Розробка елементів інформаційної системи функціонування аварійно-рятувальної техніки. *Управління проєктами, системний аналіз і логістика*. 2008. № 5. С. 179–182.

22. Стась С. В., Шкарабура М. Г., Яхно О. М. Ексергетичний аналіз струминних потоків. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. 2008. № 2 (49). Ч. 2. С. 114–119.

23. Стась С. В. Питання створення систем керованої подачі розпиленої води в осередок пожежі. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2008. № 2. С. 64–68.

24. Стась С. В. Про створення установки дослідження водяних струменів. *Пожежна безпека*. 2008. № 12. С. 7–13.

25. Стась С. В. Аналіз гідродинамічних характеристик потоку рідини у спеціальних пожежних стволах і насадках щілинного типу. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування*. 2009. Вип. 57. С. 139–142.

26. Стась С. В. Аналіз системи генерування струминних потоків, що застосовуються в пожежогасінні. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування*. 2011. № 63. С. 240–243.

27. Стась С. В. Спеціальні струменеформуючі насадки на пожежні стволи. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2011. № 3 (33). С. 9–12.

28. Стась С. В. Реологічні особливості поверхнево-активних добавок, що використовуються для піноутворення. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування*. 2013. Вип. 2. С. 19–24.

29. Стась С. В., Колесніков Д. В., Лагно Д. В. Експериментальні дослідження потоків рідини вздовж каналів у стаціонарних системах автоматичного водяного пожежогасіння. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2014. № 18. С. 115–120.

30. Стась С. В. Розробка компактного генератора піни середньої кратності для гасіння пожеж в умовах обмеженого простору. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2016. Вип. 4 (54). С. 31–36.

31. Стась С. В. Особливості руху води та водних розчинів піноутворювачів крізь рукавні розгалуження. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2018. № 1 (59). С. 19–24.

32. Колесніков Д., Стась С. В., Мигаленко К. Експериментальні дослідження потоків рідини вздовж каналів у стаціонарних системах автоматичного водяного пожежогасіння. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2019. Т. 3. № 2. С. 47–54.

33. Стась С. В., Яхно О. М., Лаврухін Є. В. Особливості розподілу швидкості та тиску водяного струменя на виході з пожежного ствола або насадки. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати*. 2020. № 1. С. 31–35.

34. Стась С. В., Биченко А. О., Колесніков Д. В., Мигаленко О. І., Пустовіт М. О. Експериментальне дослідження зміни геометричних параметрів пожежних рукавів під час подачі вогнегасних речовин. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати*. 2021. № 2. С. 39–42.

35. Стась С. В., Биченко А. О., Колесніков Д. В., Мигаленко К. О., Коваль О. Реологічні властивості піноутворювачів Пірена–1, Софір, Альпен, Moussol, Sthamex, Pianol. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2021. Т. 5. № 2. С. 89–94.

36. Магльована Т., Нижник Т., Колесніков Д. В., Стась С. В., Мигаленко К. О., Стрікаленко Т. Підвищення ефективності роботи систем водяного пожежогасіння шляхом використання гідродинамічно активних полімерів. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2021. Т. 5. № 2. С. 58–66.

37. Стась С. В., Биченко А. О., Пустовіт М. О., Мигаленко О. І., Колесніков Д. В. Експериментальне дослідження зміни геометричних параметрів пожежних рукавів при застосуванні пожежного ствола Protek 366. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати*. 2022. № 1. С. 78–82.

38. Стась С. В., Биченко А. О., Колесніков Д. В., Мигаленко О. І., Пустовіт М. О. Визначення величини подовження вживаних пожежних напірних рукавів типу Т шляхом проведення натурних експериментів. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. Т. 7. № 2. С. 227–240.

Статті, які додатково відображають наукові результати дисертації:

39. Stas S. System design of fire-rescue equipment and its components. *Scientific journal «Journal of the Technical University of Gabrovo»*. 2014. Vol. 47. P. 8–12.

40. Stas S. V., Kolesnikov D., Yakhno O. Experimental research of hydrodynamics of flows with a variable along the length mass. *Scientific journal «Journal of the Technical University of Gabrovo»*. 2017. Vol. 54. P. 23–26.

41. **Stas S. V.**, Kolesnikov D., Bychenko A., Horenko L. Changing the geometric parameters of fire hoses when they transport water. *Scientific journal «Journal of the Technical University of Gabrovo»*. 2022. P. 413–418.

42. **Stas S. V.**, Bychenko A., Myhalenko M., Kolesnikov D. Experimental study of the geometric characteristics of watering zones formed by a handline nozzle Protek-366. *Scientific journal «Journal of the Technical University of Gabrovo»*. 2023. Vol. 67. P. 34–36.

Патенти:

43. Патент України 58516 U, МПК А62С 31/00. Пожежний ствол. Колесніков Д. В., **Стась С. В.**, Кришталь В. М., Яхно О. М., Луговський О. Ф. Заявник і патентовласник Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля МНС України. Заявл. 09.11.2010. Опубл. 11.04.2011. Бюл. № 7. 3 с.

44. Патент України 60500 U, МПК А62С 31/00. Спосіб створення розпиленого потоку рідини. **Стась С. В.**, Яхно О. М., Луговський О. Ф., Колесніков Д. В., Кришталь В. М. Заявник і патентовласник Академія пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля МНС України. Заявл. 09.11.2010. Опубл. 25.06.2011. Бюл. № 12. 2 с.

45. Патент України 121256 U, МПК А62С 31/12. Портативний піногенератор. Землянський О. М., Мирошник О. М., Куценко С. В., Биченко А. О., Маладика І. Г., Шкарабура М. Г., **Стась С. В.**, Галенда Р. В. Заявник і патентовласник Мирошник Олег Миколайович. Заявл. 26.06.2017. Опубл. 27.11.2017. Бюл. № 22. 4 с.

46. Патент України 146639 U, МПК А62С 31/00, А62С 31/02, H01J 1/04. Пожежний ствол. **Стась С. В.**, Колесніков Д. В., Яхно О. М., Луговський О. Ф., Ночніченко І. В. Заявл. 22.05.2020. Опубл. 10.03.2021. Бюл. № 10. 5 с.

47. Патент України 152183 U, МПК А62С 31/00. Мобільна установка для гасіння пожеж тон-корозпиленою водою. **Стась С. В.**, Колесніков Д. В., Колесніков Є. Д., Костюк Д. В., Яхно О. М., Ночніченко І. В. Заявл. 18.07.2022. Опубл. 02.11.2022. Бюл. № 44. 4 с.

Матеріали науково-практичних конференцій, які засвідчують апробацію дисертації:

48. Shkarabura N., **Stas S.**, Yakhno O. The analysis of the factors influencing hydrodynamics of a stream of a viscous liquid in a fire trunk. *Technical University of Gabrovo, ISC UniTech*. 2006. Vol. II. P. 432–436. ISSN 2603–378X. (Форма участі – очна).

49. **Stas S.**, Yakhno O., Kolesnikov D. Study of parameters of hydraulic streams used for extinguishing. *Technical University of Gabrovo, ISC AmTech*. 2007. Vol. II. P. 211–215. ISSN 2603–378X. (Форма участі – очна).

50. **Стась С. В.** Аналіз факторів, що впливають на гідродинаміку потоку в'язкої рідини в пожежному стволі. *Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту»*. Черкаси : ЧПБ. 2008. С. 94–96. (Форма участі – очна).

51. Дикий Д. І., Стась С. В. Генерування гідравлічних струменів низького тиску. *Пожежна, аварійно-рятувальна та спеціальна техніка: стан, проблеми та перспективи – 2011. Матеріали науково-практичної конференції*. Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля. 2011. С. 16–17. (Форма участі – очна).

52. Харковець Є. А., Бень О. А., Стась С. В. Експериментальна установка для генерування водяних струменів. *Пожежна, аварійно-рятувальна та спеціальна техніка: стан, проблеми та перспективи – 2011. Матеріали науково-практичної конференції*. Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля. 2011. С. 31–32. (Форма участі – очна).

53. Стась С. В. Гідродинамічні течії в плоских двошарових потоках. *Теорія та практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси : видавець Ю. Чабаненко. 2012. С. 149–151. (Форма участі – очна).

54. Стась С. В. Урахування впливу роботи шестеренного насоса на пульсації потоків в'язкої рідини при формуванні гідравлічного пожежогасного струменя. *Теорія та практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій. Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля. 2013. С. 171–172. (Форма участі – очна).

55. Стась С. В., Тищенко Є. О. Реологічні особливості поверхнево-активних добавок, що використовуються для піноутворення. *Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи. Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції*. Київ. 2013. С. 299–301. (Форма участі – заочна).

56. Стась С. В., Дикий Д. І. Регулювання газообміну під час пожежі за допомогою водяних струменів. *Теорія та практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій. Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля. 2013. С. 122–123. (Форма участі – очна).

57. Стась С. В., Биченко С. М., Колесніков Д. В. Гідравлічні струмені низького тиску. *Матеріали 16 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників*. Київ : ІДУЦЗ. 2014. С. 280–282. (Форма участі – очна).

58. Стась С. В. Експериментальні дослідження потоків рідини вздовж каналів у стаціонарних системах автоматичного водяного пожежогасіння. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси : ЧПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2014. С. 96–97. (Форма участі – очна).

59. Стась С. В., Колесніков Д. В., Яхно О. М. Експериментальні дослідження гідродинаміки потоків із змінною по довжині масою. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2016. С. 179–181. (Форма участі – очна).

60. Стась С. В., Гнатів Р. М., Мельник Є. В. Врахування стисливості рідини за неусталеної течії в напірних трубопроводах систем пожежогасіння. *Теорія і*

практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій. Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2017. С. 154–156. (Форма участі – очна).

61. **Stas S. V., Kolesnikov D. V., Bychenko A. O.** The questions of formation the hydraulic jet in impulse fire extinguishing systems. *Unitech'17. Technical University of Gabrovo*. 2017. Vol. III. P. 153–157. ISSN 2603–378X. (Форма участі – очна).

62. **Стась С. В.** Питання визначення коефіцієнту опору рукавних розгалужень. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій. Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції.* Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2018. С. 131–133. (Форма участі – очна).

63. **Stas S., Kolesnikov D., Lahno D.** Analysis of the low-pressure jets. *Пожежна безпека: проблеми та перспективи. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції.* Харків : НУЦЗУ. 2018. С. 128–130. (Форма участі – заочна).

64. **Стась С. В., Очеретяний В. О., Єрошевич М. М.** Особливості руху вогнегасних речовин крізь рукавні розгалуження. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій. Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції.* Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2019. С. 162–163. (Форма участі – очна).

65. **Стась С. В., Биченко А. О.** Особливості визначення основних характеристик насосно-рукавної системи. *Розвиток цивільного захисту в сучасних безпекових умовах. Матеріали 21 Всеукраїнської науково-практичної конференції.* Київ : ІДУЦЗ. 2019. С. 251–253. (Форма участі – заочна).

66. **Стась С. В., Биченко С. М., Бузун О. В.** Розробка пристрою з підвищеною витратою для формування та подачі в осередок пожежі розпиленої води. *Гідроаеромеханіка в інженерній практиці. Матеріали науково-технічної конференції.* 2020. С. 297–300. (Форма участі – заочна).

67. **Стась С. В., Колесніков Д. В.** Швидкісні особливості водяного струменя на виході з пожежного ствола. *Гідроаеромеханіка в інженерній практиці. Матеріали науково-технічної конференції.* 2021. С. 217–219. (Форма участі – заочна).

68. **Стась С., Биченко А., Колесніков Д.** Визначення величини подовження пожежних напірних рукавів типу Т шляхом проведення натурних експериментів. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист. Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю.* Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2023. С. 157–159. (Форма участі – очна).

69. **Стась С. В.** Визначення сили розтягу напірного пожежного рукава при транспортуванні води. *Гідроаеромеханіка в інженерній практиці. Матеріали науково-технічної конференції.* 2023. С. 40–43. (Форма участі – заочна).

АНОТАЦІЯ

Стась С.В. **Розвиток наукових основ створення технічних засобів генерування струменів водної вогнегасної речовини.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 «Пожежна безпека» (261 – Пожежна безпека). – Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, 2026.

Дисертаційну роботу присвячено розв’язанню актуальної науково-технічної проблеми у сфері пожежної безпеки – раціонального використання водної вогнегасної речовини за рахунок застосування ефективних механізмів формування водяних струменів із науково обґрунтованими параметрами. Отримані результати становлять наукове підґрунтя для розроблення нових та удосконалення існуючих конструкцій пожежних стволів із метою зниження енергетичних втрат при транспортуванні рідини.

Ключові слова: пожежний ствол, насадка, струмінь, вогнегасна речовина, потік, енергія, в’язкість, тиск, пульсація.

SUMMARY

Stas S.V. **Development of Scientific Foundations for the Design of Technical Means for Generating Water-Based Fire-Extinguishing Jets.** – Dissertation manuscript.

Dissertation submitted for the degree of Doctor of Technical Sciences in Scientific Specialty 21.06.02 – Fire Safety (Field 21 – National Security). – National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, 2026.

The dissertation is devoted to solving an urgent scientific and technical problem in the field of fire safety, namely, the rational use of water-based fire-extinguishing agents through the application of effective mechanisms for generating water jets with scientifically substantiated parameters. This research provides a broadened theoretical and experimental foundation that enables the development of new, as well as the refinement of existing, nozzle and tip designs with the explicit objective of reducing hydraulic and energetic losses during the transportation and discharge of extinguishing liquids under real operating conditions.

The work proposes an advanced and comprehensive approach to evaluating water-jet parameters, grounded in a detailed analysis of coupled hydrodynamic processes within the “firefighting nozzle – free jet” system. This approach accounts not only for the rheological behavior of water and water-based extinguishing agents but also for the geometric configuration of the nozzle channels, the boundary-layer development, and the mechanisms governing the formation and decay of the coherent (continuous) jet core. In this context, a system of dimensionless criteria has been formulated to characterize jet–obstacle interaction, capturing the interplay between fluid physical properties, nozzle geometry, flow regime parameters, and the aerodynamic characteristics of the surrounding air environment.

A structured methodology for experimental investigation has been developed to examine the influence of both individual and combined factors on the energetic, kinematic, and spatial-geometric parameters of water jets. Using this methodology, a functional dependence of jet energy on liquid flow rate, outlet diameter, and inlet

pressure has been derived and verified; Student's and Fisher's criteria confirm the statistical reliability of the model at a 0.95 confidence level. Moreover, the application of silicone-organic coatings to the internal surfaces of nozzle channels has been experimentally demonstrated to significantly reduce hydraulic resistance, suppress turbulence-induced energy dissipation, and improve the stability and uniformity of the spray cloud by preserving a more consistent dispersion structure.

A novel and substantiated approach to determining optimal parameters for pulsed and pulsating flows is introduced, based on maximizing the kinetic energy and stability of the water jet. As part of this approach, specialized software has been developed for the computation, simulation, and visualization of key characteristics of both steady and unsteady water-jet regimes. An improved mathematical model of jet formation is proposed, integrating the effects of the length of the coherent jet region, the initial hydrodynamic development zone, and the rheological and kinematic features of the extinguishing liquid throughout the entire flow path.

The research further examines the influence of low-percentage aqueous foam-forming solutions on pressure losses, flow rate, and jet structure. It is established that the introduction of 0.010–0.054% surfactants leads to an increase in liquid flow rate by 9–24% while maintaining unchanged operational modes of the system. For firefighting nozzles of the Protek-366 type, optimal concentrations of foam-forming additives (up to 0.03%) have been identified to effectively enhance the kinetic energy of the water jet and improve its propagation characteristics.

Additionally, a method for assessing the energy efficiency of devices used for generating water-based extinguishing jets is proposed. This method is based on exergy optimization criteria expressed through the ratio of transmitted (useful) to expended energy in nozzles, tips, pipelines, and hose lines of water-based fire suppression systems. Such an approach enables a more accurate evaluation of energy conversion processes and supports the development of more efficient hydraulic systems for firefighting applications.

The results obtained form a robust scientific, methodological, and practical foundation for designing high-efficiency firefighting nozzles and tips. These outcomes contribute to improving fire suppression performance, enhancing the operational reliability of water-based extinguishing systems, and reducing energy losses associated with the transportation and discharge of extinguishing liquids under both steady and dynamic firefighting conditions.

Keywords: firefighting nozzle, water jet, fire-extinguishing agent, fluid flow, energy efficiency, viscosity, pressure, pulsating flow.

Підписано до друку 03.07.2026. Обл-вид. арк. 1,8.

Папір офсетний. Друк цифровий.

Тираж 100 прим.

Віддруковано НУЦЗУ.

м. Черкаси, вул. Онопрієнка, 8

Тел.: (0472) 55-09-55

