НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СТАСЬ СЕРГІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 614.842:532.525

ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ГЕНЕРУВАННЯ СТРУМЕНІВ ВОДНОЇ ВОГНЕГАСНОЇ РЕЧОВИНИ

21.06.02 – пожежна безпека
21 – національна безпека
Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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



С. В. Стась

Науковий консультант
Тищенко Євген Олександрович,
доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2026

АНОТАЦІЯ

Стась С. В. Розвиток наукових основ створення технічних засобів генерування струменів водної вогнегасної речовини. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 «Пожежна безпека» (21 – Національна безпека). – Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, 2026.

Дисертаційна робота присвячена 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. Проведено аналіз конструктивних особливостей струминоформувальних пристроїв технічних засобів генерування водяних вогнегасних струменів, перед усім пожежних стволів та насадок, а також факторів, що впливають на потоки рідин у них.

Основна увага зосереджена на окремому класі вільних струменів – гідравлічних струменях, а також його підкласі – водяних струменях, що застосовуються для пожежогасіння. Визначено основні фактори впливу на структуру гідравлічного струменя, що подається в зону горіння, а саме тиск та швидкість рідини на виході зі ствола, витрати рідини, діаметр вихідного отвору ствола, відношення довжини внутрішнього каналу пожежного ствола та розміру початкової ділянки струменя до вихідного діаметра ствола, наявність домішок в потоці рідини, кут подачі струменя, особливості теплових потоків поблизу вогнища пожежі.

Плин вогнегасної рідини в стволах та насадках запропоновано розглядати з позицій гідродинамічної початкової ділянки в'язкої нестисливої рідини. Вивчення та зіставлення особливостей нестабілізованих течій у каналах і початкових ділянках компактної частини вогнегасного струменя

дозволило розглядати початкову ділянку компактної частини струменя за аналогією з моделлю нестабілізованої течії у стволі або насадці.

Запропоновано за результатами дослідження конструкцій струминоформувального протипожежного обладнання та гідродинамічних особливостей вогнегасних рідин, пов’язувати значення тиску на вході стволів чи насадок із параметрами струменя на їх виході. Для отримання стабілізованих потоків-струменів пропонується використання таких пожежних стволів і насадок, довжина струминоформувального каналу яких перевищуватиме розмір початкової нестабілізованої ділянки.

Виконано моделювання розподілу швидкостей та локальної кінетичної енергії в’язкої нестисливої вогнегасної рідини в пожежних стволах й насадках із круговим профілем поперечного перерізу внутрішнього струминоформувального каналу.

Встановлено, що для випадку усталеного руху рідини, яка витікає з отвору в формі довгої щілини, коли число Рейнольдса перевищує критичне значення, плин переходить в турбулентний струминний вигляд з високою швидкістю розширення, що може бути використано для формування рівнотовщинних завіс або охолодження поверхонь. Для випадків застосування пульсуючих струменів незалежно від способу їх отримання запропоновано використовувати модель В. Г. Лєвіча, що описує хвильовий рух на поверхні рідини, який призводить до розпаду рідинної маси струменя. Для опису первинного розпилення рідинних струменів запропоновано використовувати класифіковані моделі Ashgriz залежно від основних чинників зростання збурень на поверхні струменів, перед усім Huh-модель, модель Кельвіна-Гельмгольца та уніфіковану спрей-модель.

Ефективність системи генерування вогнегасних струменів запропоновано оцінювати за допомогою ексергетичного методу.

Оскільки під час аналізу потоку рідини у вогнегасному струмені її основними характеристиками зазвичай вважаються дальність польоту і жива

сила струменя в кінцевій точці, а базовими є фактори, що характеризують рівномірність розпилення струменя та дисперсність потоку в різних його зонах, то розглянута симетрична задача для циліндричного струменя, коли основними характеристиками процесу розпаду струменя є довжина компактної частини струменя й розміри утворюваних крапель. Для такого випадку здійснене тривимірне твердотільне моделювання пожежного ствола. Значущість отриманих результатів підтверджується можливістю імітаційного прогону отриманої моделі для оперативного коригування геометрії проектованого виробу з поліпшеними характеристиками.

Вдалося уточнити сучасні уявлення про формування водяних струменів низького тиску (0,4–0,6 МПа для стволів типу РС-50, Protek-366) за витрат 3,0–7,2 л/с. Довжина внутрішнього каналу виявилася більшою за довжину гідродинамічної початкової ділянки від вхідного отвору ствола (183 мм); конусність 4,24° не призводила до виникнення відривних течій та великих зон завихрень чи пустот; важливим чинником гідравлічних втрат була шорсткість поверхні струминоформувального каналу, визначальним елементом для значень швидкості струменя на виході та довжини гідродинамічної початкової ділянки від вихідного отвору ствола була зона різкого звуження на виході ствола. Зазначена картина руху рідини була характерною для конусності внутрішнього каналу 3,06°…5,17° й гідродинамічній початковій ділянці 176…186 мм.

На основі теорії розмірностей був проведений аналіз руху рідинного струменя на виході зі ствола й виявлені критерії для сили взаємодії струменя із перешкодою. Новими критеріями, які пропонується застосовувати щодо характеристики сили взаємодії струменя із перешкодою для рідинних осесиметричних вогнегасних струменів є відношення густин повітря й вогнегасної рідинни та відношення площі перерізу струменя до квадрата вихідного діаметра ствола, тобто сила дії струменя може бути віднесена до геометричних параметрів ствола. Для випадку застосування поверхнево-

активних речовин отримані критерії, що пов’язують консистентну сталу, початкову швидкість струменя, густину рідини та вихідний діаметр ствола. По суті, вони визначають зв'язки між силою взаємодії струменя і геометричними параметрами насадок, реологічними властивостями рідини, співвідношенням фізичних властивостей середовища рідина-повітря.

Експериментально підтверджено припущення про те, що на течію в'язких рідин у пожежних стволах, а також у розгалужених трубопроводах систем автоматичного водяного пожежогасіння, окрім сил в'язкого тертя, впливають сили інерції, зумовлені конвективним прискоренням, які визначають кінематичні та динамічні параметри потоків. Врахування відповідних втрат кінетичної енергії в потоці вогнегасної рідини дозволило розробити рекомендації щодо проєктування насадок та спринклерів з однаковими коефіцієнтами витрати, а застосування низьковідсоткових водних розчинів піноутворювача рекомендовано для забезпечення більш рівномірної витрати через насадки вздовж трубопроводу. Підтверджено, що отримання водних вогнегасних речовин на основі поверхнево-активних речовин є ефективним способом зниження гідравлічного опору.

Здійснено гідродинамічний розрахунок щілинних насадок для надання пропозицій щодо зменшення нерівномірності потоку за шириною каналу насадки. Встановлено, що для забезпечення максимального захисту від теплового випромінювання з позицій рівнотовщинності струменя оптимальною є конструкція насадки зі злегка увігнутою в центральній частині струминоформувальною щілиною. Для плоскощілинних насадок запропоновано спосіб розрахунку їх геометричних параметрів та надано рекомендації щодо визначення товщини завіс, що формуються за їх допомогою.

Для підвищення довговічності стволів і насадок запропоновано використовувати кремній-органічні покриття. Проведені дослідження дозволили оцінити їх вплив на потік в’язкої рідини в елементах систем

генерування водяних потоків, зокрема здатність знижувати гідравлічний опір, що позитивно позначається на витраті та дальності подачі вогнегасної речовини. Встановлено, що, окрім захисних властивостей щодо впливу високих температур, ці покриття сприяють зниженню гідравлічного опору за рахунок ефектів «ковзання» та «прослизання». Так, для стволів типу РС-50 при витраті 3,6 л/с й тиску на вході 0,4 МПа хмара розпилу мала нормальний радіус 1,28–2,10 м (розкид 39%). Після покриття внутрішніх каналів пожежних стволів кремній-органічним покриттям і повторення експериментів для усіх 10 стволів хмара розпилу мала нормальний радіус 1,24–1,74 м (розкид 29%, тобто відносне зменшення становило 26%), втрати напору в каналах досліджуваної партії стволів РС-50 з кремній-органічним покриттям були меншими, ніж у сталевих трубах в 3,0–3,3 рази. При цьому витрата рідини зросла на величину до 8%, а середня дальність подачі збільшилася на 0,7 м (2,4%).

Виділено п'ять основних типів генераторів імпульсних струменів залежно від принципу дії та способу генерування струменя. Досліджено розподіл швидкостей та напружень у пульсуючих потоках, отримано епюри швидкостей для випадку, коли гармонійні зміни перепаду тиску в стволі забезпечуються генератором імпульсів. Моделювання процесу руху вогнегасної речовини в об’ємі ствола шляхом варіювання параметрів пульсацій (фази та частоти) здійснювалося за допомогою програмного забезпечення, що суттєво спростило визначення оптимальних параметрів роботи генератора імпульсів. Варіювалися значення в’язкості рідини, радіус вихідного отвору насадки, фази пульсатора.

Отримано безрозмірні критерії, що характеризують імпульсні потоки. Встановлено, що зазначені критерії визначають взаємозв'язок між параметрами механічної системи створення пульсацій та гідравлічними характеристиками струменя. Запропоновано принципову схему системи формування струминних потоків із застосуванням генератора пульсацій.

Виконано оцінювання ексергетичних втрат в існуючій системі генерування потоків.

Запропоновано для струменів з круглим поперечним перерізом розглядати початкову ділянку компактної частини струменя за аналогією з досить добре дослідженою моделлю нестабілізованої течії в стволі або насадці.

Розглянуто приклади застосування змішуваних течій на прикладі повітряно-пінного ствола та піногенератора нової конструкції «Академія–1к».

Розроблено стенд для проведення гідродинамічних випробувань і дослідження вогнегасних струменів. Згідно з результатами фізичного моделювання течії струменя, як техніко-економічний параметр оптимізації, що дає змогу регулювати процес гідравлічного руйнування струменя, прийнято енергію струменя та дальність його генерування. Модель параметра оптимізації, виходячи з фізичного змісту коефіцієнтів регресії, дозволила оцінити ступінь впливу окремих факторів на параметр оптимізації. Найбільший вплив мали фактори витрати рідини та діаметра вихідного отвору насадки.

Для систем автоматичного водяного пожежогасіння забезпечення необхідних витрат водної вогнегасної речовини ускладнюється втратами енергії, зумовленими нестабілізованим рухом рідини в магістральній частині трубопроводу. Запропоновано враховувати дію інерційних сил, що виникають при конвективному прискоренні потоку, на його кінематичні та динамічні параметри. Крім того, обґрунтовано доцільність застосування спеціальних добавок до водної вогнегасної речовини з метою підвищення продуктивності системи автоматичного водяного пожежогасіння та забезпечення більш рівномірного розподілу витрат через зрошувачі. Встановлено, що введення 0,010–0,054% поверхнево-активних добавок, дозволяє збільшити витрати рідини на 9–24% не змінюючи при цьому режими й параметри роботи системи. При подальшому зростанні відсоткового значення поверхнево-

активних добавок суттєвого зростання продуктивності системи не спостерігалося. Для досліджуваної схеми максимальне зростання витрати (11,5%) зафіксоване при введенні 0,021% піноутворювача.

У роботі значна увага зосереджена на питаннях дослідження технічних засобів генерування водяних вогнегасних струменів загалом та розроблення методів, алгоритмів, методик і підходів до створення елементів гідродинамічних систем формування потоків рідин у протипожежному обладнанні зокрема.

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 addressing a topical 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 forming water jets with scientifically justified parameters. An analysis was carried out of the design features of jet-forming devices of technical means for generating water fire-extinguishing jets, primarily fire branch pipes and nozzles, as well as the factors influencing the flow of liquids within them.

The main focus is on a distinct class of free jets – hydraulic jets, including the subclass of water jets used for firefighting. The principal factors affecting the structure of a hydraulic jet supplied to the combustion zone were identified as the fluid pressure and velocity at the nozzle outlet, flow rate, nozzle outlet diameter, the

ratio of the internal channel length to the nozzle diameter, the ratio of the length of the jet initial section to the nozzle diameter, the presence of impurities in the fluid flow, the jet discharge angle, and the characteristics of thermal flows in the vicinity of the fire. It is proposed to consider the flow of fire-extinguishing liquid in branch pipes and nozzles from the standpoint of the hydrodynamic initial section of a viscous incompressible fluid. The study and comparison of the features of developing flows in channels and in the initial sections of the compact part of the fire-extinguishing jet allowed the initial section of the compact part of the jet to be considered in a manner analogous to the model of developing flow in a branch pipe or nozzle. Based on the results of the study of jet-forming firefighting equipment and the hydrodynamic characteristics of fire-extinguishing liquids, a relationship between the pressure at the inlet of fire nozzles and the jet parameters at their outlet was established. It is proposed to use branch pipes and nozzles with a jet-forming channel length exceeding the length of the initial developing section in order to obtain stabilized jets. It was established that, in the case of a steady fluid flow issuing from an elongated slit, when the Reynolds number exceeds a critical value, the flow transforms into a turbulent jet with a high rate of expansion, which can be used to form water curtains of uniform thickness or to cool surfaces. For pulsating jets, regardless of the method of generation, it was proposed to use the model developed by V.G. Levich, which describes wave motion on the liquid surface leading to the breakup of the jet. It is proposed to use the classified models of primary liquid-jet breakup developed by Ashgriz, including the Huh model, the Kelvin–Helmholtz model, and the unified spray model, depending on the dominant mechanisms of disturbance growth on the jet surface.

The efficiency of the fire-extinguishing jet generation system was evaluated using an exergy-based method.

In the analysis of fire-extinguishing liquid jets, the jet range and impact force at the target are commonly regarded as the principal performance characteristics. However, particular attention should also be paid to spray uniformity and droplet

dispersion throughout the jet. Accordingly, the axisymmetric breakup of a cylindrical jet is considered, where the principal characteristics are the length of the compact core and the size of the generated droplets. For this case, a three-dimensional solid-state modeling of the branch pipe was performed. The significance of the obtained results is confirmed by the possibility of using the developed model for rapid geometry adjustment of a future product with improved performance characteristics.

The study clarified the current understanding of the formation of low-pressure water jets (0.4–0.6 MPa for branch pipes of the RS-50 and Protek-366 types) at flow rates of 3.0–7.2 l/s. The length of the inner channel was found to be greater than the length of the hydrodynamic initial section from the inlet of the branch pipe (183 mm); a cone angle of 4.24° prevented flow separation and the formation of large vortex or void zones; an important factor in hydraulic losses was the roughness of the surface of the jet-forming channel, while the determining element for the jet velocity at the outlet and the length of the hydrodynamic initial section from the outlet of the branch pipe was the zone of sharp contraction at the exit. This flow pattern was characteristic for a cone angle of the inner channel within 3.06° –5.17° and a hydrodynamic initial section of 176 –186 mm.

Based on dimensional analysis, liquid-jet motion at the nozzle outlet was analyzed, and criteria characterizing the intensity of jet–obstacle interaction were identified. For axisymmetric liquid fire jets, new criteria are proposed for characterizing jet–obstacle interaction, including the ratio of the densities of air and fire-extinguishing liquid and the ratio of the jet cross-sectional area to the square of the initial nozzle diameter, thereby relating the jet force to the geometric parameters of the nozzle. For flows containing surfactants, criteria were obtained that relate the interaction force constant, the initial jet velocity, the liquid density, and the initial nozzle diameter. Essentially, these criteria establish relationships between the jet interaction force, the geometric parameters of the nozzles, and the rheological

properties of the liquid through the correlation of the physical properties of the liquid–air system.

Experimental results confirmed the assumption that, in the flow of viscous liquids through branch pipes and branched pipelines of automatic water fire-extinguishing systems, not only viscous friction forces but also inertia forces associated with convective acceleration significantly influence the kinematic and dynamic parameters of the jets. Taking into account kinetic-energy losses in the flow of extinguishing liquid made it possible to develop recommendations for the design of nozzles and sprinklers under the same flow-rate conditions. The use of low-concentration aqueous foam solutions is recommended to achieve a more uniform flow distribution among the nozzles along the pipeline. It was confirmed that the use of surfactant-based water fire-extinguishing agents is an effective way to reduce hydraulic resistance.

A hydrodynamic calculation of slot nozzles was performed to develop suggestions for reducing flow non-uniformity across the width of the nozzle channel. It was established that, for maximum protection against thermal radiation from the standpoint of equal jet thickness, the optimal design is a nozzle with a jet-forming slit that is slightly concave in the center. A method for calculating the geometric parameters of flat slotted nozzles is proposed, and recommendations for determining the resulting curtain thickness are also provided.

To increase the durability of branch pipes and nozzles, it is proposed to use organosilicon coatings. The experiments allowed us to evaluate their effect on the flow of viscous fluid in the elements of water flow generation systems, namely, helping to reduce hydraulic resistance, which has a positive effect on the level of consumption and supply range of the extinguishing agent. It was established that, in addition to protecting against high temperatures, these coatings reduce hydraulic resistance due to the wall-slip effect at the liquid–wall interface. For RS-50 branch pipes operating at a flow rate of 3.6 l/s and an inlet pressure of 0.4 MPa, the spray cloud had a radius of 1.28–2.10 m (scatter 39%). After coating the internal channels

of branch pipes with organosilicon coatings and repeating experiments for all 10 branch pipes the spray cloud had a normal radius 1.24 –1.74 m (scatter 29%, that is, the relative decrease was 26%), pressure loss in the channels of the investigated batch of RS–50 branch pipes with organosilicon coating was smaller than in steel pipes in 3.0–3.3 times while fluid flow rate increased by up to 8%, and the average range on 0.7 m (2.4%).

There are five main types of pulse jet generators depending on the principle of operation and method of generating a jet. The distribution of speed and stresses in pulsating flows was investigated. Velocity distributions were obtained for the case when the harmonic changes in the pressure drop in the branch pipe were provided by a pulse generator. The process of simulation of extinguishing-agent motion in the volume of the branch pipe by selecting its parameters (phase and frequency) was carried out thanks to the author's program, which greatly simplified the choice of its optimal parameters. The viscosity values of the liquid varied, as well as the radius of the nozzle outlet and the pulsator phase.

The criteria that characterize impulse flows were obtained. These parameters must determine the relationship between the mechanical system of pulsations and the hydraulic parameters of a jet.

It is proposed to consider the initial section of the compact part of the jet with a round cross section by analogy with a fairly well-studied model of unstabilized flow in the branch pipe or nozzle.

Examples of the application of mixed flows were considered using an air-foam pipe and the new foam generator “Academy–1k” as case studies.

A test stand for hydrodynamic investigations of fire-extinguishing jets has been developed. Based on the results of physical modeling of jet flow, it enables regulation of jet breakup, evaluation of jet energy, and determination of the jet generation range as part of the technical and economic optimization process. The model of the optimization parameter, based on the physical meaning of the regression coefficients, allowed us to draw a conclusion about the degree of

influence of factors on the optimization parameter. The strongest influence was exerted by the liquid flow-rate factor and the nozzle outlet diameter factor.

In automatic water fire-extinguishing systems, providing the required flow rate of extinguishing agent is complicated by energy losses caused by developing flow in the main pipeline. It was proposed to take into account the actions of inertial forces from convective acceleration and to use special additives for water extinguishing agent to increase the productivity of the entire system of automatic water fire extinguishing and uniformity of sprinklers. It was established that the addition of 0.010–0.054% surfactants increases the liquid flow rate by 9–24% without changing the operating modes and parameters of the system. With a further increase in the percentage of surfactants, there was no significant increase in system performance. For the studied scheme, the maximum flow-rate increase (11.5%) was fixed at an input of 0.021% foaming agent.

The dissertation focuses on the study of hydrodynamic systems for generating fluid flows in firefighting equipment in general, and on the development of methods, algorithms, techniques and approaches for creating such systems.

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

Список публікацій здобувача

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 : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. 100 с.

9. Колесніков Д. В., **Стась С. В.**, Мигаленко К. І. Створення розпилених струменів води для автоматичних установок пожежогасіння : монографія. Черкаси : ЧІПБ 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 Н. 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 Національного технічного університету України «КПІ». Серія 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. ISSN 1310–6686.

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. ISSN 1310–6686.

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. ISSN 2603–378X.

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. ISSN 1310–6686. DOI: 10.62853/XQCZ2078.

Патенти:

43. Патент України 58516 U, МПК A62C 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 A62C 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 A62C 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 A62C 31/00, A62C 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 A62C 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, що 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 : ЧІПБ. 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 : ЧІПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2014. С. 96–97. (Форма участі – очна).

59. **Стась С. В.**, Колесников 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 : ЧІПБ 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 : ЧІПБ 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 : ЧІПБ 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 : ЧІПБ 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 : ЧІПБ 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).

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень…… 28
ВСТУП …… 31
Розділ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ГЕНЕРУВАННЯ РІДИННИХ ВОГНЕГАСНИХ СТРУМЕНІВ …….. 47
1.1. Особливості генерування рідинних вогнегасних струменів, що застосовуються для пожежогасіння …….. 50
1.2. Особливості гідродинаміки потоків у струминоформувальних пристроях протипожежної техніки та пожежному обладнанні ……. 58
1.3. Стволи із круглим поперечним перетином ……. 66
1.4. Спеціальні стволи та насадки з некруглим поперечним перетином …… 78
1.5. Імпульсні та пульсуючі потоки в гідродинамічних струменях……. 86
1.6. Характеристика процесу розпаду струменя, дроблення крапель та моделі розпилення рідинних струменів…… 96
1.7. Методи фізичного моделювання гідравлічних струменів, що застосовуються для пожежогасіння……. 108
Висновки до розділу 1 ……. 114
Розділ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГЕНЕРУВАННЯ РІДИННИХ ВОГНЕГАСНИХ СТРУМЕНІВ ……. 118
2.1. Гідродинамічні особливості потоку в’язкої рідини в пожежних стволах та насадках із осесиметричним формувальним каналом …… 118
2.2. Аналіз конструктивних особливостей типових пожежних стволів як струминоформувальних пристроїв …… 125
2.3. Реалізація гідроструминних технологій у процесі розробки конструкцій пожежних стволів та насадок із

осесиметричним формувальним каналом …….. 131
2.3.1. Аналіз структури вільного незатопленого турбулентного струменя …….. 136
2.3.2. Застосування технології проектування об’єктів нової техніки для створення пожежних стволів та насадок ……. 148
2.4. Врахування особливостей руху вогнегасних струменів на виході із насадки …… 143
2.5. Особливості застосування різних типів водяних вогнегасних струменів ……. 148
Висновки до розділу 2 ……. 151
Розділ 3. АНАЛІЗ ЧИННИКІВ ВПЛИВУ НА ПРОЦЕС ФОРМУВАННЯ СТРУМЕНІВ …….. 153
3.1. Пожежні стволи та насадки із круглим поперечним перетином внутрішнього струминоформувального каналу.. 153
3.1.1. Основні характеристики пожежних стволів та насадок із круглим поперечним перетином …….. 153
3.1.2. Особливості плину в’поверхнево-язкої рідини в насадках. 156
3.2. Пожежні стволи та насадки з некруглою формою поперечного перерізу внутрішнього струмино-формувального каналу …… 161
3.2.1. Використання стволів, насадок і зрошувачів …….. 161
3.2.2. Використання щілинних насадок ……. 163
3.2.3. Розв'язання задачі формування водяних завіс ……. 166
3.2.4. Струминоформувальні пристрої для забезпечення рівномірної витрати струменя …… 171
3.2.5. Особливості гідродинамічного розрахунку щілинних насадок ……. 176
3.3. Стволи і насадки з кавітацією потоку на виході ……... 179
3.4. Методи підвищення довговічності стволів і насадок …… 188
Висновки до розділу 3 ……..……. 195

Розділ 4. ФОРМУВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ ТА ПУЛЬСУЮЧИХ ВОГНЕГАСНИХ РІДИННИХ ПОТОКІВ ……..... 196
4.1. Генератори імпульсів, класифікація, переваги й недоліки 196
4.2. Математична модель пульсуючих потоків, що можуть бути застосовані для пожежних стволів, насадок і установок водяного пожежогасіння …… 201
4.2.1. Ламінарний пульсуючий рух в'язкої рідини у пожежному стволі з круглим поперечним профілем внутрішнього каналу …… 201
4.2.2. Розподіл швидкостей та напружень у пульсуючих потоках …… 203
4.2.3. Основні принципи генерування імпульсних та пульсуючих потоків у гідравлічному пожежному обладнанні та критерії, що характеризують такі потоки … 212
4.3. Особливості пульсаційного плину рідини в циліндричних каналах пожежних стволів і насадок …….. 214
4.4. Розподіл локальної кінетичної енергії пульсуючого потоку в струминоформуючому каналі пожежного ствола …….. 217
4.5. Існуючі пристрої для отримання пульсуючих потоків та їх застосування …….. 219
4.6. Ексергійні особливості системи генерування струминних пульсуючих потоків …….. 225
Висновки до розділу 4 …….. 231
Розділ 5. ВРАХУВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОТОКУ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ В СИСТЕМІ «ПОЖЕЖНИЙ СТВОЛ – ВІЛЬНИЙ СТРУМІНЬ» ……. 232
5.1. Гідродинамічна початкова ділянка компактної частини струменя на виході з насадки для струменів з круглим поперечним перерізом …….. 232
5.2. Гідродинамічна початкова ділянка компактної частини

струменя на виході з насадки для струменів з некруглим поперечним перерізом …… 237
5.3. Стратифіковані та змішувані течії …… 243
5.3.1. Аналіз течії двошарового струменя ……..... 243
5.3.2. Змішувані течії …… 245
5.4. Врахування чинників впливу на гідродинаміку потоку рідини в струминоформувальних каналах пожежних стволів та насадок ……... 255
5.5. Врахування основних закономірностей розпорошення струменя й умов дроблення крапель …… 268
Висновки до розділу 5 ……. 273
Розділ 6. ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНОЇ СИСТЕМИ ФОРМУВАННЯ РІДИННИХ ВОГНЕГАСНИХ СТРУМЕНІВ …… 275
6.1. Розробка стенда для проведення гідродинамічних випробувань та дослідження вогнегасних струменів. Цілі й задачі фізичного моделювання гідравлічної системи формування струменів …….. 275
6.2. Методи аналізу гідравлічних струменів ……. 280
6.3. Методики проведення лабораторних і натурних експериментів та їх планування. Обробка експериментальних даних і визначення критерію оптимальності ……..……. 284
6.4. Фізичне моделювання гідравлічних вогнегасних струменів 292
6.4.1. Експериментальний стенд для дослідження гідравлічних вогнегасних струменів …… 292
6.4.2. Стенд для дослідження параметрів повітряно-пінних стволів …….. 303
6.5. Особливості проведення експериментів із використанням експериментального стенда для дослідження гідравлічних вогнегасних струменів …… 307

6.5.1. Застосування експериментального стенда для дослідження гідравлічних вогнегасних струменів …… 307
6.5.2. Гідравлічні струмені низького тиску ……..……. 313
6.5.3. Лабораторна установка системи подачі речовини до струминоформувального пристрою ……. 319
6.6. Стенди для дослідження реологічних властивостей рідин... 322
6.6.1. Визначення в'язкості застосовуваних речовин ……..….. 322
6.6.2. Реологічні особливості розчинів з поверхнево-активними речовинами, що використовуються для ліквідації горіння.. 328
Висновки до розділу 6 ……. 339
Розділ 7. МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ І ЗАСТОСУВАННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ПОЖЕЖНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ГЕНЕРУВАННЯ РІДИННИХ ВОГНЕГАСНИХ СТРУМЕНІВ …… 340
7.1. Методики розрахунку і прогнозування гідравлічної системи формування струменів із заданими характеристиками …… 340
7.2. Структура задачі створення систем пожежогасіння ……. 345
7.3. Методи визначення характеристик струминоформувальних пристроїв та приклади алгоритмів їх розрахунку ……. 353
ВИСНОВКИ …… 364
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ …….. 367
ДОДАТКИ …… 397
ДОДАТОК А. Акти впровадження результатів дисертації 397
ДОДАТОК Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації 402

Перелік умовних позначень

t – час, с;
Q – витрата рідини, м^3/с;
p – тиск, Па;
ρ – густина, г/м^3;
U, u – швидкість, м/с;
Q_T – кількість теплоти, Дж ;
Z – довжина(пожежного ствола), відстань, м;
L, l – довжина початкової ділянки (струменя), м;
D – діаметр (вихідного отвору пожежного ствола), м;
d – діаметр сферичної краплини, м;
α_0 – коефіцієнт кінетичної енергії (нерівномірність розподілу енергії по потоку), безрозмірна величина (–);
I – гідравлічний ухил, (–);
S – площа поперечного перерізу, м^2;
H, h – напір, м;
R, r – радіус, відстань від осі, м;
K – зовнішні сили, Н;
μ, η – динамічна в'язкість, (Н·с)/м^2;
ν – кінематична в’язкість речовини, м^2/с;
k – хвильове число, 1/м;
λ – довжина хвилі, м;
ξ – коефіцієнт стиснення, (–);
φ – коефіцієнт швидкості, (–);
ω – кутова швидкість, рад/с;
A, B, C – коефіцієнти у рівняннях, (–);
P – потужність, Вт;
μ – коефіцієнт витрати, (–);
θ – кут конусності внутрішнього каналу насадки, град;
α – кут нахилу ствола відносно горизонту, град;
ξ – коефіцієнт місцевого гідравлічного опору, (–);
η_0 – коефіцієнт відносної в'язкості рідини стосовно води, (–);
α^k – коефіцієнт кількості руху, (–);
α^E – коефіцієнт кількості енергії, (–);

β – коефіцієнт стиснення, (–);
σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м;
ε – коефіцієнт відношення густин краплі й газового середовища, (–);
τ – напруження, Па;
γ – швидкість зсуву, $с^{-1}$;
H, h – ширина каналу насадки, м;
$\dot{\gamma}$ – градієнт швидкості, $с^{-1}$;
V – об'єм рідини, $м^3$;
T_0 – період акустичних коливань, с;
n – локальна концентрація, $м^{-3}$;
α – кут змочуваності, град,
$\lambda_{\text{покр}}$ – коефіцієнт гідравлічного тертя, (–);
E_k – кінетична енергія, Дж;
δ – товщина плівки, м;
η – коефіцієнт корисної дії, (–);
C – концентрація, % ;
$K_{\text{п}}$ – кратність піни;
m – маса, кг;
G – витрата повітря, $м^3/с$.

Індекси:

x – вздовж абсциси;
y – вздовж ординати;
z – вздовж аплікати;
r – радіальний;
р – рідинний;
п – повітря;
0 – початковий;
ос – осьовий ;
i, j – порядкові індекси;
стаб – стабілізація;
лік – ліквідація;
min – мінімальний;
max – максимальний;
вх – вхідний;
дод – додатковий;
осн – основний;

сер – середній;
гр – граничний;
стис – стиснення;
ст – ствол;
стис – стиснення;
досл – дослідження;
пов – поверхня;
кр – критичний;

ВСТУП

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 (у 2024 та 2025 роках – 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 становило понад 52 млрд гривень за рік. 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 близько 98% від загальної кількості пожеж. Таким чином, для реалізації державної політики у сфері захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій, насамперед – під час гасіння пожеж і забезпечення пожежної та техногенної безпеки, вода була й залишається одним із ключових ресурсів.

У більшості випадків пожежогасіння застосовується саме вода, що зумовлено її фізико-хімічними властивостями та високою ефективністю. Крім безпосереднього гасіння, її використовують для теплового захисту, екранування та охолодження конструкцій. Так, для класу А, найпоширенішого серед пожеж (ДСТУ 2273:2019, ДСТУ EN 2:2018), найбільш уживаним і ефективним засобом гасіння є вода у формі струменя або спрею. Основними причинами пріоритетності її застосування є нетоксичність, здатність до розпилення, висока питома теплота пароутворення, дешевизна порівняно з іншими рідинами.

Теоретична кількість води, необхідна для фактичного гасіння, за умов її ефективного постачання до вогнища пожежі є досить низькою, перед усім за рахунок високої питомої теплоти пароутворення води. Під ефективним постачанням слід розуміти забезпечення доставляння потрібної кількості води (критичної інтенсивності подачі вогнегасної речовини) та її дисперсності у потрібну зону. На жаль, попри усі спроби реалізувати сучасні тактичні підходи до пожежогасіння, застосовуючи наявні технічні засоби, ефективність використання води слід вважати низькою. Переважна кількість застосовуваної води не бере безпосередньої участі у відборі тепла від зони горіння.

Особливість застосування водяних струменів для пожежогасіння визначається їх характеристиками. Так, у багатьох випадках мова йде про витрати рідини 0,2…7,0 л/с, тиск генерування струменя 0,2…1,0 МПа, довжину трубопроводів або рукавів 10…150 м, а струминоформуючими елементами є стволи й насадки з різними формами вихідного отвору (у найпоширеніших випадках застосовуються елементи з круглою формою поперечного перерізу струминоформуючого отвору). У дослідженні перед усім інтерес представляли нестаціонарні течії, в яких пожежні стволи й насадки використовуються як елементи систем формування струменів для забезпечення гасіння пожеж та (або) проведення пожежно-рятувальних робіт.

Практичний досвід показує, що у багатьох випадках для достовірного прогнозування руху рідини у струмені, важливо знати особливості потоку рідини у формуючому інструменті, тобто у різного типу насадках, пожежних стволах, установках водяного пожежогасіння ще на етапі проектування різного типу обладнання. Іншою стороною даної проблеми є пов’язування із потребою врахування реологічних особливостей рідини, яка використовується при отриманні вогнегасних гідравлічних струменів. На жаль, значна частина із подібного роду особливостей гідродинаміки струменів на даний час не вивчена, або вивчена недостатньо. Разом із тим, саме вирішення цієї проблеми є важливим і актуальним для сучасної техніки, зокрема при розробці

ефективного пожежного обладнання. Ексергійний аналіз протипожежної техніки вказує на необхідність вивчення не тільки гідродинаміки подібних процесів і обладнання, яке може бути використане при струминоутворенні, але й вибору ексергетично ефективних режимів його функціонування. При цьому ексергетичний аналіз орієнтований не лише на термодинамічні особливості процесу пожежогасіння, але й врахування співвідношення транзитної та витраченої енергій. Однак, нині не повністю розв'язані задачі із визначення оптимальних механізмів упередження й реагування та вибору ефективних засобів для сфери захисту населення, територій, навколишнього природного середовища й майна від надзвичайних ситуацій. А, оскільки переважна більшість ліквідації пожеж ґрунтується на використанні води або розчинів на її основі, необхідно розробити наукову базу для створення і застосування технічних засобів генерування водяних вогнегасних струменів, методик оцінювання ефективності їх використання у конкретних випадках пожежогасіння.

Існує потреба проектування й розробки технології застосування технічних засобів, призначених для локалізації та ліквідації пожеж, захисту людей, матеріальних цінностей та довкілля від впливу небезпечних факторів пожежі, які повинні забезпечувати отримання різного типу струминних потоків для пожежогасіння, а також теплового захисту та тепловідведення різноманітних об'єктів у промисловості.

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., Villermaux 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 у них сил інерції при конвективному прискоренні та поверхневих сил при розпорошенні струменів, врахування геометричних особливостей струминоутворюючих пристроїв, а також аномалії в’язкості вогнегасних рідин. Слід констатувати факт відсутності надійних методів та алгоритмів розрахунку задач із врахування дії відповідних сил на процеси формування й розпаду вогнегасних струменів. Розв’язання такої задачі дозволяє зменшити похибку гідравлічних розрахунків параметрів струменів й підвищити адекватність математичних моделей реальним фізичним процесам у вогнегасних струменях. 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 проектування та розрахункових методик конструювання пожежних стволів й насадок із одного боку, а також потреба визначення оптимальних параметрів вогнегасних струменів для кожного конкретного випадку пожежогасіння з іншого, робить необхідними дослідження процесів струминоформування у залежності від конструктивних особливостей відповідного гідравлічного пожежного обладнання, режимів їх використання та реологічних особливостей 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 ЧІПБ 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 проєктування 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 проєктуванні 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 плину неньютонівських рідин в стволах із круговим і плоскощілинним перерізами. Для чисельного інтегрування диференціальних рівнянь, моделювання процесу і візуалізації тривимірного плину 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 $\rho_{пов}/\rho_р$ 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 $\hat{y} = 1244 + 192x_1 + 149x_2 + 77x_3 + 22x_2x_3 + 66x_1x_2x_3$, 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 при підготовці 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 розпилених 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 щілинного 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 ствола 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 матеріалів 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, у тому числі 7 статей у двох різних періодичних виданнях, що індексуються в наукометричній базі Scopus, 2 монографії, 29 наукових статей у наукових фахових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, 4 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, 5 патентів України на корисну модель, 22 публікації 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.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ГЕНЕРУВАННЯ РІДИННИХ ВОГНЕГАСНИХ СТРУМЕНІВ

Розділ присвячений питанням генерування рідинних вогнегасних струменів. Струменями у рамках даної роботи називатимемо такий вид потоку вогнегасної рідини, при якому вона тече у газовому середовищі, що суттєво відрізняється параметрами від параметрів струменя.

У роботі використовуються поняття генерування та формування струменів водної вогнегасної речовини, які є взаємопов'язаними, але не тотожними за змістом. Під генеруванням струменя розуміється процес створення потоку рідини технічними засобами пожежогасіння (пожежними стволами, насадками, насосними системами), що забезпечують перетворення потенційної та/або гідравлічної енергії у кінетичну енергію руху рідини. Генерування визначається конструктивними та енергетичними характеристиками системи.

Під формуванням струменя розуміється процес надання потоку рідини певної структури, геометричної форми, дисперсності та просторово-часових характеристик у процесі його витікання та взаємодії з навколишнім середовищем. Формування струменя визначається гідродинамічними процесами, реологічними властивостями рідини та геометрією струминоформувальних елементів.

Слід зазначити, що в науково-технічній літературі, присвяченій пожежогасінню, поняття «генерування» та «формування» струменів водних вогнегасних речовин не мають чіткого нормативно або термінологічно усталеного розмежування та часто використовуються як взаємозамінні. У даній роботі ці поняття застосовуються в уточненому змістовному розумінні: генерування струменя розглядається як більш широке поняття, що охоплює весь комплекс процесів створення та подачі потоку рідини технічними

засобами, тоді як формування струменя – як окремий етап, пов’язаний із набуттям струменем визначених гідродинамічних і геометричних характеристик. При цьому в межах даного дослідження основну увагу зосереджено саме на процесах формування струменя як визначальному чиннику ефективності використання водних вогнегасних речовин.

Розглядаються вільні струмені, коли вони витікають у середовище без обмежуючих поверхонь, напівобмежені, коли плин рідини здійснюється вздовж плоскої стінки, та обмежені, коли струмені витікають у середовище із твердими обмежуючими стінками. Термін «вогнегасні струмені» використовується у сенсі «такі струмені, що застосовуються з метою локалізації, ліквідації пожежогасіння та перешкоджанню повторного загорання». Використання поняття «рідинні струмені» вказує на вид речовини у потоці – рідину або її крапельну основу. Так, рідинний вогнегасний струмінь може мати декілька основних ділянок: зону суцільного потоку, зону початкового розпорошення та зону розпилення. Усі названі зони суттєво різняться параметрами: густиною, швидкістю потоку, дисперсністю тощо. Способи отримання струменів перед усім залежать від використання різних типів обладнання й забезпечують певну витрату рідини та особливі форми й характеристики струменів. У найпростіших випадках обладнанням для формування струменя може бути пожежний ствол із насадкою з круглим поперечним перерізом. У подальшому у роботі вказані вище терміни та означення за потребою уточнюються та деталізуються відповідно до правил чинної нормативно-технічної документації. Зазначимо, що і локалізація, і ліквідація пожежі досить часто значною мірою залежать від ефективності використовуваних вогнегасних чи охолоджувальних струменів, водяних завіс, вдалого їх підбору та застосування.

Локалізація та ліквідація пожежі, як одного із видів надзвичайних ситуацій є взаємопов’язаними послідовними стадіями процесу пожежогасіння. Відповідно до [6] локалізацією (локалізуванням) пожежі прийнято називати

стадію пожежогасіння, на якій зупинено розвиток пожежі і створено умови для її ліквідування. Відповідно ліквідацією (ліквідуванням) пожежі називають стадію пожежогасіння, на якій припинено горіння, діяння небезпечних чинників пожежі, а також усунено умови для її самочинного повторного виникнення. Питаннями локалізації та ліквідації пожежі покликані займатися спеціальні підрозділи окремої служби, а саме Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС України). Відповідно до Положення про ДСНС України [7] серед її основних завдань є захист населення і територій від надзвичайних ситуацій, запобігання їх виникненню, ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, рятувальної справи, гасіння пожеж, пожежної та техногенної безпеки, діяльності аварійно-рятувальних служб, а регулювання відносин забезпечується зведенням правил [8].

Як показано у роботі, важливим для ДСНС України є створення оперативного матеріального резерву й правил (тактики) його застосування не лише для запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, але й для локалізації та ліквідації надзвичайних ситуацій та їх наслідків.

Щорічні Національні доповіді про стан техногенної та природної безпеки в Україні, які розробляє ДСНС України, дають змогу стверджувати, що динаміка виникнення надзвичайних ситуацій в Україні упродовж усіх років незалежності характеризується стабільно високими (негативними) кількісними показниками щодо загиблих та постраждалих людей внаслідок надзвичайних ситуацій, а також суттєвими для економіки країни матеріальними збитками.

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 (у 2024 та 2025 роках - зросла відповідно на 24% та 19%) [9]. 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 складає понад 52 млрд гривень за рік. Дані наведені лише для класифікованих надзвичайних ситуацій, що визначаються «Порядком класифікації надзвичайних ситуацій за їх рівнями» [10].

Щодня в Україні, в середньому, виникало 287 пожеж, унаслідок яких гинуло 4 людини та 5 осіб отримували травми; вогнем знищувалось або пошкоджувалось 99 будівель чи споруд і 19 одиниць техніки; матеріальні втрати від пожеж складали 145 млн 902 тис. гривень [9]. Посилення заходів з виявлення пожеж, забезпечення їх локалізації та ліквідації, що проводять підрозділи ДСНС України не дозволяють стверджувати про зменшення кількості й складності пожеж. Серед причин такої ситуації є невпинне зростання потенційних небезпек виникнення пожеж та чинників, чо їх забезпечують. Наприклад, середня житлове пожежне навантаження починаючи з 2000 року щонайменше в два рази вище, аніж 50 років до того [11, 12] й продовжує зростати [13-15], а статистичні дані свідчать, що за зростання чисельності населення на 1 % кількість пожеж збільшується приблизно на 5 %, а збитки від них зростають до 10 % [16]. У науковій літературі сфери пожежогасіння недостатньо робіт, пов’язаних із так званою «геометрією пального» та видами пожежного навантаження [17, 18], разом із тим суттєво більше уваги приділено використанню технологій (струменів), що повинні забезпечити ефективне пожежогасіння, на жаль, без урахування особливостей розміщення горючих матеріалів, тобто за найгіршим сценарієм.

1.1. Особливості генерування рідинних вогнегасних струменів, що застосовуються для пожежогасіння

Окрім оперативної готовності до використання за призначенням аварійно-рятувальної техніки, засобів цивільного захисту, а також обладнання, призначеного для забезпечення безпеки суб’єктів господарювання, важливо

гарантувати високу ефективність технічних засобів у випадках практичного застосування. Вирішення зазначеної складної задачі можливе шляхом розробки відповідних методів, алгоритмів, методик та підходів, а саме розвитку наукових засад створення й експлуатації технічних засобів генерування струменів водної вогнегасної речовини.

Розглянемо перш за все водяні струмені, що є найпростішим випадком потоків рідин (рис. 1.1), генерованих спеціальними технічними засобами, що отримали назву пожежних стволів та насадок. Переважна більшість вільних струменів витікає (спрямовується) у середовище без обмежуючих поверхонь й застосовується з метою локалізації, ліквідації пожежогасіння та перешкоджанню повторного загорання. У рамках даної роботи використовуються наступні основні терміни для технічних засобів згідно з нормами і положеннями відповідних базових регулюючих документів у сфері цивільного захисту [6, 8, 19, 20]:

засоби протипожежного захисту – технічні засоби, призначені для запобігання, виявлення, локалізації та ліквідації пожеж, захисту людей, матеріальних цінностей та довкілля від впливу небезпечних факторів пожежі;

пожежний ствол – пристрій, який встановлюється на виході напірної рукавної лінії, призначений для формування, спрямування та (або) регулювання струменя вогнегасної речовини;

установка водяного пожежогасіння – установка пожежогасіння, яка споряджується водною вогнегасною речовиною;

пожежне обладнання – обладнання, призначене для відбирання, транспортування, регулювання витрат, формування і спрямування струменів вогнегасних речовин із застосуванням пожежних машин або мережі водопостачання, а також допоміжні засоби його застосування та технічного обслуговування.

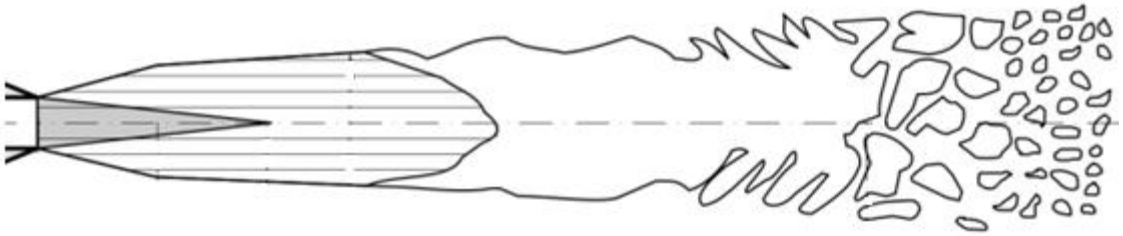


Рис. 1.1 – Схематичне подання водяного струменя

Потоки рідини, або режими її руху (рис. 1.2), можна поділити на кілька основних типів. Напірні потоки характеризуються тим, що тиск у будь-якій точці перевищує атмосферний і забезпечує примусовий рух рідини. Безнапірні потоки мають вільну поверхню під атмосферним тиском, а рух рідини відбувається під дією власної ваги та гравітаційних сил. Вільні струмені не обмежені твердими стінками, і переміщення рідини здійснюється під дією інерції та ваги самої рідини.

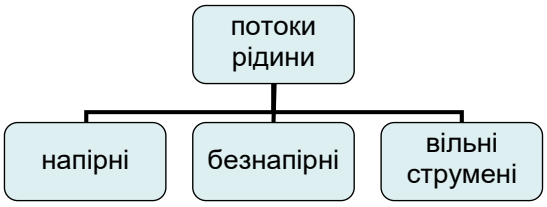


Рис.1.2 – Типи потоків рідини

В роботі йдеться про вільні струмені, що утворюються з напірних потоків шляхом їх формування спеціальними технічними пристроями. Оскільки робота перш за все орієнтована на вирішення задач та забезпечення потреб оперативно-рятувальної служби (ОРС) ДСНС України, перед усім пожежно-рятувальних підрозділів, далі йтиметься про окремий клас вільних струменів – гідравлічні струмені, а також його підклас – водяні струмені. Класифікуючи гідравлічні струмені за різними ознаками, слід виділити їх дві великі групи: затоплені й незатоплені.

Затоплені гідравлічні струмені становлять практичний інтерес при вирішенні завдань змішування рідин, тепло- і масообміну тощо.

Незатоплені струмені, які витікають у газове середовище (наприклад, у повітря чи задимлене середовище), складають особливий інтерес для ОРС. Найчастіше вони використовуються безпосередньо під час гасіння пожеж або при виконанні різного роду аварійно-рятувальних робіт. Картина формування гідравлічного струменя, у випадку, коли він застосовується для потреб пожежогасіння, не завершується етапом його виходу із пожежного ствола чи насадки, оскільки після моменту вильоту гідравлічного струменя його структура суттєво змінюється унаслідок особливостей середовища, в яке він потрапляє. Так, на структуру гідравлічного струменя, що подається в зону горіння, впливають тиск та швидкість рідини на виході зі ствола, діаметр вихідного отвору ствола, витрати рідини, наявність домішок в потоці, кут подачі струменя, особливості теплових потоків поблизу вогнища пожежі, навколишнє середовище тощо. Врахування усіх факторів впливу на гідравлічний струмінь від моменту його вильоту зі ствола до моменту його потрапляння у зону горіння є особливо важливим, оскільки саме від характеристик отриманого розпиленого водяного струменя в осередку пожежі може безпосередньо залежати ефективність виконання пожежогасіння, перед усім здатність відбору тепла із зони горіння [21].

Протипожежні гідроструминні технології [22], як важливий інструмент вивчення і застосування гідроструменів, об'єднують: гідравлічні струмені в системах гідропневмоавтоматики (автоматичне керування різними процесами), газові струмені (у випадках до- і надзвукового плину), протипожежні струмені (стаціонарні, пульсуючі і імпульсні, рис. 1.3). Важливо, що протипожежні струмені в літературі іноді називають пожежними струменями, що принципово помилково, зважаючи на ціль, з якою вони використовуються.

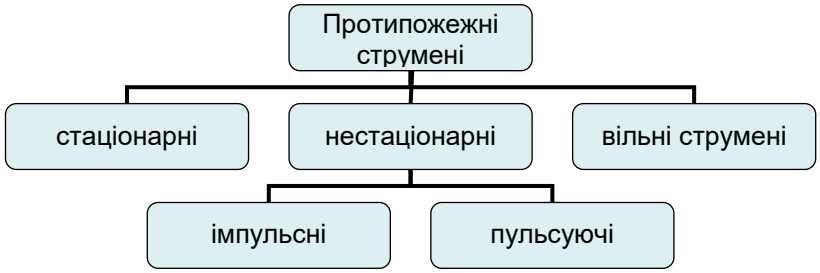


Рис. 1.3 – Типи протипожежних (вогнегасних) струменів

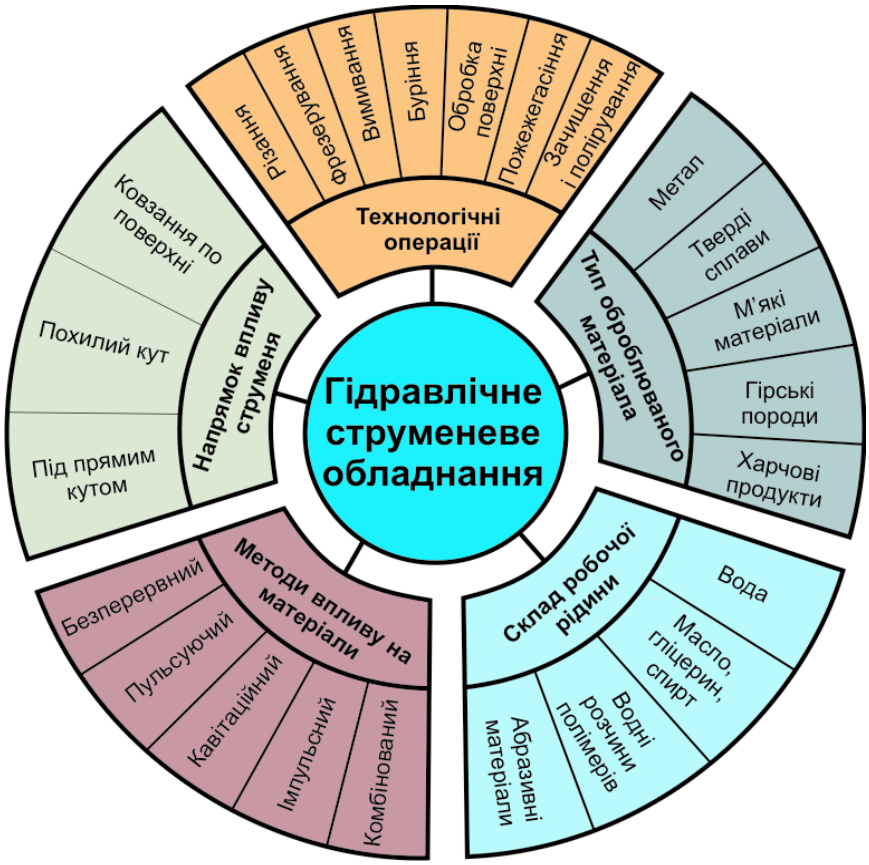


Рис. 1.4 – Класифікація гідравлічного струминного обладнання

Технічна реалізація наукових основ гідродинаміки водяних струменів для потреб ОРС має бути забезпечена створенням ефективного гідравлічного струминного обладнання. Загалом діаграма використання гідравлічного обладнання подана на рис. 1.4 [22].

У роботі розглядаються технологічні операції, за якими класифікується гідравлічне струминне обладнання, та склад робочої рідини, що у ньому застосовується (рис. 1.5).



Рис. 1.5 – Досліджувані складові гідравлічного струминного обладнання

У більшості випадків у роботі йдеться про пожежогасіння, як основну технологічну операцію для гідроструминного обладнання обраного типу, для якого вода та водні розчини поверхнево-активних речовин є складом робочої рідини (рис. 1.6). Фактично, зазначене є уточненням зони дослідження складових гідравлічного струминного обладнання у рамках даного дослідження.

Закономірності розвитку і гасіння пожежі на сучасних виробництвах із урахуванням специфічних особливостей процесів горіння в залежності від виду об'єкта та агрегатного стану горючого матеріалу детально розглянуті у [23], також особлива увага приділена питанням домінуючого напрямку розвитку пожежі і факторів, що його визначають, докладно розглянуті механізми припинення процесів горіння, що лежать в основі дій з гасіння пожежі, енергетика пожежі. Разом із тим, значно менше уваги приділено основним видам вогнегасних засобів, що застосовуються для цілей пожежогасіння.



Рис. 1.6 – «Звуження» зони дослідження складових гідравлічного струминного обладнання (протипожежні гідроструминні технології)

Типовий сценарій розвитку $(t \ldots t_1)$, локалізації $(t_1 \ldots t_2)$ та ліквідації $(t_2 \ldots t_{\text{лік}})$ пожежі показаний на рис. 1.7, де S – площа пожежі, ΔQ_T – теплова характеристика пожежі. Коли $\Delta Q_T > 0$, відбувається зростання виділення теплоти, що означає потенційну можливість розростання пожежі. Зменшення виділення теплоти $(\Delta Q_T > 0)$ зазвичай забезпечується застосуванням охолоджувальної дії гідравлічних струменів, що використовуються, й пояснюється охолоджувальною здатністю води, що має високу питому теплоту випаровування й хімічну інертність стосовно більшості речовин і матеріалів. Таким чином, методи локалізації пожеж та боротьби з ними перед усім пов'язані із застосуванням води та водних розчинів піноутворювачів.

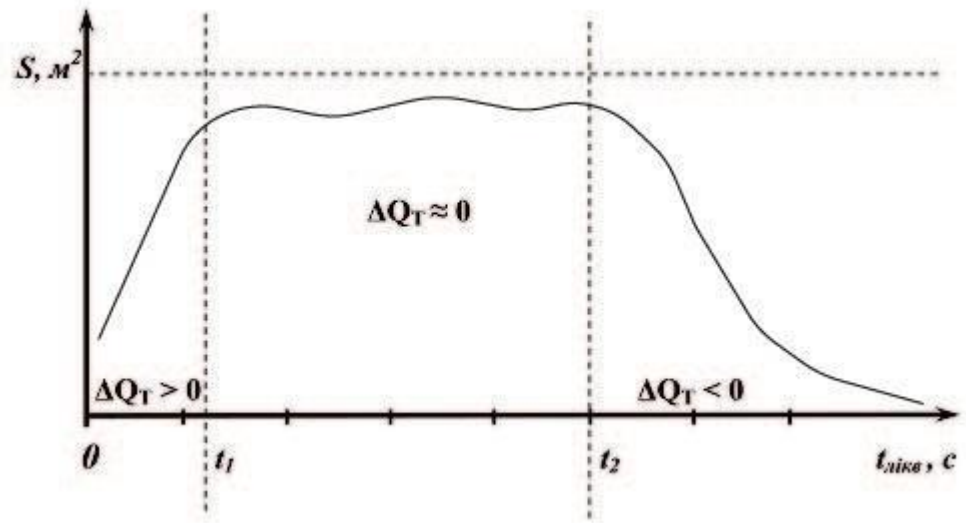


Рис. 1.7 – Етапи пожежі, якісна картина

Зазначимо, що подання на рис. 1.7 етапів пожежі є досить умовним, вказує лише на якісну картину пожежогасіння (без поділу на площу пожежі й площу гасіння, потрібних витрат вогнегасної речовини й фактичного їх значення тощо), а часова характеристика (тривалість) кожного з етапів може мати суттєво інший вигляд [24, 25]. Більш детально про вищезазначене йтиметься при розгляді особливостей застосування різних типів водяних вогнегасних струменів (§2.5). Разом із тим, підхід до опису етапів пожежі співпадає із загальноприйнятими у подібних випадках [26].

Окрім безпосередньо пожежогасіння, застосування систем генерування гідроструменів може бути ефективним для охолодження поверхонь, осадження небезпечних речовин, створення теплових бар'єрів тощо. Можуть використовуватися радіальні, пласкі, віялові та інші типи струменів, сформовані за допомогою різноманітних типів стволів та насадок, пожежного обладнання [19], а генерування струменів може здійснюватися зі змінним у часі значенням кута до горизонту.

Слід зауважити, що питанням вивчення й застосування механізмів припинення процесів горіння та визначення домінуючого напрямку розвитку пожеж приділяється значна увага, проте залишаються недостатньо висвітленими енергетика пожеж й, особливо, використання гідроструменів.

Тим не менш, саме вони залишаються одними з основних видів вогнегасних засобів, що застосовуються для цілей пожежогасіння. Йдеться про недостатнє й малоефективне у більшості випадків використання фізичних особливостей унікального вогнегасного засобу – води та водних розчинів деяких речовин. Саме тому в роботі значна увага зосереджена на питаннях дослідження гідродинамічних систем генерування потоків рідин у пожежному обладнанні загалом й розробки методів, алгоритмів, методик та підходів щодо створення таких систем зокрема.

1.2. Особливості гідродинаміки потоків у струминоформувальних пристроях протипожежної техніки та пожежному обладнанні

Плин в'язкої рідини в пожежних стволах можна розглядати з позиції гідродинамічної початкової ділянки. Як відомо [27], у стволі потік можна подати так, що він складатиметься із декількох зон: зони існування області розрідження, кільцевої ізольованої порожнини й, нарешті, зони нестабілізованого потоку. Існують такі стволи, у яких зона нестабілізованого потоку відіграє визначальну роль для плину рідини. Серед таких стволів можна виділити ті, що відповідно до області їх застосування отримали назву пожежних стволів, хоча відзначимо, що вогнеборці розрізняють пожежні стволи й насадки. У випадку, якщо відношення довжини внутрішнього струминоформувального каналу до його внутрішнього діаметра менше чотирьох, пристрій зазвичай називають насадкою.

У випадку, коли довжина початкової ділянки в насадці незначна, то відповідно до рекомендацій, наведених в [27], коефіцієнт витрати μ є функцією числа Рейнольдса Re [28, 29].

У більш загальному випадку, коефіцієнт витрати μ може бути поданий у вигляді функції критеріїв Рейнольдса (Re); Фруда (Fr) і Вебера (We)

$$\mu = f\left(Re,\ Fr,\ We,\ {}^{Z}/_{D}\right), \tag{1.1}$$

де ${}^{Z}/_{D}$ - відношення довжини ствола до його діаметра.

Потік у стволах й насадках зі змінною витратою рідини. Питанням потоку рідини в каналах зі змінною по довжині потоку витратою приділяється досить багато уваги [30]. Ще на початку минулого століття І. В. Мещерський і Г. А. Петров стосовно нестисливої рідини запропоновали застосовувати наступне рівняння

$$d\left(\frac{\alpha_0 Q^2}{2\mathrm{g}S^2}\right) + \frac{dp}{\rho \mathrm{g}} + dx + Idx + \frac{\alpha_0 U(U-\Delta U)}{\mathrm{g}}\,\frac{dQ}{Q} = 0, \tag{1.2}$$

де α_0 – коефіцієнт кінетичної енергії, що враховує нерівномірність розподілу швидкостей за течією потоку; S – площа поперечного перерізу потоку; I – гідравлічний ухил; ΔU – проекція на вісь каналу швидкості «доданої» витрати Q.

Дане рівняння можна інтегрувати тільки тоді, коли відомі закон розподілу витрати уздовж руху рідини й величина ΔU.

Автори Г. О. Дрейцер та П. М. Марковський надали оцінку впливу змінної витрати на турбулентну структуру потоку в трубі [31].

Розглядаючи потік у пожежних стволах і насадках, зміну витрати можна забезпечити за рахунок подачі у кільцеву ізольовану порожнину (рис. 1.8, перетин Б-Б) додаткової частини рідини [22]. У цьому випадку буде спостерігатися й зміна тиску p_{min} й $p_{\text{вх}}$. Таку подачу рідини можна робити, наприклад, у перетині А-А (рис. 1.8).

При зазначеному способі введення в потік додаткової рідини (або якого-небудь розчину) кількістю $dQ_{\text{дод}}$ відбувається зміна умов плину у вхідному перетині ствола, а також перерозподіляється тиск по його довжині. Дослідження впливу подібного «вдування» дозволили одержати залежності, що характеризують зміни тиску вздовж ствола при різних співвідношеннях

основної $Q_{\text{осн}}$ й додаткової $Q_{\text{дод}}$ витрат, тобто при різних значеннях відношення $Q_{\text{дод}}/Q_{\text{осн}}$. Для води характеристика зміни величини $p/0{,}5\rho U_{\text{сер}}^2$ по довжині плоскої насадки подана на рис. 1.9.

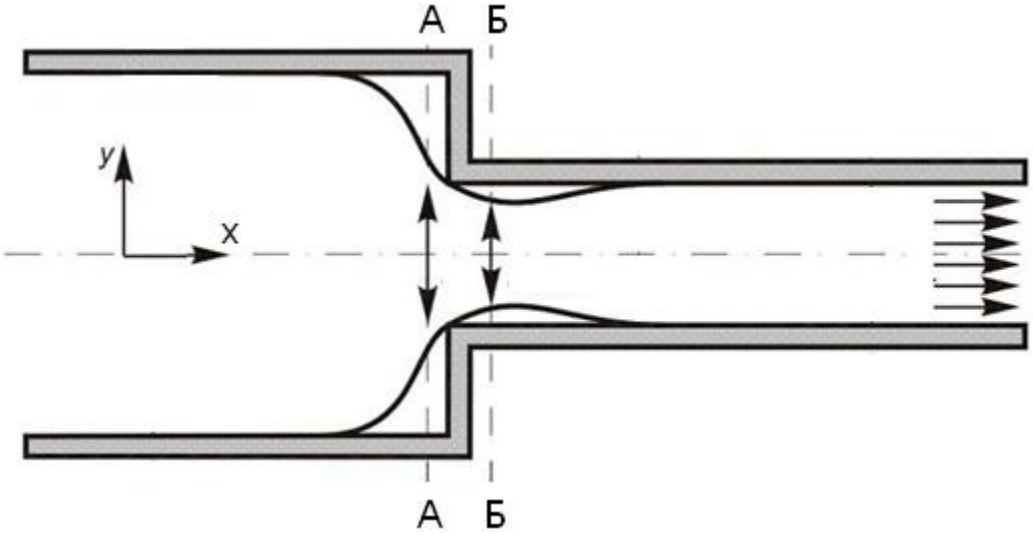


Рис. 1.8 – Зони зміни тиску та можливого регулювання витрат ствола (насадки)

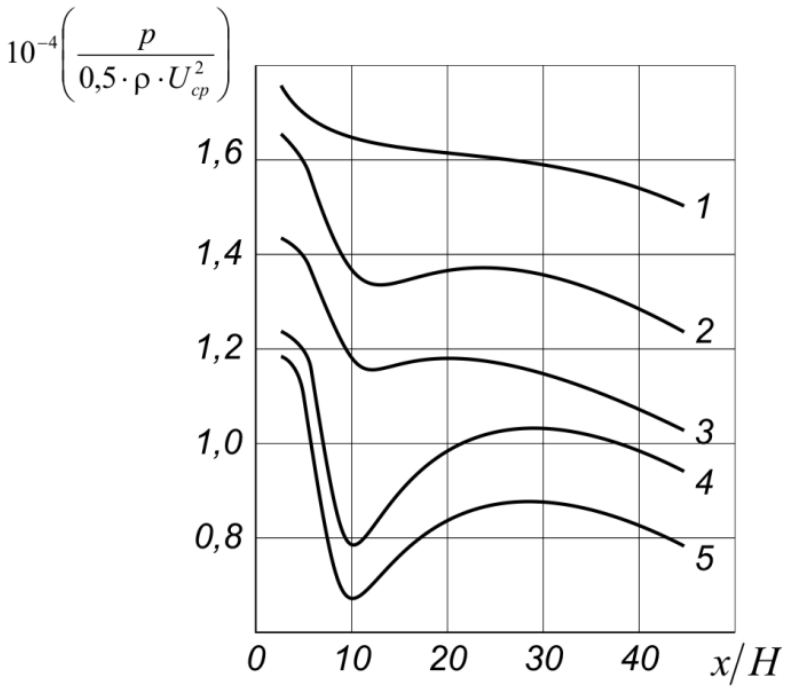


Рис. 1.9. Зміна тиску по довжині плоскої насадки залежно від співвідношення $Q_{\text{дод}}/Q_{\text{осн}}$ $(Re = 4 \cdot 10^3)$,

$$1-0{,}24;\ 2-0{,}19;\ 3-0{,}13;\ 4-0{,}07;\ 5-0{,}00\ (Q_{\text{дод}}=0)$$

Як видно із рис. 1.9, зі збільшенням співвідношення між додатковою $Q_{\text{дод}}$ (тією, «що вдувається») й основною витратою рідини $Q_{\text{осн}}$ змінюється характер залежності $p=f(x)$ й положення екстремальних точок. При певних значеннях $Q_{\text{дод}}/Q_{\text{осн}}$ (рис. 1.9) точка мінімуму $p/0{,}5\rho U_{\text{сер}}^2$ перестає бути критичною. При $Re=5{,}8\cdot10^2\ldots1{,}3\cdot10^8$ у діапазоні значень співвідношення $Q_{\text{дод}}/Q_{\text{осн}}=0{,}16\ldots0{,}26$ аномальні явища в розглянутій кривій з экстремумом p_{min} «розмиваються». За таких умов епюра швидкостей на вході в початкову ділянку буде близькою до прямокутної форми. При $Q_{\text{дод}}/Q_{\text{осн}}\cong0{,}30$ розподіл тисків по довжині ствола (насадки) відповідає розподілу, що характерний для початкової ділянки. Значення тиску p_{min}, як функції величини відношення $Q_{\text{дод}}/Q_{\text{осн}}$, можна обчислити за формулою [28]

$$\frac{p_{min}}{p_{\text{вх}}}=\left(1+\frac{Q_{\text{дод}}}{Q_{\text{осн}}}\right)^{\varphi(Re)},$$

де функція $\varphi(Re)$ в розглянутому діапазоні чисел Рейнольдса Re досить близька до лінійної [28].

Нарешті, слід зазначити, що якщо ствол має досить велику довжину, тобто в його межах перебуває уся гідродинамічна початкова ділянка, то величина $Q_{\text{дод}}/Q_{\text{осн}}$ суттєво впливає не тільки на перепад тисків Δp на початковій ділянці але й на довжину початкової ділянки. Досліди, проведені для стволів, довжина яких $Z>Z_{\text{пд}}$ показали яким чином проявляється даний вплив (табл. 1.2) [28].

Як видно з табл. 1.1, критерій Эйлера $\frac{\Delta p}{\rho U_{\text{сер}}^2}$ суттєво залежить від величини $Q_{\text{дод}}/Q_{\text{осн}}$ й зростає нелінійно з ростом значення цього відношення. Окрім того, дане відношення впливає також і на довжину гідродинамічної початкової ділянки.

Таблиця 1.1

Залежність безрозмірної величини $2\Delta p/\rho U_{\text{сер}}^2$ на початковій ділянці від відношення $Q_{\text{дод}}/Q_{\text{осн}}$

$Re, 10^4$	$Q_{\text{дод}}/Q_{\text{осн}}$	$\frac{2\Delta p}{\rho U_{\text{сер}}^2}, 10^{-4}$ при $x = Z_{\text{пд}}$	$Re, 10^4$	$Q_{\text{дод}}/Q_{\text{осн}}$	$\frac{\Delta p}{0{,}5\rho U_{\text{сер}}^2}, 10^{-4}$ при $x = Z_{\text{пд}}$
1,5	0,10	9,7	2,6	0,05	9,8
	0,16	3,33		0,09	11,87
	0,28	7,65		0,23	3,65
	0,38	3,22		0,26	6,97
1,8	0,06	5,06	4,0	0,07	5,03
	0,08	2,60		0,13	4,81
	0,16	2,88		0,19	5,25
	0,22	5,92		0,24	8,42
	0,28	9,78		0,26	10,03
	0,34	15,24			

Таким чином, проведений аналіз течії в’язких і аномально в’язких рідин у стволах дав змогу виявити ключові особливості гідродинамічної поведінки потоку. Охарактеризовано закономірності формування полів тиску та швидкості, а також обґрунтовано ефективність регулювання цих характеристик шляхом застосування додаткового введення рідини.

Застосування піноутворювачів. Протягом багатьох століть основним засобом ліквідації пожеж залишалася вода, проте з часом було встановлено, що у деяких випадках водні розчини певних хімічних сполук можуть діяти

ефективніше за чисту воду [32]. Результативність пожежогасіння визначається не лише типом вогнегасної речовини, а й її якістю та способом застосування. Серед сучасних засобів гасіння, таких як водні розчини, тонкодисперсні водні аерозолі, порошкові й газові вогнегасники, особливе місце займають піноутворювачі.

Попри значну кількість наукових праць, у сучасній літературі й досі зберігається низка невирішених питань, що стосуються використання реологічних властивостей рідких поверхнево-активних речовин (ПАР) різної концентрації у процесах пожежогасіння. Проєктування нових конструкцій пожежних стволів і насадок, призначених для роботи з ПАР, потребує виконання спеціалізованих гідравлічних розрахунків потоків у формувальному обладнанні, а також детального вивчення реологічних характеристик піноутворювачів, до складу яких входять поверхнево-активні компоненти.

Молекулярна будова ПАР характеризується наявністю двох функціонально різних частин: полярної групи, що забезпечує їхню розчинність у полярних середовищах, та неполярного вуглеводневого радикала. Під час адсорбції на межі поділу фаз «рідина–газ» полярні фрагменти молекул орієнтуються в рідкій фазі, тоді як гідрофобні ланцюги спрямовуються в газове середовище.

Низька полярність гідрофобних частин молекул ПАР зумовлює зменшення поверхневого натягу їх водних розчинів. Поєднання зниження поверхневого натягу з його локальними змінами, що виникають унаслідок варіювання концентрації ПАР, визначає здатність таких систем до утворення та стабілізації піни.

Піноутворювачі, які застосовуються у практиці пожежогасіння, зазвичай є концентрованими розчинами поверхнево-активних речовин. Для приготування робочого піноутворювального розчину концентрат розводять водою до вмісту ПАР у межах 1–6 %, причому необхідна концентрація

визначається типом використовуваного піноутворювача. Ширина цього концентраційного діапазону обумовлена фізико-хімічною природою ПАР, на основі яких виготовлено відповідні піноутворювальні склади.

В перші роки незалежності Україні широко застосовувався біологічно “жорсткий” піноутворювач загального призначення для гасіння пожеж «ПО–6К». Досить довго на багатьох підприємствах лишалися запаси біологічно “жорстких” піноутворювачів загального призначення для гасіння пожеж «ПО–1» та «ПО–1Д», які нині знято із виробництва. Піноутворювачі «ПО-6К», «ПО–1» та «ПО–1Д» не відповідають вимогам ДСТУ 3789:2015 [40].

В Україні дослідження щодо розроблення нових рецептур піноутворювачів загального та спеціального призначення для гасіння пожеж, а також технологій їх застосування проводили Антонов А. В. [41, 42], Білкун Д.Г. [43], Жартовський В. М. [44], Ковалишин В. В. [45, 47-50], Боровіков В. О. [45], Огурцов С. Ю. [42], Скоробагатько Т. М.[46], Стилик І. Г. [41-42], Войтович Т. М. [47] та ін.

В Україні формування власної бази пінних засобів пожежогасіння розпочалося наприкінці минулого століття. Одним із перших виробників спеціалізованих піноутворювачів стала корпорація «Укрспецмонтаж» (ТОВ «Нові Будівельні Технології»), що входить до міжнародної асоціації «Пожежна безпека України». Починаючи з 1999 року, підприємством було освоєно серійний випуск піноутворювачів «ППЛВ–(Універсал)» марок 103, 103М, 106 та 106М, які за своїми експлуатаційними властивостями можуть розглядатися як заміна імпортних плівкоутворювальних аналогів [50, 52]. Паралельно на Горлівському хімічному заводі Донецької області налагоджено виробництво синтетичного піноутворювача загального призначення «Пегас», характеристики якого відповідають показникам відомого російського засобу «ПО–3НП».

Значну роль у розвитку національних розробок відіграли наукові установи. Зокрема, фахівцями Українського науково-дослідного інституту

пожежної безпеки ДСНС України було створено піноутворювач загального призначення «Сніжок–1», промислове виготовлення якого згодом здійснювалося на виробничих потужностях НВП «Пірена». У подальшому асортимент вітчизняних пінних концентратів суттєво розширився і нині охоплює низку продуктів, серед яких «Пірена-1», «Пірена-2», «Пірена-3», «Пірена-4» (НВП «Пірена»), «Софір» (ТОВ «Фірма “СОЮЗ, ЛТД”»), «АЛЬПЕН» (ТОВ «Альхім»), «Барс» (НВП «Вогнеборець») та інші.

За своєю хімічною природою піноутворювачі являють собою складні водні композиції, до складу яких входять поверхнево-активні речовини одного або кількох типів, а також комплекс допоміжних компонентів. Такі добавки виконують функції стабілізації піни за дії температурних і гідростатичних навантажень, зниження температури кристалізації концентрату, захисту металевих елементів обладнання від корозії та забезпечення сумісності інгредієнтів у межах єдиної системи.

Широкі експлуатаційні можливості мають піноутворювачі, до складу яких входять вуглеводневі та фторвмісні поверхнево-активні речовини у поєднанні з водорозчинними полімерами. Такі композиції дозволяють отримувати піни низької, середньої та високої кратності й можуть застосовуватися для гасіння більшості видів горючих і легкозаймистих рідин, а також твердих горючих матеріалів із використанням різноманітних типів пожежно-технічних засобів.

Класифікація піноутворювачів здійснюється за типом поверхнево-активної основи, відповідно до чого виділяють протеїнові (включно з фторпротеїновими) та синтетичні (фторсинтетичні) склади [37].

Вітчизняний стандарт ДСТУ 3789:2015 [40] передбачає поділ усіх піноутворювачів для гасіння пожеж на піноутворювачі загального призначення та піноутворювачі спеціального призначення. Піноутворювачі загального призначення – це здебільшого піноутворювачі, основою яких є синтетичні аніонактивні ПАР, використовуються для отримання пін та розчинів змочувачів при гасінні пожеж нафти, нафтопродуктів та твердих

горючих матеріалів. До піноутворювачів спеціального призначення належать плівкоутворювальні піноутворювачі, піноутворювачі, придатні до застосування з морською водою, при низьких температурах, піноутворювачі для гасіння полярних рідин та ін.

Як зазначено [37], протягом усієї історії вдосконалення піноутворювачів фізико-хімічні властивості змінювались в бік зниження експлуатаційних витрат – забезпечення більш тривалого зберігання за рахунок зменшення корозійної активності, збільшення стабільності при зберіганні, зниження температури замерзання, зменшення робочої концентрації і т.д. Споживчі характеристики піноутворювачів і, зокрема, обгороджуюча та піноутворююча здатність розвиваються в бік універсалізації, що потребує розширення діапазону властивостей.

У наукових дослідженнях, присвячених піноутворювачам і технологіям їх застосування, основна увага зосереджується на розробці нових рецептур пінних концентратів [53, 54]. Такі роботи, як правило, спрямовані на підвищення вогнегасної ефективності піноутворювачів [55–57], збільшення стійкості утворюваної піни [58], а також на вивчення інтенсивності та способів подавання піноутворювальних розчинів [48, 61]. Водночас питання врахування реологічних властивостей піноутворювачів і їх водних розчинів залишаються недостатньо дослідженими, попри їх важливість для підвищення точності гідравлічних розрахунків пожежних стволів і насадок, у яких формується пожежний струмінь, а також для обґрунтування можливості їх застосування в установках водяного пожежогасіння.

1.3. Стволи із круглим поперечним перетином

Питання плину рідини в пожежному стволі (його внутрішньому струминоформувальному каналі) досить добре вивчені й описані в цілому ряді робіт, а базові залежності для усталеного осесиметричного плину стосовно

компонент поздовжньої та поперечної швидкостей для сферичної системи координат надав Л. Д. Ландау [62] ще у 1944 р. У більшості випадків для руху рідин у каналах робиться припущення, що потік умовно може бути розділений на дві зони: початкову ділянку й зону стабілізованого руху [30, 63, 64]. Такий поділ базується на теоретичних розрахунках і підтверджений багаточисельними результатами експериментальних досліджень кінематичних і динамічних властивостей потоків рідин [65, 66].

Питання витікання рідин через отвори й насадки розглянуті достатньо детально [67, 68], і для випадку циліндричних, звужуючих або розбіжних конусних отворів при розрахунку характеристик одержуваних з їхньою допомогою струменів ніяких складностей не виникає [69, 70].

Ділянка стабілізованої стоксівскої течії характеризується стійким значенням градієнта тиску по довжині $\frac{\partial p}{\partial x}$

$$grad\ p = const\ .$$

Особливості формування швидкостей і тисків на гідродинамічній початковій ділянці продемонстровано на рис 1.10, де пунктирна лінія відповідає стабілізованій, а суцільна – початковій ділянкам.

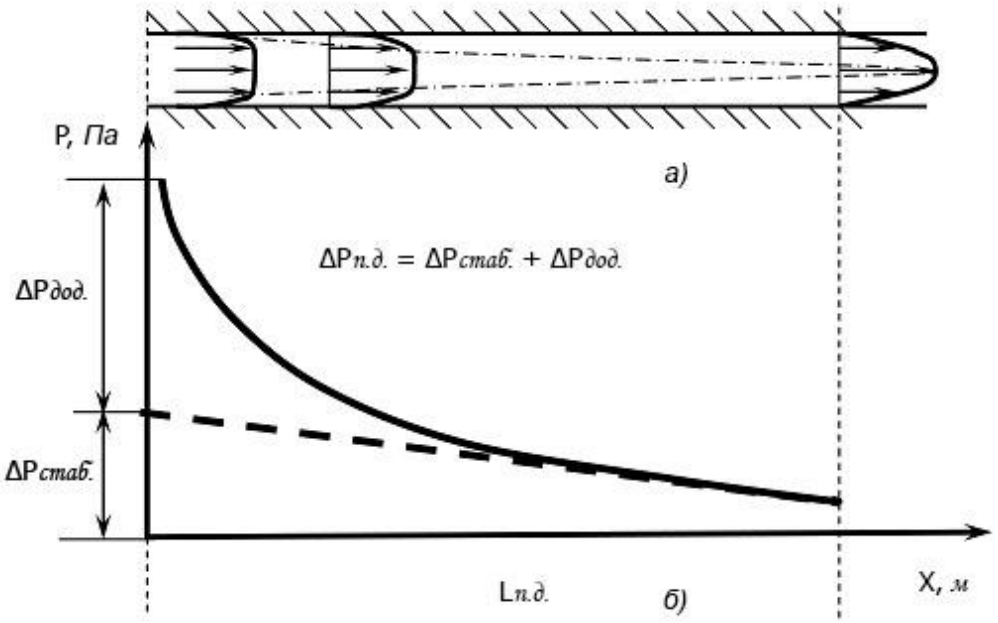


Рис. 1.10 – Деформація епюри швидкостей і тисків на гідродинамічній початковій ділянці [71]; а) епюри швидкостей; б) розподіл тисків

Вивчення та співставлення особливостей нестабілізованого руху вогнегасних рідин у каналах і початкових ділянок компактної частини струменя дає можливість спробувати провести окремі припущення, суттю яких є наступні твердження. Використанням розрахункових та дослідних даних можна скористатися для визначення залежності діаметра струменів від відстані до насадки, залежності безрозмірної довжини початкової ділянки струменя від тиску перед насадкою або від числа Рейнольдса тощо. Аналіз потоків рідин в каналах і струменів у повітряному середовищі дає підстави вбачати можливим розгляд початкової ділянки компактної частини струменя аналогічно до гарно дослідженої моделі нестабілізованого плину рідини у стволі чи насадці. Таким чином, провівши ряд досліджень, можна буде визначити яким повинне бути значення тиску на вході до струминоформувального обладнання, щоб отримати струмені з потрібними параметрами для виконання необхідних завдань при проведенні різних аварійно-рятувальних робіт, пожежогасіння, очищення завалів й руйнування конструкцій тощо.

Гідродинамічна початкова ділянка у вхідній зоні пожежних стволів з циліндричним типом внутрішнього каналу. Додатковий перепад тиску $\Delta p_{\text{дод}}$ (рис. 1.10) передусім обумовлений енергією, затрачуваною на прискорення потоку ядра течії вогнегасної рідини на початковій ділянці внаслідок утворення граничного прошарку на стінках каналу, що виникає через сили вязкого тертя, нестисливості рідини й безперервності потоку, а також через інерцію часток, що рухаються. При цьому відбувається деформація профілю швидкості уздовж каналу із прискоренням у центральній частині потоку рідини [72].

Під час оцінювання гідравлічних втрат енергії в умовах стабілізованої та дестабілізованої стоксівської течії, як на початковій ділянці руху, так і за її межами, традиційно використовується критерій Рейнольдса як основний

безрозмірний параметр, що характеризує режим течії. Такий підхід є коректним за умови ізотермічності потоку та нестисливості рідини. Для руху води в пожежному стволі зазначені припущення виконуються. Аналіз течії на початковій ділянці, з метою оцінювання впливу інерційних сил на формування потоку, ґрунтується на зіставленні отриманих гідродинамічних характеристик із відповідними параметрами, притаманними повністю стабілізованому режиму течії [71].

Оскільки для формування ефективного вогнегасного струменя на виході ствола потік повинен бути стабілізованим, доцільним є застосування стволів та різних насадок, довжина яких перевищує розмір початкової нестабілізованої ділянки потоку. При цьому довжина початкової ділянки $\Delta L_{\text{пд}}$ перебуває в прямопропорційній залежності від значень числа Рейнольдса Re й діаметра ствола D

$$\Delta L_{\text{пд}} \sim Re \sim D \ ,$$

$$\Delta L_{\text{пд}} = const\ Re \cdot D \ ,$$

де у випадку каналу із круглим поперечним перерізом внутрішнього каналу пожежного ствола коефіцієнт пропорційності може бути обраний у діапазоні 0,16…0,2 [71].

Серед основних параметрів, якими характеризується стабілізований ламінарний потік, потрібно насамперед виділити розподіл поздовжньої швидкості руху потоку u_x, його об'ємну витрату Q, градієнт тиску $grad\ p$.

Для того, щоб досліджувати розподіл швидкості u_x уздовж радіуса каналу r залежно від його довжини x, і, враховуючи, що мова йде про осьові компоненти потоку, то для розрахунку слід розглянути аксіальну частину рівняння Нав'є–Стокса в циліндричних координатах [73]

$$\rho\left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_r\frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{u_\varphi}{r}\frac{\partial u_x}{\partial \varphi} + u_x\frac{\partial u_x}{\partial x}\right) =$$

$$K - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial u_x^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_x}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 u_x}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}\right), \qquad (1.3)$$

де p – тиск, ρ – густина, μ – динамічна в'язкість. K – зовнішні сили (у нашому випадку їх визначаємо рівними нулю), член $\frac{\partial u_x}{\partial t}$ для стаціонарного потоку дорівнює нулю. Внаслідок безперервності потоку й осьової симетрії ($u_\varphi = 0$) випливає, що $\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} = 0$.

Таким чином, рівняння (1.3) набуває вигляду

$$\rho\left(u_r\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x\frac{\partial u_x}{\partial x}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial u_x^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_x}{\partial r}\right), \tag{1.4}$$

З рівняння (1.4) можна зробити висновок, що досліджуваний перепад тиску $\frac{\partial p}{\partial x}$, обумовлений трьома причинами [73]:

– втратою енергії на подолання тертя $\mu\left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u_x}{\partial r}\right)$;

– інерцією частинок, що рухаються радіально $\rho\left(u_r\frac{\partial u_x}{\partial r}\right)$;

– інерцією частинок, що рухаються аксіально $\rho\left(u_x\frac{\partial u_x}{\partial x}\right)$.

Відношення, що виражає перепади тиску через швидкість, виражене у рівнянні Дарсі–Вейсбаха, з урахуванням формули Блазіуса, яка застосовується для гідравлічно гладких труб, а також коефіцієнта втрат на тертя по довжині

$$\frac{\partial p}{\partial x_{\text{Бл}}} = -\rho\frac{u_{\text{сер}}^2}{2}\frac{\lambda_{\text{покр}}}{D}\ , \tag{1.5}$$

де $\lambda_{\text{покр}}$ – коефіцієнт втрат на тертя по довжині.

Але, оскільки перепад тиску на вхідній ділянці пожежного ствола (насадки) не може бути незмінним [74], то окрім випадку (1.5) повинен існувати ще один член $\left(\frac{dp}{dx}\right)_u$, що відповідає прояву сил інерції.

Таким чином,

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\partial p}{\partial x_{\text{Бл}}} + \left(\frac{dp}{dx}\right)_u, \tag{1.6}$$

Другий член відображає сили прискорення, необхідні для забезпечення безперервності потоку, коли частина рідини рухається від зовнішнього краю усередину, у такий спосіб згладжуються відмінності між $\left(u_{\text{сер}}\right)^2$ і $u_{\text{сер}}^2$. Ці сили

прискорення ідентичні з $\rho\left(u_r\frac{\partial u_x}{\partial r}\right)$, оскільки додаткова енергія затрачається на внесення часток рідини радіально з повільнішої зони струменя у більш швидку.

Тому записуємо

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_u = -\rho\left(u_r\frac{\partial u_x}{\partial r}\right), \tag{1.7}$$

Середня кінетична енергія $\rho\frac{u_{\text{сер}}^2}{2}$ відрізняється від кінетичної енергії, визначеної для будь-якого фіксованого перерізу інерційного потоку $\rho\frac{u_x^2}{2}$. Оскільки $(u_x^2)_{\text{сер}} > u_{\text{сер}}^2$ для початкової ділянки, зміна кінетичної енергії $\rho\frac{u_x^2}{2}$ може здійснюватися за рахунок тиску, це й пояснює ефект появи $\left(\frac{dp}{dx}\right)_u$.

У цьому випадку основні параметри, якими володіє стабілізований ламінарний потік, визначаються в такий спосіб:

розподіл швидкості

$$u_x = \frac{\Delta p}{4\mu x}(R^2 - r^2)\,;$$

об'ємна витрата

$$Q = \frac{\Delta p \pi R^4}{8\mu x}\ .$$

Для ядра потоку ньютонівскої рідини в каналі після закінчення початкової ділянки стабілізована стоксівска течія описується законами течії ідеальної рідини. Можна вважати також, що рух рідини в ядрі потоку відбувається без вихорів і без помітних пульсацій швидкості.

Застосування гідравлічних вогнегасних струменів з круглими поперечними перерізами. Пожежні стволи та насадки для формування струменів з круглими поперечними перерізами є найуживанішими серед усіх типів струминоформувальних пристроїв, що застосовуються пожежно-рятувальними підрозділами (частинами) ОРС ЦЗ України і окрім пожежогасіння продовжують набувати поширення серед багатьох галузей

діяльності людини, як то гірнича справа [75, 76], різання та подрібнення матеріалів [77, 78], очистка та полірування поверхонь [79, 80], змішування різнорідних речовин [81, 82] тощо. Звичайно, такий широкий діапазон застосування струменів забезпечується великою кількістю технічних пристроїв струминоформування, значними відмінностями та особливостями їх конструктивних рішень. Нині класифікація струминоформувальних пристроїв залежить від галузі застосування останніх. Так для різальних пристроїв низькими вважаються тиски рідин на входах насадок до 7,0 МПа, які у пожежогасінні класифікуються як надвисокі. Подібна ситуація складається і з витратами рідин, що забезпечують струминоформувальні пристрої. Однак, загалом можна говорити про спорідненість загальних закономірностей, що характеризують увесь широкий спектр таких пристроїв. Усе вищезазначене вимагає інтенсивного залучення нових наукових рішень, що покращували б ефективність створюваного обладнання на основі струминоформувальних пристроїв, їх точність, надійність, ергономічність, ексергійні показники тощо.

Довжина початкової ділянки високонапірних струменів (при тиску до 50,0 МПа для насадок 1…10 мм становить 90…100 діаметрів вихідного отвору насадки. Такі струмені поки не застосовуються рятувальниками, проте окреме обладнання (типу COBRA-system) має наближені до них технічні характеристики. Так, наприклад, для формування тонких отворів крізь стіни, що мають бути використані при пожежогасінні для подачі через них високодисперсних вогнегасних середовищ, застосовуються двофазні водяні струмені з абразивними часточками при тиску 20–30МПа. Після формування отвору в нього подається однофазний водяний струмінь для формування водяного туману в закритому приміщенні. Таким чином, застосовуючи зазначені високонапірні струмені, вдається в приміщенні охолодити гази й пальне, знизити концентрацію кисню та збільшити поглинання теплового випромінювання.

Зазначимо, що у деяких випадках, наприклад у проточному тракті пожежного лафетного ствола з гвинтовою структуризацією потоку, є доречним використання перетину прямокутної форми на згині каналу, що дозволяє зменшити втрату від кривизни в 2,5 рази в порівнянні з круглим перетином [83].

Як вказувалося раніше, для циліндричного струменя радіусом R та швидкістю на виході зі ствола U_0 довжина визначається величиною Z, а рівняння руху рідини для симетричного випадку матиме вигляд [22]

$$\frac{dU_z}{dt} = -\frac{1}{p}\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu}{p}\left[\frac{\partial^2 U_2}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rU_2)\right)\right], \tag{1.8}$$

$$\frac{dU_z}{dt} = -\frac{1}{p}\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{p}\left[\frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial U_z}{\partial r}\right)\right], \tag{1.9}$$

де U_2 й U_z - складові вектори швидкості в циліндричній системі координат, p – тиск.

Рівняння суцільності середовища для цього випадку набуває вигляду

$$\frac{dU_z}{dz} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rU_2) = 0, \tag{1.10}$$

Відповідно до [84], рівняння вільної поверхні струменя описується формулою

$$r = R + \mathfrak{z}(z,t), \tag{1.11}$$

де $\mathfrak{z}$ – зсув точки на поверхні.

Складові швидкості U_1 й U_2 відповідно до рівняння нерозривності

$$\frac{\partial U_2}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rU_1) = 0$$

можуть бути записані

$$U_1 = -\frac{1}{r}\frac{\partial \gamma}{\partial z}\ , \qquad U_2 = \frac{1}{r}\frac{\partial \gamma}{\partial z}\ ,$$

де $\psi = \psi(z,r,t)$, функція току.

Тоді маємо

$$\frac{dU_r^0}{dt} = -\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial z}\frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{1}{p}\frac{\partial p^0}{\partial r} + \mu\Delta U_r^0 - \mu\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial \psi}{\partial z}\right)\right], \tag{1.12}$$

$$\frac{dU_z^0}{dt}+\frac{1}{r}\ \frac{\partial}{\partial r}\frac{\partial\psi}{\partial t}=-\frac{1}{p}\frac{\partial p^0}{\partial z}+\mu\Delta U_z^0+\mu\frac{1}{r}\ \frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}+r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial\psi}{\partial z}\right)\right], \quad (1.13)$$

Функція ψ повинна задовольняти рівняння

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial r^2}-\frac{1}{r}\ \frac{\partial\psi}{\partial r}+\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2}=\frac{1}{\mu}\frac{\partial\psi}{\partial t}, \quad (1.14)$$

Рішення рівнянь для потенційної функції φ й функції току ψ шукаємо у вигляді періодичних функцій за z та експоненціальних за t

$$\varphi=\phi(r)\,exp(ikz+\alpha t), \quad (1.15)$$

$$\psi=\psi(r)\,exp(ikz+\alpha t), \quad (1.16)$$

Таким чином, остаточно, для функцій φ й ψ одержуємо

$$\varphi=C_1I_0(kr)exp(ikr+\alpha t)\,, \quad (1.17)$$

$$\psi=C_2rI_1(lr)exp(ikr+\alpha t)\,, \quad (1.18)$$

де $I_1(lr)$ – функція Бесселя першого порядку уявного аргументу.

Базуючись на співвідношеннях (1.17) і (1.18) визначаємо проекції вектора швидкості в струмені, а саме

$$U_r=-ik\{iC_1I_0(kr)+C_2I_1(lr)\}exp(ikr+\alpha t)\,, \quad (1.19)$$

$$U_z=k\left\{iC_1Z_0(kr)+C_2\left[\frac{I_1(lr)}{kr}+\frac{l}{k}I_1'(lr)\right]\right\}exp(ikz+\alpha t)\,, \quad (1.20)$$

$$p=-p\alpha C_1I_0(kr)exp(ikz+\alpha t)\,. \quad (1.21)$$

Якщо α додатне, то можливо необмежене зростання в часі амплітуди поверхневих хвиль, це викликає появу незатухаючих турбулентних пульсацій, наявність яких призводить до розриву суцільності рідини. Для вогнегасного струменя (циліндричного) це пов'язане з появою нестійкості її поверхні. Поверхня струменя нестійка стосовно всіх хвиль, довжина яких відповідає умові

$$kR=\frac{2\pi\alpha}{\lambda}<1\,. \quad (1.22)$$

Точка максимуму, пов’язана з розв’язанням рівняння відносно $d\alpha^2/dk$ відповідає значенню хвильового числа $k=k_{max}=2\pi/(9{,}02\mathrm{R})=0{,}70/\mathrm{R}$ або довжині хвилі $\lambda_{max}=9{,}02R$ (формула Релея).

Слід зауважити, що у випадку великих швидкостей можна одержати [84], що довжина суцільної частини струменя дорівнюватиме $I_{\text{стр}} = \mu/(\rho_{\text{г}} U_{\text{г}})$, де $U_{\text{г}}$ швидкість газу густиною $\rho_{\text{г}}$ на поверхні струменя.

Характерним висновком відповідно до [84], є твердження про те, що довжина суцільної частини струменя зростає із зростанням в'язкості рідини μ. Зазначене є вкрай важливим при використанні піноутворювачів і їх водних розчинів.

Основні параметри пожежних насадок, стволів [22]. Витікання через насадки, як відомо [27, 30], характеризується трьома коефіцієнтами: стиснення ξ, швидкості φ і витрати μ. Витрата й швидкість витікання визначається за формулами

$$Q = \mu s\sqrt{2gH} = \mu s\sqrt{2\frac{p}{\rho}}\,, \tag{1.23}$$

$$U_{\text{сер}} = \varphi\sqrt{2gH} = \varphi\sqrt{2\frac{p}{\rho}}\,, \tag{1.24}$$

де H – висота стовпа рідини перед насадкою, який визначає тиск.

Вейсбах отримав значення коефіцієнтів витрати 0,81…0,43 для насадок з відношенням довжини до діаметра 2,5…3,0. Для конічних збіжних насадок можливе підвищення коефіцієнта до величини μ = 0,946 при куті конусності $\theta = 13°24'$; коефіцієнт швидкості в цьому випадку може становити $\varphi =$ 0,963. У той же час, дані параметри зменшуються для розбіжної конічної насадки. Якщо кут $\theta = 5° \ldots 7°$, то маємо, що $\varphi = \mu = 0{,}45 \ldots 0{,}5$. Безвідривний рух у подібного типу насадках зазвичай спостерігається при кутах $\theta < 13°$.

Приклад ствола із круглим поперечним перетином поданий на рис. 1.11, стволи зазначеної конструкції досить часто застосовуються в системах формування струменів, що розглядаються у роботі.

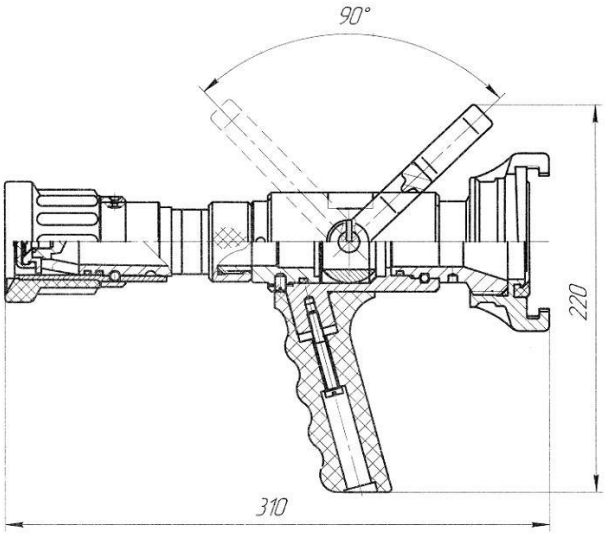


Рис. 1.11 – Ствол СРП-50а

Однією із найважливіших характеристик подібного типу пристроїв є об’ємна витрата, що залежить від швидкості руху рідини та геометричних особливостей струминоформувального каналу.

Для $Re < 100$, не застосовуваного до наших випадків, Френкель Н. З. [85] запропонував залежність

$$\mu = 0{,}42 \lg(0{,}05Re)\,. \tag{1.25}$$

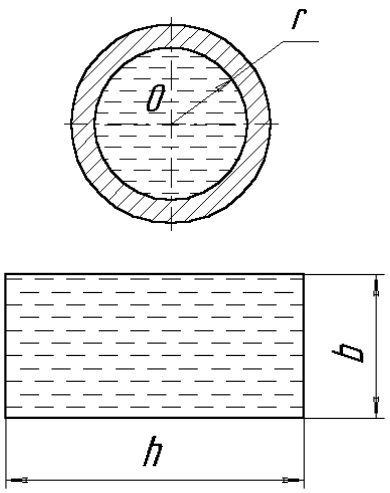
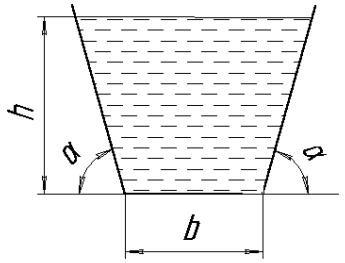
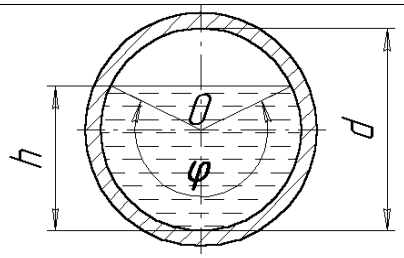
Гельперін Н. І. і Вільніц С. А. [86] провели узагальнення даних про коефіцієнт витрати μ, що дозволило їм отримати наступну залежність

$$\mu = 0{,}172Re^{0{,}182}\eta_0^{-0{,}1}\ , \tag{1.26}$$

де η_0 – відносна в'язкість рідини стосовно води. Дана формула справедлива в межах зміни числа Рейнольдса Re від 10^2 до 10^4, що вже за певних умов можуть мати місце у наших випадках. При $Re < 10^5$ (на вході пожежного ствола) значення μ стабілізується [87].

Таблиця 1.2

Характеристики елементарного струменя з рівномірним розподілом швидкостей U по живому перерізу, об'ємна витрата $Q = U \cdot d\omega$

	$\omega = \pi r^2;$ $\chi = 2\pi r;$ $R_\Gamma = \frac{r}{2}$. $\omega = hb;$ $\chi = 2(h + b);$ $R_\Gamma = \frac{hb}{2(h+b)}$.
	$\omega = (b + h\ ctg\ \alpha)h;$ $\chi = b + 2\frac{h}{\cos\alpha};$ $R_\Gamma = \frac{(b + h\ ctg\ \alpha)h}{b + 2\frac{h}{\cos\alpha}}$.
	$\omega = \frac{1}{8}(\varphi - \sin\varphi)d^2;$ $\chi = \frac{\varphi d}{2};$ $R_\Gamma = \frac{1}{4}\left(1 - \frac{\sin\varphi}{\varphi}\right)d$.

У пожежних стволах для отримання оптимальної форми внутрішнього струминоформувального каналу (з позиції витрат Q та гідравлічного опору ξ) у роботі [87] запропоновано застосовувати конічні збіжні насадки з плавним переходом на виході в циліндричну частину, а для забезпечення руху рідини до насадки у вигляді прямолінійних струменів була запропонована напрямна ствола у вигляді циліндричного або конічного збіжного каналу.

1.4. Спеціальні стволи та насадки з некруглим поперечним перетином

Вплив конструктивних особливостей пожежних стволів та насадок. Вигляд та основні характеристики струменів безпосередньо залежать від пристроїв їх формування, передусім від геометричних особливостей їх внутрішніх каналів. У залежності від форми отвору на виході внутрішнього каналу та довжини каналу, відбувається зміна форми поперечного перерізу струменя. Зміна форми струменя по її довжині, що отримала назву інверсії струменя, є проявом багатьох факторів, що впливають на струмінь після його вильоту із ствола чи насадки. Відомі приклади найпростіших варіантів вихідних отворів (круглого й квадратного) демонструють суттєві відмінності отримуваних за їх допомогою струменів (рис. 1.12). У переважній більшості випадків підрозділи ОРС ЦЗ України застосовують технічне обладнання, що генерує струмені на його виході, із круглим поперечним перерізом. Це пояснюється тим, що таке обладнання є найпростішим конструктивно й дозволяє доставляти струмені на максимальну відстань у порівнянні із іншими варіантами струминоформувальних отворів. Як показують численні досліди, довжина суцільної частини струменя, що так чи інакше є показником дальності його подачі, окрім інших факторів безпосередньо пов’язана з периметром поперечного перерізу струменя. Зрозуміло, що «близкість» до круглої форми гарантує мінімальне значення периметра.

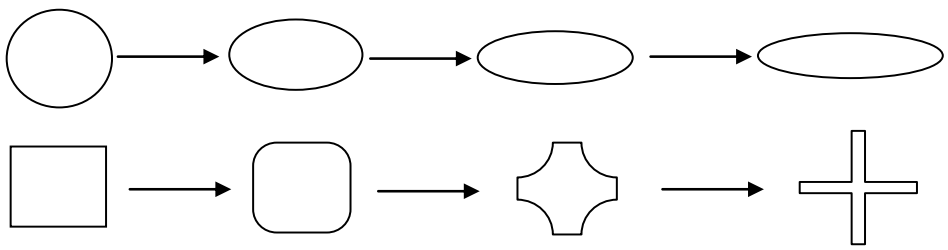


Рис. 1.12. Демонстрація інверсії поперечного перерізу струменів при застосуванні отворів круглої та квадратної форм (з гострим краєм)

При витіканні з некруглих отворів сили поверхневого натягу, що в такому випадку є неврівноваженими по периметру струминоформувального отвору, викликають зміни форми перерізу струменя по його довжині (рис. 1.12). Зазначене відбувається внаслідок прояву інерції рідини.

Важливо, що струмінь, на вході у пожежний ствол чи насадку стискається приблизно так само, як і при витіканні через отвір у тонкій стінці. У залежності від довжини ствола чи насадки струмінь може бути відривним або безвідривним відносно стінок внутрішнього струминоформувального каналу. Зазвичай після стиснення струмінь поступово розширюється до стінок й переміщається всередині каналу аж до вихідного отвору. Забезпечення розширення струменя відбувається за рахунок правильного підбору довжини струминоформувального каналу. При цьому він повинен бути такої довжини, аби гарантувати розширення й, разом із тим, мінімальної довжини, аби задовольняти умовам компактності й зручності застосування. Основними коефіцієнтами, що характеризують струмінь є коефіцієнти кількості руху α^k, енергії α^E та коефіцієнт стиснення β_2

$$\alpha^k = \frac{\int_S U^2 d\omega}{U_{\text{сер}}^2\, \omega}, \alpha^E = \frac{\int_S \Delta U_x^2(x,y) d\omega}{U_{\text{сер}}^2\, \omega}, \beta_2 = \frac{\omega_{\text{Б}}}{\omega}, \quad (1.27)$$

де ω – площа перетину струминоформувального каналу, $\omega_{\text{Б}}$ – площа перетину струминоформувального каналу у зоні звуження (рис. 1.8), x, y – вектори вздовж руху рідини та по нормалі до каналу.

Серед струменів некруглої форми (йдеться про поперечний переріз) перед усім виділемо плоскі струмені. Іноді їх називають пласкими струменями. Їх формування може здійснюватися за допомогою плоскощілинних насадок.

Для усталеного двовимірного руху рідини, яка витікає з отвору в формі довгої щілини, як і для випадку круглого осесиметричного струменя, якщо число Рейнольдса Re перевищує деяке критичне значення, ламінарний плин

переходить в турбулентний, при цьому має той же струминний вигляд, але більш високу швидкість розширення [88].

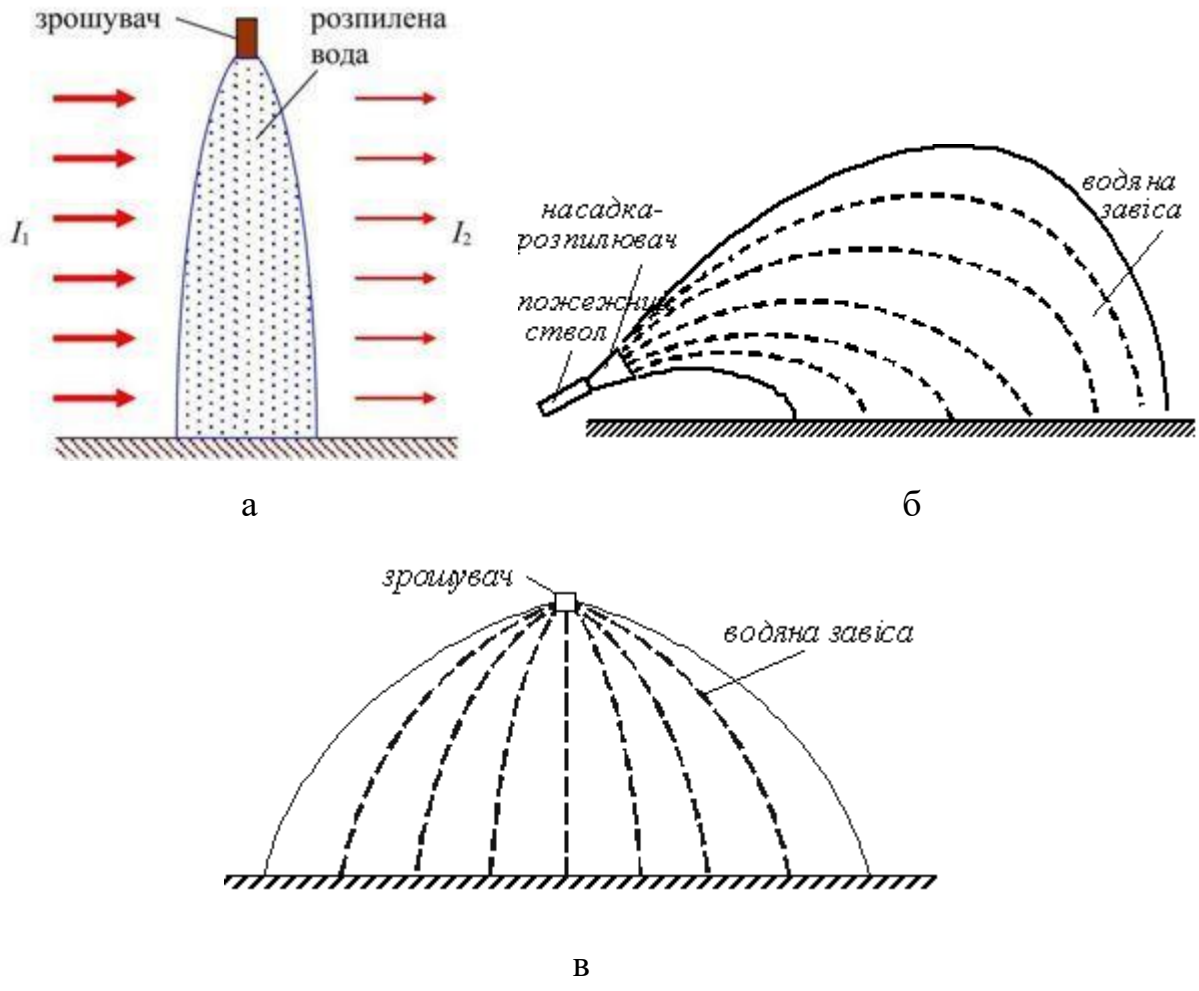
Формування водяних потоків, що застосовуються у пожежогасінні, здійснюється за допомогою використання спеціальних стволів і насадок. Для одержання радіальних струменів і плоских водяних завіс у пожежно-рятувальних підрозділах (частинах) ОРС ЦЗ України застосовується декілька типів стандартних насадок.

Формування водяних завіс, використовуваних для створення ефективних протипожежних розривів між будівлями або іншими об'єктами з метою попередження розповсюдження пожежі між ними, здійснюється за допомогою використання спеціального протипожежного устаткування. Його кінцевим елементом, як правило, є пожежний ствол або насадка. На відкритих територіях перешкодами від теплового випромінювання можуть бути водяні завіси, ефективність яких залежить від товщини створюваної стіни загородження (струменя), щільності краплинного туману, швидкості його осадження, наявності вітру й інших факторів.

Одним із ефективних способів захисту від потужного теплового випромінювання під час пожеж є водяні завіси – спеціально спрямовані струмені розпиленої води. Для їх створення зазвичай застосовують щілинні дренчерні зрошувачі, які формують струмінь у вигляді плоского віяла. Така форма струменя найбільш ефективна для виконання функції теплового екранування. Наразі в Україні відсутні нормативні методики для розрахунку водяних завіс, тому на практиці використовуються розрахункові підходи, призначені для систем гасіння розпиленою водою, які не враховують процес теплового екранування. Очевидно, що це не дозволяє отримати надійні результати. Саме тому виникає потреба у розробці спеціальної методики, яка б дозволяла визначати оптимальні конструктивні параметри та режими роботи таких завіс. В цьому контексті цікаві останні дослідження А. Г. Виноградова та його співавторів [89–92], де запропоновано математичне моделювання

формування водяних завіс та їх взаємодії з тепловим випромінюванням. В цих роботах отримані розрахункові формули, які можуть бути використані для теоретичних розрахунків таких величин, як розміри та кількість зрошувачів, тиск води, витрата води, коефіцієнт теплового екранування тощо. В роботі [93] надані результати експерименту, які підтвердили дані теоретичних розрахунків.

У роботах А. Г. Виноградова, основна увага спрямована на розробку математичної моделі процесу екранування теплового випромінювання струменями розпиленої води – водяними завісами (рис. 1.13, а). Розпилений струмінь може створюватися мобільною (пожежний ствол з розпилювачем, рис. 1.13, б) або стаціонарною системою (один або декілька дренчерних зрошувачів, 1.13, в).



а б

в

Рис. 1.13 – Варіанти виконання мобільної та стаціонарної водяних завіс

Суттєвою частиною математичної моделі є розрахунок параметрів руху окремих крапель і розпиленого струменя в цілому. Зокрема, в роботах [94, 95] виконано аналіз руху окремих сферичних крапель води у нерухомому повітрі. В роботі [96] досліджено вплив на рух крапель вторинних потоків повітря, які виникають внаслідок в'язкої взаємодії повітря з рухомими краплями. В роботі [92] виконано розрахунок процесу утворення розпиленого струменя при його проходження через щілинний зрошувач. Просторові параметри струменя розпиленої води (розміри, просторовий розподіл крапель та їх швидкостей руху) визначено в роботі [97]. Методику розрахунку середнього діаметру крапель розпиленого струменя в залежності від параметрів технологічної системи розроблено в роботі [98].

Експериментальне дослідження захисних водяних завіс, проведене О. В. Лазаренком [99], дозволило визначити гідродинамічні параметри й значення коефіцієнта послаблення теплового потоку від вогнища пожежі при використанн деяких типів насадок. Кращий ефект послаблення теплового потоку (із досліджених насадок) забезпечило використання насадки РВ–12.

Численні дослідження А. Г. Виноградова щодо проникнення теплового випромінювання крізь різні матеріали, серед яких ми можемо вважати й водяну завісу, указують на експонентну залежність теплової провідності стінки залежно від її товщини. Тому «нарощування товщини» стінки в якийсь момент втрачає сенс, погіршуючи при цьому ексергійні характеристики акції пожежогасіння. Не слід при цьому забувати, що наявність вітру (потоків повітря) може серйозним чином змінити загальну картину теплового екранування.

Створення рівнотовщинної завіси–стінки може бути здійснене шляхом використання плоскощілинних насадок. Їхні геометричні розміри й умови використання будуть визначати одержувані профілі завіс.

Найбільше поширення в Україні для одержання розпиленого вертикального струменя одержала щілинна насадка-розпилювач РВ–12, що

дозволяє сформувати стійку водяну завісу площею близько 100 м^2 при товщині до 1,2 м. Насадка встановлюється безпосередньо на поверхню землі, тому водяна завіса має форму півкола, що опирається на власний діаметр.

Перевагою такого способу формування завіси є можливість не здійснювати контроль функціонування насадки, оскільки після її установки вона не вимагає наявності оператора–рятувальника й працює автоматично в незмінному режимі.

Разом з тим, така завіса або ланцюг завіс далеко не завжди буває зручною в експлуатації й обґрунтованою з позиції ефективності її використання (рис. 1.14). Так, у варіанті 2 існують «укріплені» зони А, які відсутні у варіанті 1, при цьому незахищені зони Б мінімальні. Однак варіант 2 вимагає 1,5-кратної витрати рідини у порівнянні з варіантом 1. Відзначимо, що в реальних умовах зона А спотворюється внаслідок накладення зустрічних потоків сусідніх водяних віял.

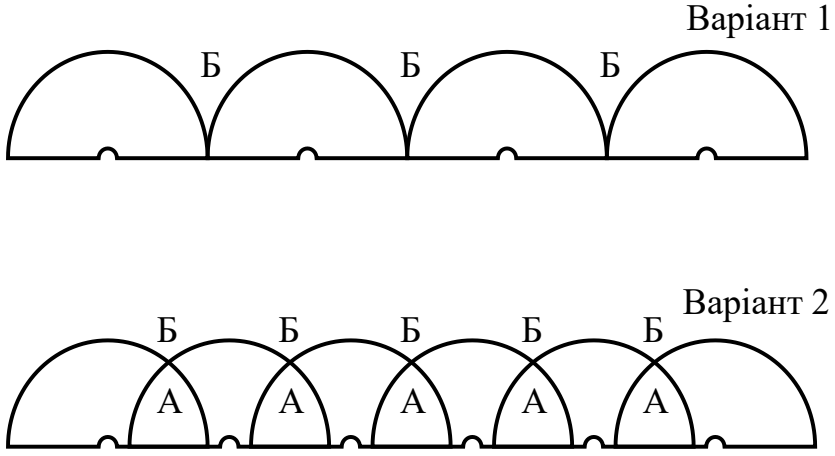


Рис. 1.14 – Варіанти побудови ланцюгів завіс

Для окремих задач було б доцільно одержати можливість керування формою зони, що захищається (рис. 1.15). Існуючими насадками можна забезпечити так звані верхову, рівномірну або просту зони захисту (на рис. 1.15 відповідно верхній, середній і нижній ряди).

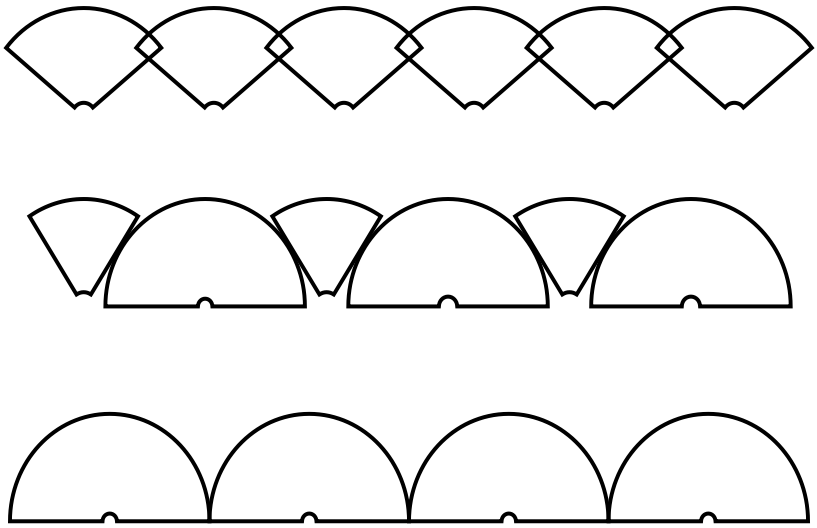


Рис. 1.15 – Способи формування різних профілів завіс

Профілі одержуваних завіс (рис. 1.15) можуть бути різноманітними й обмеження існують лише в частині кількості використовуваного обладнання, його технічних характеристик і витрат рідин. У перспективі можуть виникнути задачі створення нерадіальних профілів за допомогою використання не комбінації різних насадок, а однієї насадки. Теоретично зазначене є можливим, якщо насадка буде мати відповідну форму струминоформувального каналу.

Іншим важливим прикладом застосування плоских струменів є струминна течія, яка за певних умов переходить у плівкову течію, наприклад, по вертикальних охолоджуваних поверхнях. Вона є високоефективним засобом теплообмінних процесів, може використовуватися для забезпечення пожежної безпеки окремих технічних засобів або технологічних процесів. Для пожежно-рятувальних підрозділів (частин) ОРС ЦЗ України такі плівкові течії можуть бути особливо ефективними, коли необхідно здійснювати рівномірне охолодження великих площ вертикальних поверхонь зовнішніх стінок ємностей з горючими речовинами. Йдеться перед усім про резервуари для нафтопродуктів, які бувають горизонтального і вертикального розташування, а також підземного або надземного розміщення.

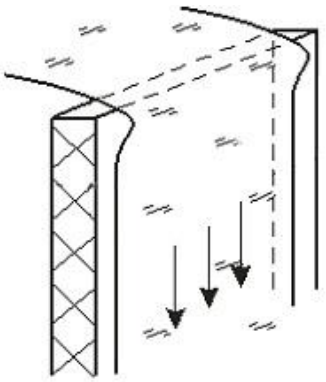


Рис. 1.16 – Плівкова течія на вертикальних охолоджуваних поверхнях

Найпоширеніше технічне рішення для накопичення великої кількості продуктів нафтової промисловості та інших рідин – сталеві вертикальні резервуари. Вертикальні сталеві резервуари являють собою споруди циліндричної форми. Конструктивно вони складаються з днища і даху (сферичного, конічного або плаваючого), а корпус резервуара виконується у вигляді поясів, товщина яких збільшується ближче до днища. Гладка поверхня резервуарів з великим радіусом дозволяє здійснювати охолодження зовнішніх стінок шляхом генерування водяних охолоджувальних плівок, що стікають по поверхні резервуара. Слід вказати, що їх використання можливе лише за умови дотримання протипожежних норм для складів нафти та нафтопродуктів, сумісно із застосуванням піногенераторів.

Важливим параметром, що визначає перебіг пожежі в резервуарі, є його тепловий режим, який значною мірою залежить від фізико-хімічних властивостей рідини, що зберігається всередині. Частково на нього впливає цілеспрямоване охолодження стінок резервуара шляхом подачі водяних струменів або створення водяної охолоджувальної плівки.

Дослідження щодо формування радіальних водяних потоків із застосуванням щілинних насадок проводив Ю. Ю. Дендаренко [100]. Застосування водяних струменів-екранів, здатних поглинати і блокувати теплову енергію полум’я, може значно підвищити захист сусідніх вертикальних сталевих резервуарів для зберігання нафти та нафтопродуктів від впливу теплового випромінювання. При цьому розроблена насадка

забезпечує довжину струменя не менше 30 м, що є критично важливим, враховуючи стандартну відстань між резервуарами 12,6 м та їх висоту.

Розроблена під керівництвом Дендаренка Ю. Ю. насадка дозволяє отримати струмені–екрани, окрім цього можливим є створення її модифікації для генерування плівкових охолоджуючих течій з витратою більше 3 л/с. Як показали експерименти, насадка може бути удосконалена у випадку коригування геометрії вихідного отвору для забезпечення більш рівномірного профілю водяної завіси.

1.5. Імпульсні та пульсуючі потоки в гідродинамічних струменях

У більшості випадків для потреб ОРС ЦЗ України застосовуються «класичні» незатоплені водяні струмені, що формуються стволами або насадками із круглим поперечним перерізом внутрішнього струминоформувального каналу. При цьому зазвичай струмені у зоні їх гідродинамічної початкової ділянки є суцільними. Разом із тим, як буде показано далі, для пожежно-рятувальних підрозділів ОРС ЦЗ України іноді виникає потреба у застосуванні імпульсних чи пульсуючих струменів. Основними їх перевагами можна назвати зменшену витрату рідини струменя, покращення рівномірності розпилення струменя у зоні його повного розпаду, можливість використання «під напругою».

Поштовхом до використання імпульсних та пульсуючих струменів у пожежогасінні стало їх швидке промислове поширення для потреб технологічних операцій різання, чистки поверхонь, змішування тощо. Й, хоча зазначені технології перед усім передбачали використання установок високого й надвисокого тиску, проте вони почали застосовуватися й для систем середнього й низького тиску, що властиві для протипожежної техніки та гідравлічного пожежного обладнання.

Складність застосування чисельних методів до нестаціонарних пульсуючих потоків полягає у проблемі опису турбулентності потоку, а саме у виборі адекватної моделі з використанням рівнянь Нав'є-Стокса, усереднених за Рейнольдсом, або ж врахуванню всіх масштабів турбулентності у методах прямого чисельного моделювання.

Для практичного застосування найчастіше використовують циліндричні стволи з круглим перерізом. Перші дослідження поведінки потоків у таких трубах відносяться до 1879 року [101]. Пульсуючий ламінарний рух аналізують із використанням функцій Бесселя [102, 103], які знайшли широке застосування в різних галузях, а також із залученням спеціальних функцій [104, 105], математичних методів фізики [106–108] і практичних прикладів [109–111].

Розробка дійсно нових і ефективних технічних рішень малоймовірна при використанні застарілих технологій і підходів. Сучасні тенденції в створенні пожежно-технічного обладнання все більше орієнтовані на імпульсні технології. Такі підходи застосовуються у різних типах протипожежної техніки, але особливе значення вони мають для водяного пожежогасіння – найбільш поширеного та універсального способу боротьби з вогнем, де використання пульсаційних процесів дозволяє підвищити ефективність роботи обладнання. Детальне вивчення пульсуючих та імпульсних потоків надає можливість об’єднання в єдину систему генератора пульсацій рідини і пристроїв формування струменів із заданими параметрами.

Дослідженню гідродинамічної кумуляції пульсуючих та імпульсних струменів [22] присвячено праці [112-113], водометам й гідропушкам [114, 115] взаємодії струменів із перешкодами [116], опис струминних течій та течій з кавернами, що можна застосувати для систем генерування струминних потоків надано [117, 118], дослідженню високонапіних імпульсних струменів присвячено [119]. Створеня систем генерування імпульсних та пульсуючих водяних струменів, які можна використати й для потреб пожежогасіння,

набуло широкого поширення у гірничій справі. Важливо, що основні принципи створення сучасної протипожежної техніки вищезазначеного спрямування може бути базоване на відомих принципах розрахунку [120] та створення водометів [121, 122] з використанням чисельних методів розрахунку параметрів відповідного обладнання [123, 124]. В основному це дослідження, пов’язані з розробкою і створенням засобів для руйнування гірських порід (наприклад, гідрогармата), тобто ті, в яких розглядаються струмені високого тиску. Оскільки основний акцент при створенні гідрогармат спрямований на забезпечення максимальної живої сили струменя, можна стверджувати про деяку подібність із вогнегасними струменями, а максимальна кінетична енергія струменя буде забезпечувати або його дальність, або сприяти розпорошенню. Подібного роду дослідження можуть бути покладені в основу розробки методів створення і розрахунку вогнегасних нестаціонарних струменів. В даному плані викликають інтерес роботи Б. В. Войцеховского [125, 126], Г. А. Атанова [141] та інших. Актуальними в даному плані є також дослідження присвячені вивченню розпаду нестаціонарних струменів під впливом деяких чинників [127]. Такі впливи можуть чинити різного роду генератори імпульсів, які накладують нестаціонарні пульсації на стаціонарний потік. Розпад струменя в такому випадку може бути описаний, як показано [84], з використанням уявлень про хвильовий рух на поверхні рідини, який і призводить до розпаду рідинної маси вогнегасного струменя.

Генерування імпульсних та пульсуючих потоків. Аналіз нестаціонарних гідродинамічних процесів у стволах дає змогу оцінити ефективність нових технічних рішень у різних сферах, включаючи енергетику, хімію, авіацію, суднобудування, гірничу справу та пожежогасіння. У більшості випадків такі розрахунки мають важливе значення для забезпечення безпеки обладнання в аварійних ситуаціях та оптимального вибору режимів його роботи. Для аварійно-рятувальної техніки ці обчислення часто стосуються навіть

стандартних умов експлуатації. Зокрема, використання пульсуючих або імпульсних струменів у протипожежному обладнанні та рятувальній техніці може суттєво підвищувати як ефективність, так і безпеку їх застосування.

Очевидно, що інженерні гідродинамічні розрахунки можуть бути виконані за умови фундаментального вивчення нестаціонарних процесів. Лише органічне поєднання фундаментальних і прикладних досліджень є найбільш ефективним шляхом отримання гарних практичних результатів. Наприклад, експериментальні дослідження, описані у [128-130] показують суттєві відмінності коефіцієнтів гідродинамічного опору в нестаціонарних умовах (3…4 кратні) від даних квазістаціонарного розрахунку, проведеному за миттєвими параметрами із використанням стаціонарних залежностей [131].

Пульсуючі струмені незалежно від способу їх отримання характеризуються швидкістю, що періодично змінюється на виході зі ствола, тобто мають певну частоту пульсацій швидкості витікання струменя зі ствола. Відповідно до бажаних параметрів струменів, що отримуються за допомогою пожежних стволів та насадок, у них можуть застосовуватись різні способи генерування пульсацій. Так, пульсатори, що застосовуються для утворення імпульсних чи пульсуючих струменів у пожежогасінні, мають різні способи отримання пульсацій, що забезпечуються їх різними конструкціями та принципами функціонування. Формування пульсацій у таких випадках здійснюється за рахунок використання різних законів [22]. Наприклад, пульсації витрат (або тиску), як функція часу можуть бути описані у вигляді ряду Фур'є, а саме

$$1)\ f(t) = \frac{Q_0}{2} + \sum_{n=1}^{k}(a_n \cdot \cos nS + b_n \cdot \sin nS)\ , \tag{1.28}$$

де

$$a_n = Q_{max}\frac{S}{2}\left(\frac{\sin \pi t}{\pi t}\right)^2 \left(\frac{nS_1}{2S}\right), \tag{1.29}$$

а величини S, Q та t продемонстровані на рис. 1.17.

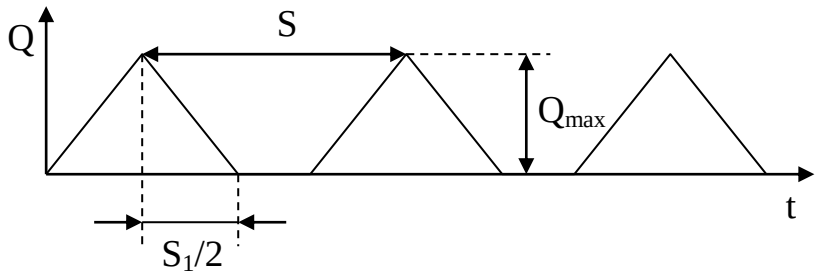


Рис. 1.17 – Пульсації витрат, як функція часу (залежність 1.28, [22]).

$$2)\ f(t)=\frac{4}{\pi}\frac{Q_0}{2x}\left(\sin t-\frac{1}{3^2}\sin 3\varphi\sin t\right)+\frac{1}{5^2}\sin 5\varphi\sin 5t+ \\ +\frac{1}{7^2}\sin 7\varphi\sin 7t+\cdots, \tag{1.30}$$

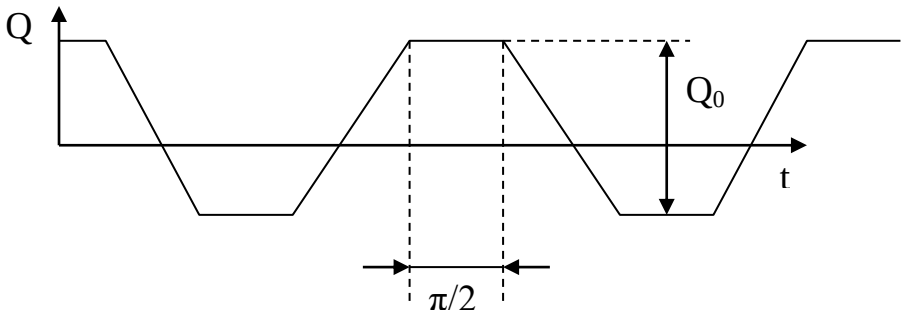


Рис. 1.18 – Пульсації витрат як функція часу (залежність 1.11, [22]).

Варіантів описання пульсації витрат (або тиску) як функції часу може бути чимала кількість, але на даному етапі деталізації обмежимось вище запропонованими.

Як відомо [132-134], застосування пульсуючих струменів при пожежогасінні може бути більш ефективним у порівнянні зі стаціонарними потоками (струменями). Так у галузі виробництва та експлуатації важких мобільних комплексів пожежогасіння на газових і нафтових родовищах, атомних і теплових електростанціях, складах з боєприпасами проведений новий науковий напрямок стосовно методів й техніки імпульсного, газодисперсного багатопланового захисту [135]. У рамках цього напрямку проведені дослідження з вибухового метання й спрямованого розпилення порошків, механізмів створення, поширення й захисного впливу імпульсних газодисперсних потоків. Описується ряд успішно проведених випробувань, які показали високу ефективність застосування установок імпульсної техніки.

Подібні дослідження проводилися й раніше, але не знайшли широкого застосування через недосконалу технічну базу, що існувала у той час. На жаль, майже усі дослідження були обмежені використанням суто порошкових вогнегасних сполук.

Окрім засобів, що доставляють значну кількість вогнегасних речовин до вогнища пожежі на велику відстань, існують такі, що дозволяють отримати ефективні розпилені види вогнегасних речовин при гасінні невеликих пожеж й подавати їх на невелику відстань. Імпульсні водяні вогнегасники типу IFEX-3000, що використовують у якості вогнегасного заряду воду або водяний розчин піноутворювача, ефективні виключно при гасінні невеликих площ пожеж, застосовуються на невеликих відстанях до вогнища пожежі. Так, для вищезазначеної моделі водяного вогнегасника вогнегасна речовина розпорошується на відстань $Z_{\text{заг}} = 3 \dots 5$ м при тиску $P = 3{,}43$ МПа за час спрацьовування робочого клапана $t = 20$ мс, розмір крапель $d_{\text{кр}} = 2 \dots 200$ мкм, а сумарна площа поверхні крапель одного пострілу сягає $S^1_{\text{пов}} = 60$ м^2. Вода, як вогнегасний засіб, фактично перетворюється на туман, що осаджуючись в осередок (вогнище) пожежі, випаровується й відбирає одну з трьох складових трикутника горіння, – тепло. Можна стверджувати про актуальність розробки, створення й випробування сучасної протипожежної техніки, що використовує імпульсні струмені високої енергії, з огляду на ефективність подібних засобів.

Зазвичай переважна кількість застосовуваної води не бере безпосередньої участі у відборі тепла від зони горіння. Деякі дослідники у випадку застосування водяного туману свідчать, що краплі менше 0,03 мм є оптимальними [136]. Зменшення розміру краплини збільшує співвідношення площі поверхні краплини до її ваги, а отже, дозволяє поглинати більшу кількість енергії, що виділяється в процесі горіння (рис. 1.19).

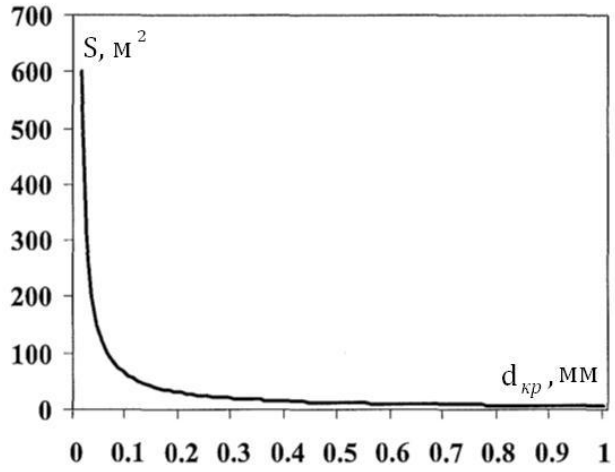


Рис. 1.19 – Залежність площі поверхні сферичної краплини до її діаметра

Вода також використовується для інших аспектів протипожежних операцій, таких як захист від опромінення, захист персоналу пожежної команди та гасіння тліючого матеріалу. Дослідження показали, що менші краплі води краще послаблюють випромінювання, пов'язане з полум'ям. К. Гізлссон і М. Розандр зазначають, що для захисту від радіаційного впливу (теплова радіація) достатньо від 1 до 10 л/м^2 /хв, залежно від рівня випромінювання [137]. Вода є дуже ефективним засобом пожежогасіння через причини її не токсичності, здатності до розпилення й відносною дешевизною. Однак передусім, завдяки своєму унікальному хімічному складу, важливо, що вона має високу приховану теплоту випаровування [151].

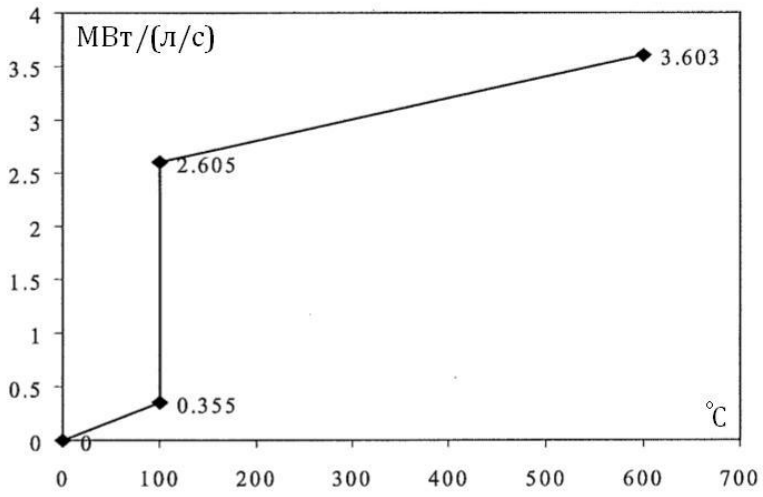


Рис. 1.20 – Теоретична охолоджувальна потужність води

Перепад у залежності на рис. 1.20 пов'язаний з «полярним» характером молекули води. Це означає, що молекула володіє деякою силою внутрішнього притягання, дана сила пов'язує молекули води і пояснює явище її поверхневого натягу, а також призводить до електропровідності води. Поверхневий натяг води сприяє тому, що поверхні горючих матеріалів не так легко змочуються. Відомо, що покращення змочування можна забезпечити додаванням до води деяких добавок, про які йтиметься у наступних розділах.

Випробування, проведені в пожежно-рятувальних підрозділах ДСНС України (раніше МНС України) у Дніпропетровській області, показали, що одним із найбільш перспективних способів отримання далекобійного водяного струменя з діаметром крапель 100–400 мкм є застосування гідравлічного удару або гідравлічних пульсацій [138, 139]. Тестування ствола на основі гідроімпульсних систем [140] продемонструвало його високі технічні характеристики та підтвердило ефективність закладеного принципу роботи. Автори відзначають, що у деяких випадках витрата води при гасінні модельного вогнища пожежі була в 35 разів меншою, ніж раніше рекомендована [138].

Ці дані підкреслюють актуальність розробки засобів для створення таких струменів та необхідність випробування різноманітних видів протипожежного обладнання. В останні роки широке поширення отримали пристрої, робота яких базується на імпульсних генераторах або генераторах імпульсних струменів. Популярність цих технологій пояснюється високою ефективністю гасіння та економією робочих речовин – води, порошку чи піноутворювача. Крім того, у деяких випадках застосування інших типів обладнання є небезпечним для рятувальників.

Варто зазначити, що імпульсні генератори застосовуються не лише у пожежній справі. Першими, хто освоїв їхнє використання у повному обсязі, стали фахівці гірничої промисловості [141, 142]. При цьому основні технічні

рішення, що лежать в основі цих генераторів, залишаються універсальними для різних сфер застосування.

Використання рідинних імпульсних струменів високої швидкості показало свою ефективність для гасіння газових факелів [143]. Експериментальні дослідження гасіння газового факела за допомогою імпульсних струменів рідини високої швидкості (300…600 м/с), що генерувалися пороховим імпульсним водометом, показали, що навколо імпульсного струменя рідини високої швидкості в повітрі утворювалося високошвидкісна хмара бризок великого поперечного перерізу, яка ефективно збивала полум'я газового факела на відстанях 5…20 м від установки.

Особливу увагу при використанні імпульсних струменів у пожежно-рятувальних операціях слід приділяти тому, як струмінь взаємодіє з об’єктом або середовищем гасіння. Від ефективності генератора імпульсних струменів значною мірою залежить результативність усієї системи імпульсного пожежогасіння, оскільки ключовим фактором є спосіб впливу вогнегасної речовини на вогнище пожежі. Як зазначено у літературі [133, 134], існують чотири базові механізми припинення горіння: охолодження осередку та прилеглої зони, ізоляція окиснювача або палива, розведення парогазоповітряного середовища до безпечного рівня та гальмування хімічних реакцій горіння. Практично будь-яка вогнегасна речовина поєднує ці механізми, проте кожна має головну властивість, що переважає у конкретних умовах. Так, для води ключовим ефектом є охолодження зони горіння. Використання розпилених струменів дозволяє значно підвищити ефективність порівняно з цілісними струменями, оскільки збільшується площа взаємодії та інтенсивніше відбувається випаровування крапель. Подача пульсуючих струменів під високим тиском забезпечує формування тонкодисперсної структури вогнегасної речовини, що сприяє більш ефективному гасінню.

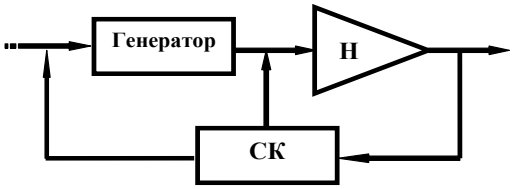


Рис 1.21 – Принципова схема застосування генератора пульсацій

Для створення імпульсних струменів з потрібними параметрами, які б оптимальним чином забезпечували виконання поставлених завдань гасіння, потрібно створити систему (рис. 1.21), яка складалася б із трьох основних частин: генератора, насадки (ствола/насадки) Н й системи керування СК.

Особливий інтерес в системі генерування імпульсних струменів викликають генератори, які є найважливішою (базовою) її частиною. Використання насадок дозволяє одержати різні параметри струменів на виході, а обладнання керування замикає логічний ланцюг традиційного підходу до побудови керованих систем.

Деякі варіанти конструкцій стволів, що можуть бути використані для розпилення вогнегасних рідин. Існують різні розпилювачі для створення водяного туману, зокрема ті, що використовують сопло Лаваля. Це сопло має канал, який звужується до горловини і потім розширюється до вихідного отвору. Таку форму можна надати або шляхом спеціальної обробки внутрішньої поверхні, або встановивши всередині вставку, що створює послідовне звуження і розширення [145].

Основним обмеженням цього типу ствола є невелика дальність струменя та недостатня дисперсність рідини. Щоб отримати дрібні краплі, доводиться використовувати маленькі отвори, а для збільшення швидкості витікання рідини необхідно підвищувати кінетичну енергію потоку, що в даній конструкції практично неможливо.

Ще одним розповсюдженим варіантом є стволи з двопотоковим корпусом, у яких рідина контактує з потоком газу високої кінетичної енергії.

Поданий під тиском газ забезпечує пневматичне розпилення рідини або тонкої плівки на виході [146]. Однак використання таких стволів потребує додаткового обладнання для подачі газу, що лише частково підвищує дальність струменя (до 8–10 м) і не забезпечує утворення дрібнодисперсного потоку з малими краплями.

Інший підхід передбачає застосування пристрою для формування газокрапельного струменя з високою кінетичною енергією. Такий пристрій складається з випускного сопла, каналу для подачі стиснутого газу, газодинамічного сопла для розгону газу до надзвукових швидкостей, каналу подачі рідини, клапана для синхронного регулювання газового та рідинного потоків, змішувальної камери та випромінювача Гартмана для ультразвукового впливу [147]. Основними недоліками цієї конструкції є її складність і значна енергомісткість через необхідність використання стисненого газу.

Огляд сучасних розробок імпульсних генераторів дозволяє зробити кілька важливих висновків. По-перше, серед сотень запатентованих рішень лише невелика частина знайшла практичне застосування, що свідчить про фрагментарний характер вирішення проблеми створення ефективних водяних вогнегасних струменів. Це підкреслює потребу в комплексному та системному підході при розробці нових засобів пожежогасіння. По-друге, більшість існуючих технічних рішень покращують лише окремі параметри генераторів, не забезпечуючи комплексного й науково обґрунтованого підходу до підвищення ефективності системи.

1.6. Характеристика процесу розпаду струменя, дроблення крапель та моделі розпилення рідинних струменів

Явище розтікання й розпаду крапель в газовому потоці досліджувалося вченими Y. O. Hinze [148] , G. D. Gordon [149], K. N. Dodd [150], G. A. Simons

[151], M. K. Li, H. S. Fogler [152], M. Rein [153], R. Ni [154], О. А. Гобизов, М. Н. Рябов, А. В. Більський [155] та ін.

Так, Y.O. Hinze [148] був одним з перших, хто запропонував прийняти за критерій стабільності крапель число Вебера We. Він показав також, що типи деформації крапель, що дробляться, залежать від характеру їх плину (рівномірний, прискорений, обертальний).

Слід підкреслити, що аналіз дроблення капель був виконаний Y.O. Hinze з позиції гідродинамічної теорії, розвитий G.I. Taylor і А.Н. Колмогоровим.

При першому типі дроблення (вібраційному) вихідна крапля розділяється на дві або дещо більше дрібних, приблизно однакових крапель. Цей вид дроблення має місце при раптовому впливові газового потоку й при малих значеннях числа Вебера ($We \approx 10$).

Другий тип дроблення (типу «парашут») відбувається при числах $We \approx 20$. Спочатку крапля стискується й приймає лінзоподібну форму. Поступово середня частина видувається по потоці, а потім відбувається її розпад на безліч дрібних крапель. Дроблення типу «парашут з цівкою» відбувається при числах ($We \approx 70$). У цьому випадку основна маса краплі зосереджується на периферії «парашута» у формі рідинної пари. Спочатку розлітається «парашут», потім дробиться рідинна пара, після чого цівка розпадається на краплі.

У випадку зривного типу, дроблення краплі відбувається в результаті безперервного зривання поверхневого шару краплі. Після досягнення деякого критичного розміру краплі спостерігається її розпад на дрібні частки. Характерне значення числа Вебера для цього типу дроблення – $We \approx 1000$.

При великих числах Вебера ($We \approx 50000$) відбувається вибуховий тип дроблення краплі. Якщо має місце сильний і раптовий вплив потоку на краплю, крапля майже відразу розпадається на безліч дрібних крапель.

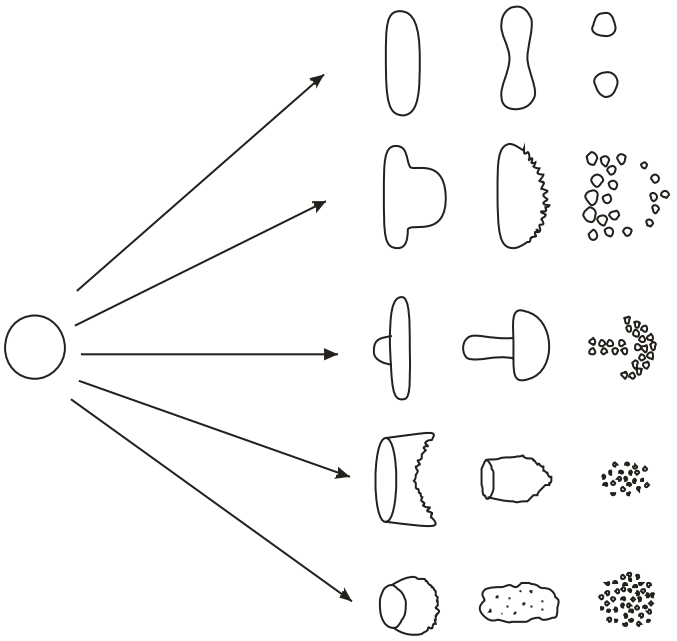


Рис. 1.22 – Основні типи дроблення краплі в потоці газу:
1 – вібраційне дроблення;
2 – дроблення типу «парашут»;
3 – дроблення типу «парашут з цівкою»;
4 – дроблення зривного типу;
5 – вибуховий тип розпаду.

Експериментальні дослідження відносяться до випадку, коли потік повітря раптово впливає на потік крапель. Відзначимо, що енергія, потрібна для відриву крапель, може бути визначена згідно із пропозиціями В. Г. Лєвіча [84] Провівши аналіз струменів рідин у повітряному середовищі, пропонується в пожежогасінні при дослідженні струменів використовувати модель В. Г. Лєвіча, що у свою чергу дасть можливість більш якісно проектувати стволи й насадки, а також визначати умови дроблення струменів.

Розпад вогнегасної рідини значною мірою визначається умовами її витікання зі струминоформувального пристрою [156]. При невисокій відносній швидкості рідини та оточуючого повітря після виходу з пожежного ствола формується суцільний струмінь або тонка плівка. Зі зростанням швидкості рідина починає фрагментуватися на окремі краплі, і довжина неперервної частини струменя поступово скорочується. У разі подальшого

збільшення швидкості дроблення відбувається практично відразу біля вихідного отвору, що відповідає режиму активного розпилювання.

Для кількісного опису факела розпилу використовують дисперсні показники. Факел являє собою сукупність частинок різного розміру [156], і його характеристики визначаються кривими розподілу числа, площі або маси крапель за діаметрами, середнім діаметром, питомою поверхнею та інколи показником гомогенності, що відображає рівномірність розпилення.

Процес дроблення не зупиняється після відриву краплі від струменя і залежить від багатьох факторів. При зниженні швидкості рідини утворюється ефект «сумки»: навітряна частина краплі продавлюється всередину, формуючи опуклу рідинну плівку, яка згодом руйнується на численні дрібні краплі, тоді як основна маса первинної краплі (тор), що складає близько 70 % її об’єму, розпадається на відносно великі фрагменти (рис. 1.23, а).

Якщо швидкість газу значно перевищує критичну, розпилення відбувається за рахунок зриву поверхневого шару краплі, що набуває плоскої дископодібної форми. При досягненні критичної деформації диск руйнується на менші частини (рис. 1.23, б). У разі впливу потужних імпульсів тиску або швидкості на двофазне середовище може відбутися так званий вибуховий розпад, коли дроблення відбувається майже одночасно по всьому об’єму краплі, і окремі зриви поверхні стають практично непомітними (рис. 1.23, в).

У сучасних дослідженнях приділяється значна увага вивченню процесів дроблення крапель у різних умовах. Звертає на себе увагу великий розкид критичних значень числа Вебера $We_{\text{кр}}$, який за різними джерелами коливається від приблизно 1–1,5 до 80–100 [157]. Така різниця пояснюється кількома чинниками: відсутністю врахування в’язкості рідини, різним рівнем турбулентності у потоках під час експериментів, а також тим, що розрахунки часто базуються на локальних значеннях числа Вебера$We_{\text{кр}}$ в момент руйнування краплі, що при зменшуваних швидкостях потоку дає завищені або

занижені результати. Крім того, різні умови проведення дослідів суттєво впливають на отримані критичні значення.

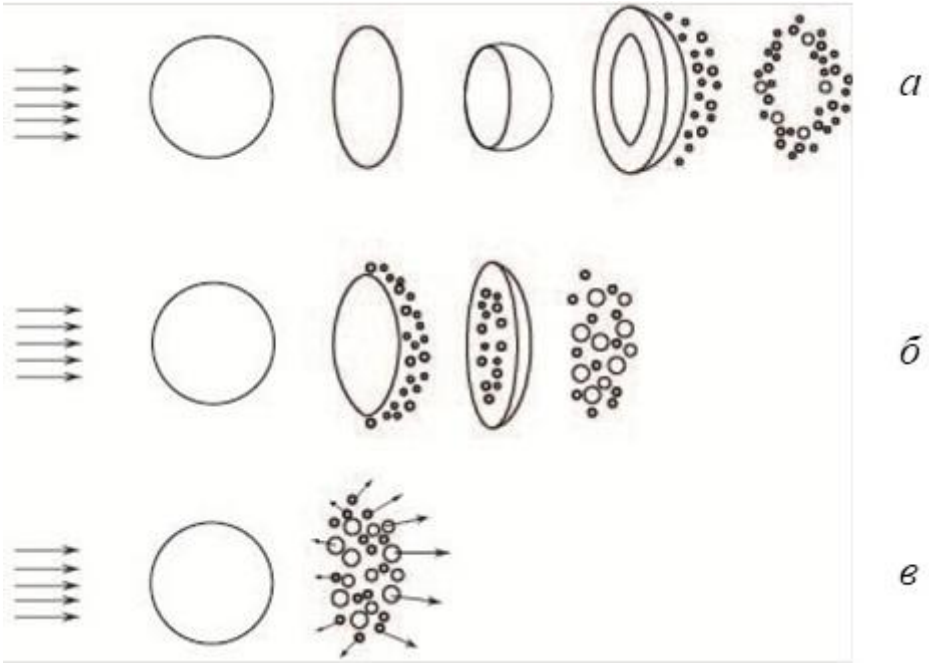


Рис. 1.23 – Стадії дроблення краплі при різних відносних швидкостях системи рідина–газ [156]

Струмінь, що формує пожежний ствол або насадка, на початковому етапі зберігає цілісність і не піддається розпаду. Параметри цієї початкової ділянки потоку можна використовувати як його характеристику [158, 159]. В експериментальних дослідженнях встановлюють залежність між довжиною суцільного струменя і максимальною дальністю його формування для різних типів вихідних потоків. З часом, під впливом зовнішніх збурень, струмінь поступово починає руйнуватися, і відбувається формування дисперсного потоку.

Питання просторової нестійкості струменя (на відстані від сопла) розглянуті в роботах [160-162]. Одним з найпростіших є випадок прояву нестійкості в капілярних струменях. Капілярна нестійкість вільного рідинного струменя подана на рис. 1.24, 1.25 [163] .

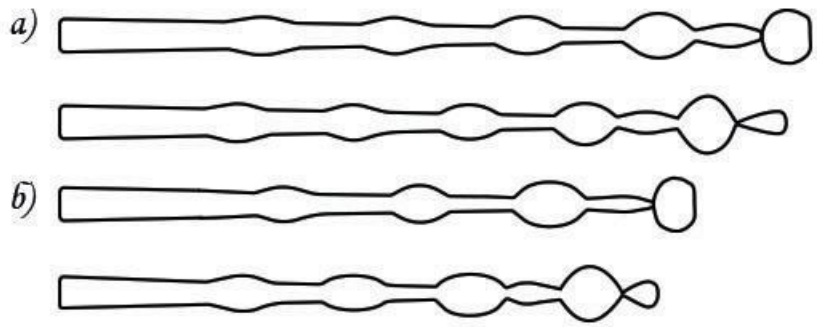


Рис. 1.24 – Вплив числа Вебера на струминний профіль (a) $We = 100$, (b) $We = 50$ [163]

Детальний опис зазначеного процесу надано в роботі Ashgriz, який поєднав й проаналізував останні наукові дані багатьох авторів, що працюють у відповідному науковому напрямку [164, 165]. А. Л. Ярін представив картину рівномірного розпаду струменя [166], проаналізував і узагальнив результати експериментів, узяті з роботи [167].

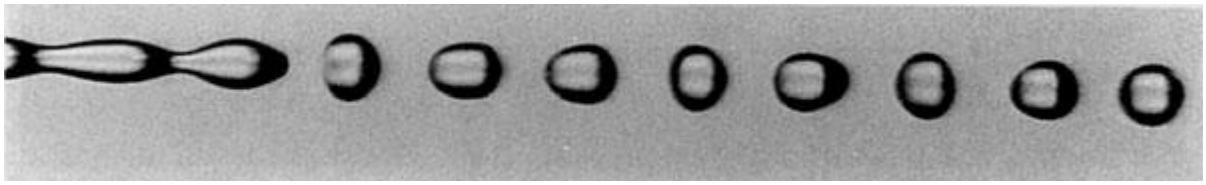


Рис. 1.25 – Рівномірний розпад струменя води діаметром 0,27 мм і швидкістю 2,9 м/с при відношенні довжини хвилі до діаметра 4,6

Розрахункова схема стійкості струменя в такому випадку може бути проведена з використанням картини, представленої на рис. 1.26.

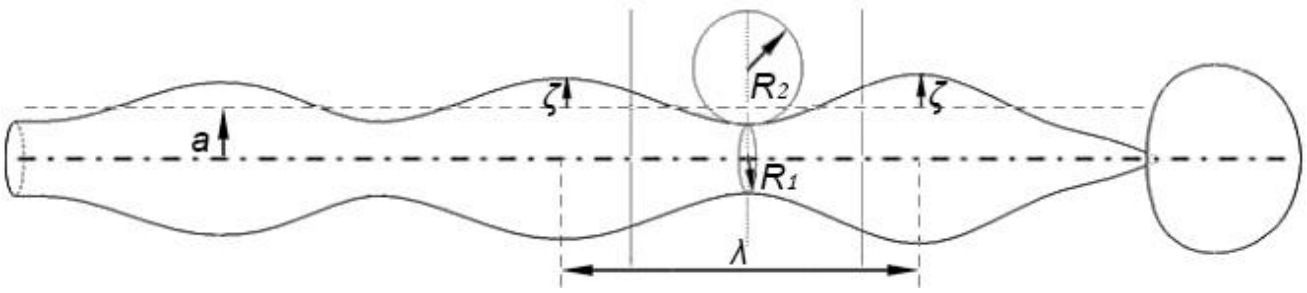


Рис. 1.26 – Схема нестійкого струменя [165], a – характерний радіус, ζ – амплітуда хвилі, λ – довжина хвилі

Процес наростання нестабільності в струмені описаний у роботі Келлера [168], де відзначено, що порушення суцільності насправді зростає в просторі, починаючи із сопла струминоформувального пристрою, і рухається вниз за течією, приводячи до розбивання струменя на краплі, при цьому частина струменя біля сопла залишається незруйнованою (суцільною).

Як правило, виділяють два режими коливань у струмені: симетричні й антисиметричні (асиметричні). У симетричному режимі, який також називають режимом розтягувань або варикозними хвилями, середня площина вважається спокійною й такою, що не зазнає деякий час збурень.

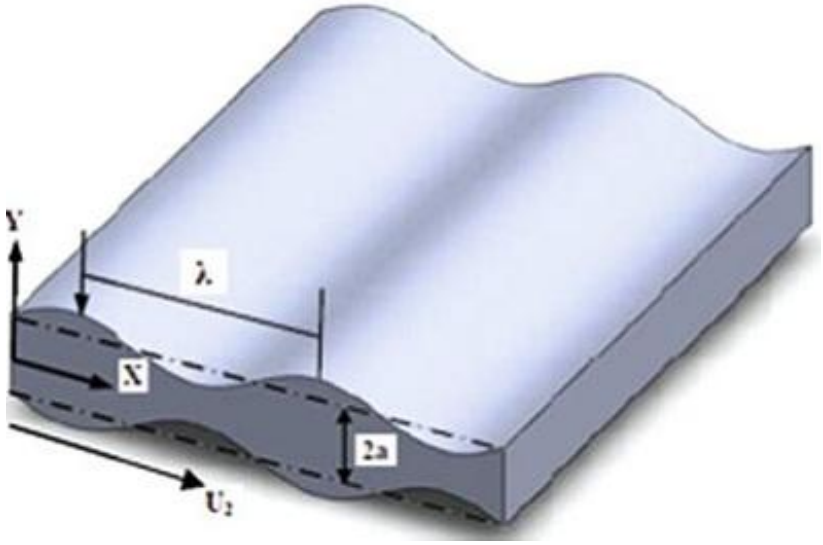


Рис. 1.27 – Схема симетричних збурювань при порушенні цілісності струменя [164].

У випадку пласких течій нестабільність визначається в основному за рахунок аеродинамічної взаємодії між рідиною й навколишнім газом [164]. На відміну від циліндричного рідинного струменя, сили поверхневого натягу, як правило, стабілізують пласку рідинну течію. На рис. 1.27 показана нестабільність в'язкої нестисливої рідини товщиною $2a$, що протікає зі швидкістю u_1 через газове середовище, що рухається зі швидкістю v_2, а відносна швидкість становить u_0. Навколишній газ вважається нев'язким і нестисливим. Рідина й газ мають відповідно щільності (густини) $\rho_{\text{р}}$ і $\rho_{\text{г}}$, а в'язкість рідини $\mu_{\text{р}}$. Гравітаційні ефекти не враховуються. Система координат

показана на рис. 1.27. Вісь X паралельна напрямку відносної швидкості u_0. Вісь Y перпендикулярна осі X та її початок перебуває в середній площині пласкої течії, з рівномірною товщиною $2a$ по довжині плину. З урахуванням малих збурень $\xi = \xi_0 e^{ikx+\omega t}$ картина деформації $y - a + \xi$ пласкої течії може бути представлена у вигляді рис. 1.27.

Моделювання такого плину може бути здійснене у вигляді, запропонованому N. Ashgriz, X. Li, A. Sarchami [164] і представленому на рис. 1.28.

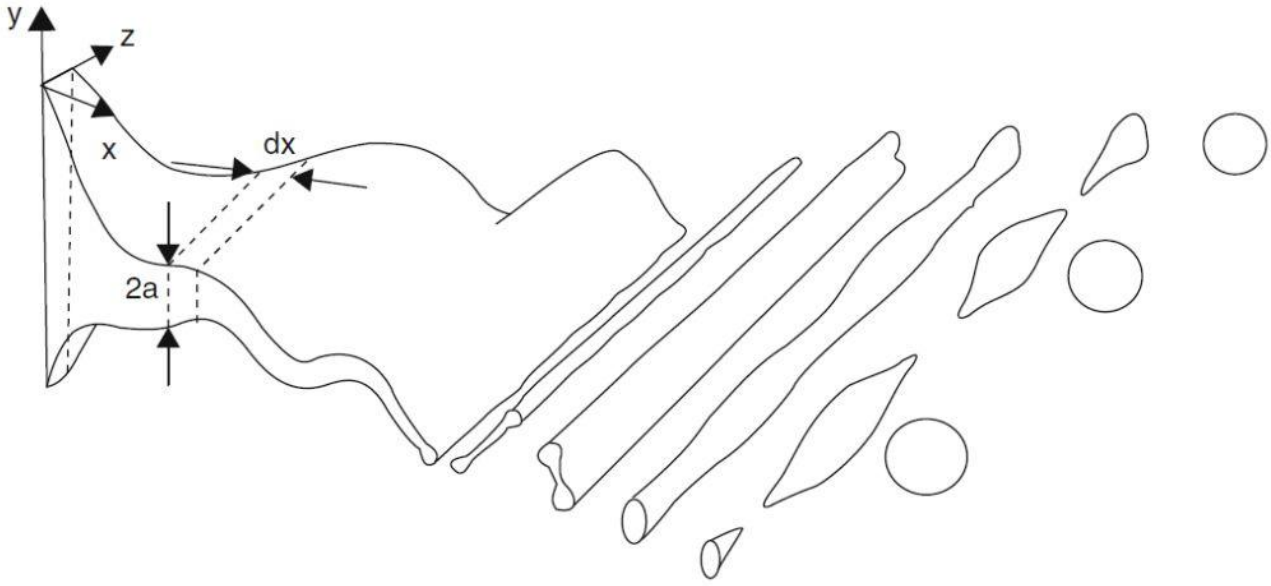


Рис. 1.28 – Схема процесу розпаду у випадку плаского струменя

Для струменів із круглим перерізом процес руйнування має власні особливості. Зі збільшенням відстані від струминоформувального пристрою початкові збурення посилюються, що призводить до відриву перших крапель із основного потоку. Після цього ці краплі можуть піддаватися додатковому дробленню під впливом турбулентності та інших факторів. Візуалізація цього явища наведена на рис. 1.29 [169].

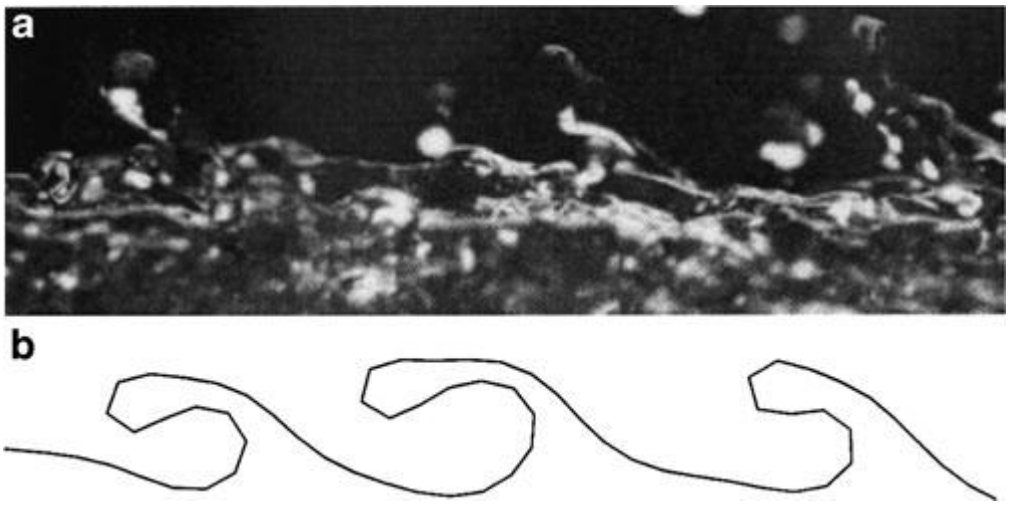


Рис. 1.29 – Картина відриву крапель (а) і її моделювання (б). Потік рідини спрямований зліва направо

Після того, як крапля повністю сформована, вона може потрапити в зону, де аеродинамічні сили досягають значної величини, здатної спричинити її істотну деформацію та подальше руйнування [170]. Процес, коли крапля розпадається на численні дрібні частинки під дією таких сил, називається вторинним розпиленням. Цей напрям упродовж багатьох років активно досліджувалася, і результати детального аналізу представлені в роботах [171–173]. Як показали експериментальні дослідження, характер руйнування крапель може суттєво відрізнятися залежно від умов, проте найпоширенішим є формування крапель, подібне до крапель дощу, а також процеси, схожі на утворення аерозольних частинок. Далі йтиметься про розпад виключно відповідно до величини відносної швидкості. Зауважимо, що вода є типовою ньютонівською рідиною, а картина дроблення для неньютонівських рідин має істотні відмінності.

На рис. 1.30 продемонстровано типовий розпад ньютонівських капель. Час зростає зліва направо і аеродинамічні сили зростають згори донизу. Початкова відносна швидкість становить u_0 і діє в зазначеному напрямку.

Процес руйнування краплі визначається взаємодією двох основних сил: аеродинамічних сил, що сприяють розпаду, та сил поверхневого натягу, які протидіють деформації. Відносна величина цих сил описується безрозмірним

числом Вебера $We = \frac{\rho {u_0}^2 d_0}{\sigma}$, яке дозволяє оцінити схильність краплі до руйнування .



Рис. 1.30 – Типовий розпад ньютонівських крапель [169]

Зі збільшенням числа Вебера We зростає й ймовірність руйнування краплі, оскільки домінують аеродинамічні сили, що сприяють її розпаду. З іншого боку, підвищена в’язкість рідини обмежує деформацію краплі та сприяє дисипації енергії, що передається аеродинамічними впливами, зменшуючи тим самим ймовірність фрагментації. Цей ефект враховується за допомогою числа Ohnesorge Oh, яке відображає співвідношення в’язкості рідини до сил поверхневого натягу

$$Oh = \frac{\mu_к}{\sqrt{\rho_к d_0 \sigma}},$$

де $\rho_к$ – густина краплі, $\mu_к$ – її в'язкість. В'язкість виявляється суттєвою при Oh > 0,1. Більшість експериментаторів схильні вважати, що нижче цього значення процес розпаду практично не залежить від Oh [169].

В [172] запропоновано вважати найбільш імовірним наступний поділ на типи розпаду крапель, залежно від числа We (табл. 1.3). Дані представлені з урахуванням того, що вторинне розпилення відбувається в повітрі або іншому газі низької в'язкості.

Таблиця 1.3.

Перетворення We для ньютонівських крапель при $Oh < 0{,}1$

Тип збурень / розпаду	We
Вібраційний (не розпаду)	$\sim 0 < We \sim 11$
Мішковий	$\sim 11 < We \sim 35$
Багаторежимний	$\sim 35 < We \sim 80$
Плівковий	$\sim 80 < We \sim 350$
Катастрофічний (вибуховий)	$We \sim 350$

Експериментатори, як правило, виділяють два моменти при розпаді крапель. Відлік часу починається, коли крапля потрапляє в поле дії руйнуючих сил. Момент, коли деформована крапля нагадує сплюснений сфероїд, визначає час T_{ini}, а загальний час розпаду T_{tot} , визначається в момент, коли краплі й усі її фрагменти перейшли в стабільний стан і подальше руйнування не відбувається. В [174] запропоновано використовувати безрозмірний параметр часу $T = t\frac{U_0}{\sqrt{\varepsilon} d_0}$, де T - безрозмірний час, t - мірний час, $\varepsilon = \rho_к/\rho_г$ відношення густин краплі й газового середовища.

Ще раз зазначимо, що лише невелика кількість дослідників розглядали неньютонівські краплі, відповідно такі краплини у даному параграфі не охарактеризовано.

Первинне розпилення рідинних струменів. Якісна характеристика моделей для опису струменів представлена в роботі [164].

У практиці розпилення рідин найчастіше використовують модель, запропоновану Huh та співавт. [175]. Вона враховує вплив надзвичайно малих хвиль на формування збурень на поверхні струменя. Початкові коливання на поверхні виникають через турбулентні пульсації в самому потоці, що зумовлені напруженням зсуву вздовж стінок сопла та можливими проявами кавітації. Такий підхід дозволяє уникнути обмежень традиційної хвильової моделі, у якій експоненційне зростання хвилі зупиняється, якщо амплітуда збурень дорівнює нулю.

Primary Atomization of Liquid Sheets (LISA модель) була розроблена Schmidt і ін. [176, 177] для моделювання первинного розпаду рідинних плівок, що виходять зі струминоформувальних пристроїв високого тиску. Вона заснована на простих принципах механіки рідини з метою усунення складнощів, повязаних з необхідністю мати експериментальні дані.

Taylor Analogy Breakup [178] (TAB і E–TAB моделі) вважаються стандартними моделями, використовуваними для розрахунку утворення спреїв. Модель заснована на аналогії між осциллюючими краплями й весняним капанням.

The Kelvin–Helmholtz (KH) breakup model (KH–RT моделі Кельвіна-Гельмгольца) – модель розпаду, розроблена Reitz і Diwakar [179], що одержала подальше вдосконалення Reitz [180], заснована на аналізі лінеаризованої нестійкості стаціонарного круглого струменя рідини, що занурюється в спочиваючий нестисливий газ.

Droplet Deformation Breakup [181] (DDB модель) ґрунтується на динаміці краплі базуючись на русі центру мас напівкраплі. Передбачається, що краплі рідини деформуються винятково просторовим потоком від початкової сферичної форми в стислий сфероїд з еліпсоїдальним перерізом.

Unified Spray Breakup (USB модель) була розділена на три окремі підпроцеси, а саме первинне розпилення, деформацію краплі через аеродинамічний опір, вторинне розпилення [182]. Первинне розпилення моделюється на основі [174], а вторинне розпилення на основі експериментальних спостережень, серед яких в літературі прийнято виділяти чотири окремі режими розпаду

мішковий $12 < We < 20$;

багаторежимний $20 < We < 80$;

зривний $80 < We < 800$;

катастрофічний $We > 800$.

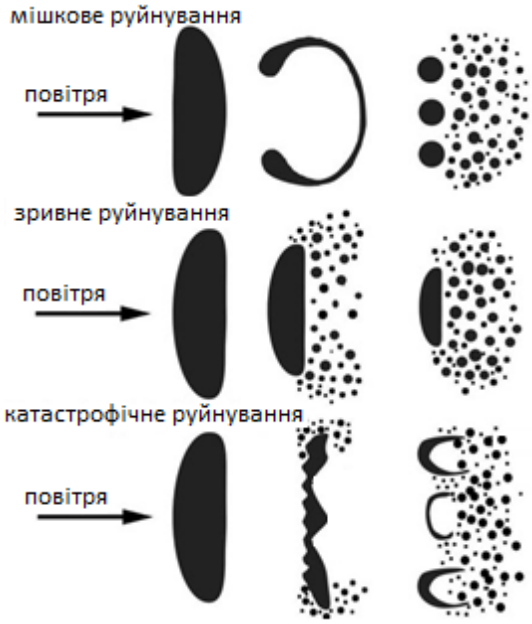


Рис. 1.31 – Механізм розпаду відповідно до зростаючого числа Вебера [164]

The Cascade Atomization and Drop Breakup (CAB) Model є подальшим розвитком моделі ETAB. Основною мотивацією для розвитку ETAB і CAB є моделювання потоків на виході із сопел високого тиску керованих струменів рідини (упорскування).

Й, нарешті, моделювання розпаду струменя на виході із сопла досягається шляхом використання пропозицій В. Г. Лєвіча для опису процесу розпаду струменя, що було викладено у §1.3. Параметри початкової ділянки струменя можуть бути використані в якості його характеристики, важливим результатом досліджень може стати експериментальне встановлення залежності для низки струменів між довжиною початкової ділянки й дальністю генерування струменя. Доцільно використовувати саме модель В. Г. Лєвіча для процесу нерозривності–розпаду струменя.

1.7. Методи фізичного моделювання гідравлічних струменів, що застосовуються для пожежогасіння

Методики з проведенням фізичного експерименту. Зазвичай фізичний експеримент розглядають як спосіб пізнання природи, що полягає у вивченні

природних явищ у спеціально створених умовах. У випадку фізичного експерименту слід виділяти натурні й лабораторні його варіанти. У більшості випадків натурний експеримент можна оцінити як більш точний, реальний. Разом із тим, використання лабораторних експериментів, як таких, що дають можливість сконцентруватися на вивченні основних особливостей досліджуваних засобів чи процесів, суттєво не знижуючи саму якість проведення експерименту, зазвичай також є ефективним.

У випадку вивчення процесів струминоформування у пожежних стволах, насадках та установках водяного пожежогасіння, може йтися про велику кількість напрямків проведення натурних експериментів, оскільки існує багато методів і пристроїв струминоформування, що суттєво різняться між собою. Так, скажімо, для ручного диспергувального ствола РСД-2 та лафетного диспергувального ствола ПЛСД-2 проводилися натурні експерименти з метою виявлення основних закономірностей струминоформування для принципово нової конструкції генерування розпилених потоків рідини на велику відстань. Експерименти проводилися на спеціальних полігонах в УкрНДІ пожежної безпеки України, тренувальних майданчиках гарнізону Управління аварійно-рятувальних робіт у Дніпропетровській області, а також у Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. Досліджувалися процеси втрати суцільності потоку та його дроблення, залежності дальності подачі струменя від параметрів ствола та тиску рідини на вході в нього. В [138, 140] наведені результати випробувань ручного диспергувального пожежного ствола, розробленого на основі застосування енергії гідравлічних пульсацій.

Встановлення гідроударного пристрою на корпусі пожежного ствола за насадкою дозволило генерувати у рідину перед насадкою імпульси тиску, які суттєво перевищували значення тиску рідини на вході в пожежний ствол. Під впливом імпульсів на рідину відбувалося її прискорення і швидкість на виході з насадки значно зростала у порівнянні зі швидкістю при звичайному режимі витікання для «стандартного» пожежного ствола. Підвищення швидкості

витікання рідини без зміни тиску на вході у ствол призводило до збільшення дальності струменя та поліпшення якості розпилу рідини. Конструкція ствола дозволяла плавно змінювати діаметр внутрішнього струминоформувального каналу й регулювати частоту імпульсів тиску, що разом із підвищенням швидкості струменя змінювало дисперсність струменя й забезпечувало проходження отриманих краплин через висхідні потоки факела до пожежного навантаження, підсилюючи ефект пожежогасіння високим значенням теплообміну крапельного потоку.

Однак, не вдалося досягти стабільної залежності параметрів диспергування від тиску на вході поженого ствола. Таким чином, потенційно високі тактико-технічні показники досліджуваних стволів мали суттєвий недолік – не завжди вдавалося підібрати режими для ствола, які б гарантували потрібне в конкретний момент часу значення дисперсності формованого струменя, а налаштування оптимального режиму роботи ствола іноді відбирало багато часу. Фактично, процес переходу пожежного ствола в диспергувальний режим «провисав» із незрозумілих (невиявлених) причин.

Як було показано в попередньому параграфі, однією із задач фізичного моделювання гідравлічних струменів, що застосовуються для локалізації та ліквідації надзвичайних ситуацій, є встановлення закономірностей розпаду струменя на окремі частини, подальшого розпаду на краплини та їх розпорошення. Проведення фізичного експерименту щодо вимірювання розмірів краплин розпиленої рідини досить складна технічна задача. Її розв'язання істотно допомагає зрозуміти весь процес струминоформування в динаміці процесу краплиноформування й, як наслідок, створити ефективну систему керування потоком. Суттєве поліпшення проведення експериментів стосовно вимірювання розмірів краплин розпиленої рідини дозволяє здійснити використання спеціального обладнання, наприклад, Malvern [182]. Методика лазерної дифракції від Malvern допомагає розрахувати розмір крапель і їх розподіл в об’ємі шляхом вимірювання інтенсивності розсіяного світла. При

цьому система може працювати в діапазоні розмірів від 0,1 … 2000 мкм, що повністю охоплює робочий діапазон розмірів краплин розпилених струменів у пожежогасінні. Інтенсивне лазерне джерело світла дозволяє вимірювати в широкому діапазоні концентрацію крапель. Розсіяне світло збирається за допомогою системи лінз Фур'є й фокусується на детектори, які вимірюють інтенсивність розсіяного світла залежно від кута. Сучасні лінзи дозволяють досягати робочого режиму більше одного метра, що сприяє отриманню характеристик великої розпиленої зони. Високі темпи виявлення (для одного виміру 100 мкс) дозволяють відстежити динаміку розпилення в реальному часі.

В експерименті [182] здійснювався контроль над зміною розміру краплин із часом на відстані 0,5 м від сопла, при тиску 3 та 12 бар і значеннях генерованих за допомогою системи Spraytec краплин середнього діаметра 10, 50 та 90 мкм. Для певних пожеж застосування тонкорозпиленої води може бути особливо ефективним, знижуючи споживання води та мінімізуючи знищування або пошкодження вогнем майна. У ситуаціях, що вимагають ізоляції палива, використання піни є особливо прийнятним рішенням. У експерименті досліджена система, що поєднує переваги водяних туманів та переваг паливної ізоляції. Вдалося більш глибоко зрозуміти механізми, що лежать в основі поведінки розпилення, та визначити вплив ПАР на ефективність водяних туманів. Для подальших досліджень цікавими є результати лабораторних експериментів з розпилення струменя рідини з поверхнево-активними речовинами (рис. 1.32) [182].

Фактично, незважаючи на те, що водяні тумани у деяких випадках є високоефективними, зменшення відведеного тепла, коли пожежа зменшується в розмірах, може призвести до недостатнього витіснення кисню, що запобігає повному гасінню пожежі. На рис. 1.33 [182] показані дані контролю температури досліджуваної поверхні. Температуру в приміщенні

контролювали й спостерігали три стадії, що видно на графіку: наростання при горінні, стрімке охолодження та придушення після розпилення.

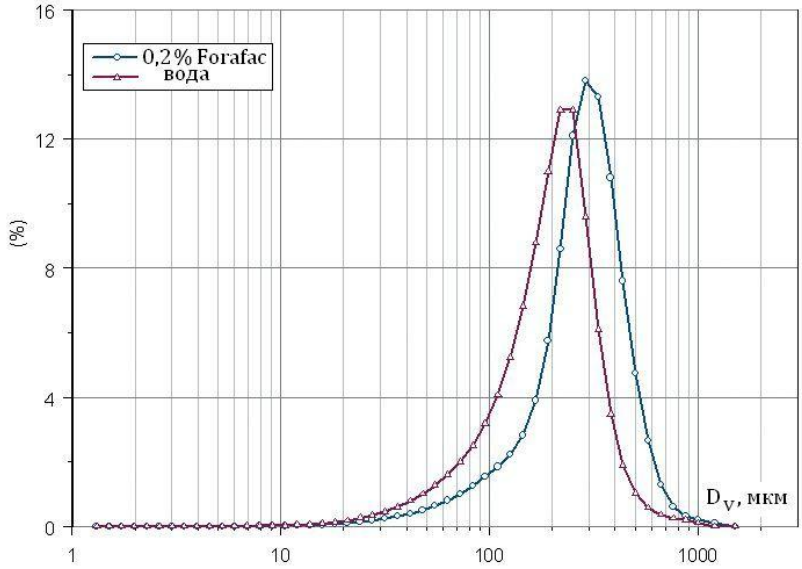


Рис. 1.32 – Порівняльна картина використання поверхнево-активних речовин (Forafac) у якості змочувачів

Приміщення швидко охолоджувалося, а висота полум'я обмежувалася використанням чистої води, проте горіння було полуменевим. Затухання досягалося лише при використанні водяного туману із поверхнево-активними речовинами. При використанні розчинів ПАР на поверхні палива утворювалися острівці піни, що потім з'єднувалися, що обмежувало до ізолювання поверхні палива та гасіння полум’я. Окрім того, розчини поверхнево-активної речовини також захищали від повторного займання протягом щонайменше дев'яти хвилин після зупинення горіння.

Навіть при загальному затуханні, повторне займання з гарячих навколишніх поверхонь часто може бути проблемою. Потенційним рішенням є використання водяних туманів, дія яких посилюються застосуванням поверхнево-активних речовин.

Зазначені підходи до проведення лабораторних досліджень досить ефективні, але більш орієнтовані на стаціонарні системи генерування розпилених потоків, спрямованих вертикально вниз, і у випадках, коли руйнування струменя відбувається практично відразу ж після його виходу з

насадки, що є окремим випадком процесу струминоформування. Такі підходи можуть бути застосовані для вимірювання параметрів струменів, що генеруються стаціонарними системами водяного [183-185] і пінного пожежогасіння [186, 187].

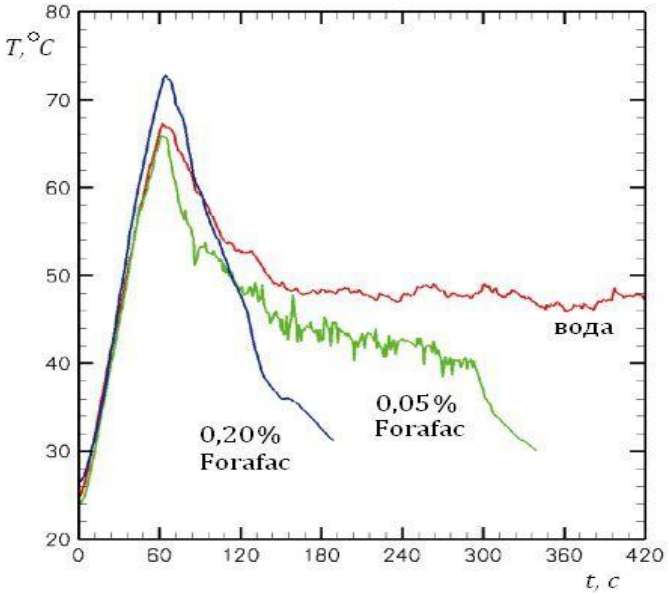


Рис. 1.33 – Залежність температури охолоджувальної поверхні

При застосуванні теорії планування експерименту, частина задач, поставлених на початку роботи, може бути успішно вирішена на простому стенді, що максимально наближений до реальної системи струминоформування, якою оснащені сучасні пожежні автоцистерни. А у випадку мобільності стенда, коли є можливість його використання в натурних експериментах за межами лабораторії, зростає адекватність отриманих у експериментах результатів, що відповідають реальним умовам пожежогасіння.

Слід вказати, що першими зробили спроби всесторонньо розглянути пожежогасіння із застосуванням так званих «класичних» прямоточних водяних струменів, туманних та комбінованих атак були Л. Лейман [188, 189], К. Роуер [190, 191] і Ф. Нельсон [192, 193]. Перед усім вони зосередилися на проведенні численних експериментів, у результаті яких надали багато практичних рекомендацій застосування струменів під час пожежогасіння. Вони визначили, что обертання за годинниковою стрілкою сопла (ствола)

дозволяє досягти ефекту створення «рулону» потоку по периметру приміщення, охолодження стін, стелі та підлоги з зовнішньою кромкою потоку (струменя), у той час як внутрішня частина потоку охолоджує гарячі гази, що утворюються при пожежі. Охолодження нагрітої стелі, стін й горючих матеріалів дає максимальну кількість пару в найкоротші терміни. Якщо витрата вогнегасної речовини достатня, то у більшості проведених експериментів гасіння житлових приміщень складало не більше 15–30 секунд [194]. К. Роуер і Ф. Нельсон наголошували на необхідності попередити «переохолодження», щоб могти управляти тепловим балансом в приміщенні для забезпечення в ньому димової та парової вентиляції [195]. Разом з тим, зазначена тактика використовувалася з 50-х років і до кінця минулого століття в США. Однією з основних причин відсоткового зменшення пожежогасіння із застосуванням розпорошених струменів стала велика кількість травмованих опіками пожежників. Починаючи з 80-х років у США почала відновлюватися практика переважного застосування прямоточних суцільних струменів, що й була більш характерною для країн Європи та пожежної охорони колишнього Радянського Союзу.

Нині частота застосування розпорошених струменів дещо зростає, передусім за рахунок зростання кількості автоматизованих систем пожежогасіння, для яких такі струмені є більш уживуваними.

Висновки до розділу 1

1. Окрім оперативної готовності до використання за призначенням аварійно-рятувальної та протипожежної техніки важливо гарантувати її високу ефективність у випадках практичного застосування. Розв’язання даної задачі пов’язане із розробкою відповідних методів, алгоритмів, методик та підходів, що забезпечує розвиток наукових основ створення й експлуатації засобів

генерування вогнегасних струменів пожежними стволами, насадками та установками водяного пожежогасіння.

2. Розвиток наукових основ створення і застосування технічних засобів генерування водяних вогнегасних струменів повинен засновуватися на наступних базисах: визначенні загальних особливостей гідроструменів різних типів та формуванні рекомендацій щодо їх розрахунку й застосування для протипожежних робіт; розробці науково обґрунтованих методів прогнозування параметрів струменів у залежності від кінематичних і динамічних характеристик потоків на виході зі струминоформувальних пристроїв; проведенні досліджень, пов’язаних із особливостями пульсуючих та імпульсних струменів щодо припинення дії небезпечних факторів та локалізації зони надзвичайної ситуації; дослідженні впливу поверхнево-активних рідин на характер руху рідини у насадках і струменях; проведенні фізичного і математичного моделювання потоків в’язких і аномально в’язких рідин у струминоутвоюючих насадках різного типу внутрішньої струминоформувальної поверхні (кругової, плоскощілинної, зі складною геометрією тощо).

3. Важливо зробити узагальнення знань у області струминоформування як для випадку застосування мобільних систем пожежогасіння, кінцевим елементом яких є пожежний ствол, так і для випадку застосування стаціонарних систем автоматичного пожежогасіння при змінному рівні витрат рідини в трубопроводах. Формалізування процесу вибору типів струменів та їх оптимальних характеристик для кожного конкретного випадку їх застосування при локалізації та ліквідації надзвичайних ситуацій дозволить уникати випадків прийняття рішень, заснованих виключно на досвіді керівника гасіння пожежі.

4. Особливості генерування рідинних вогнегасних струменів, що застосовуються для локалізації та ліквідації надзвичайних ситуацій, а також особливості гідродинаміки потоків в струминоформувальних пристроях

протипожежної техніки потребують подальшого вивчення для забезпечення наукового підґрунтя для розрахунку та технічної реалізації високоефективних процесів генерування рідинних вогнегасних струменів. Зазначене має базуватися на аналізі й врахуванні конструктивних особливостей гідравлічного обладнання, що використовується у пожежогасінні, передусім пожежних стволів та насадок, а також на врахуванні особливостей руху рідинних потоків у струминоформувальних каналах та вогнегасних струменів на їх виходах.

5. Насамперед мають бути розглянуті пожежні стволи та насадки із круглим поперечним перетином внутрішнього струминоформувального каналу, як найуживаніші у пожежній справі. Разом із тим, слід дослідити особливості інших конструктивних типів стволів та насадок (для формування водяних завіс, забезпечення рівномірної витрати струменя, з кавітацією потоку на виході, імпульсних та пульсуючих потоків у гідравлічних струменях, стратифікованих та змішуваних плинах, розпорошення струменя тощо).

6. Вбачається раціональним застосування ексергійного підходу до аналізу ефективності гідравлічної системи формування струменів. Серед факторів, що впливають на гідродинаміку потоку рідини в струминоформувальних каналах пожежних стволів та насадок, слід зосередити увагу на їх конструктивних особливостях, передусім геометрії внутрішніх поверхонь струминоформувальних каналів, аномалії в'язкості вогнегасних рідин, динамічному тиску, гідравлічному опорі. Для вогнегасних водяних струменів мають бути враховані основні закономірності їх розпорошення та умови дроблення крапель, а також вплив реологічних особливостей розчинів з поверхнево-активними речовинами, що використовуються для ліквідації горіння, на рух потоків у каналах струминоформування та на процес розпаду струменів.

7. Фізичне моделювання гідравлічної системи формування струменів, розробка відповідних експериментальних стендів для проведення гідродинамічних випробувань та дослідження вогнегасних струменів може бути реалізована завдяки застосуванню технології системного проектування об’єктів нової техніки.

8. Діапазон основних параметрів струменів, структура та умови їх формування забезпечуються використанням широкого типажу гідравлічного струминного обладнання. Питання особливостей гідродинаміки потоку в пожежних стволах, насадках та у протипожежному гідравлічному обладнанні, теоретичні і експериментальні дослідження даного питання до нинішнього часу можна вважати суттєво недостатніми та розрізненими. Й нині відсутні надійні методики визначення кінематичних і динамічних характеристик струменів за межами пожежних стволів та насадок, впливу різноманітних факторів на них.

9. Немає достатньо переконливої відповіді на питання про розрахунок пульсуючих та імпульсних струменів, впливу аномалії в'язкості рідини, прогнозування процесів дроблення струменя та його розпилення. Існуючі теорії, пов'язані з відривом крапель від поверхні струменя (граничний шар тощо), поки ще не знайшли повного підтвердження на практиці. Не знайшла свого розв’язання й задача детального ексергійного аналізу системи струминоформуваня для пожежогасіння.

10. Враховуючи вищесказане, виникає необхідність проведення як теоретичних так і практичних досліджень вільних гідравлічних струменів, узагальнення результатів ексергійного аналізу та розробки єдиної методики розрахунку гідродинамічних параметрів систем генерування водяних струменів із застосуванням пожежних стволів, насадок та установок водяного пожежогасіння.

РОЗДІЛ 2
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГЕНЕРУВАННЯ РІДИННИХ ВОГНЕГАСНИХ СТРУМЕНІВ

Розділ присвячений питанням гідроструминних технологій та процесам і особливостям генерування водяних вогнегасних струменів, конструктивним особливостям пожежних стволів, насадок, гідравлічного пожежного обладнання та особливостям проектування струминоформувальних насадок із різними профілями поперечного перерізу.

У попередньому розділі був проведений аналіз процесів генерування рідинних вогнегасних струменів, та окреслено деякі задачі, розв'язання яких сприятиме створенню й застосуванню технічних засобів генерування високоефективних водяних вогнегасних струменів. Дослідження процесів генерування рідинних вогнегасних струменів має бути початковим етапом розв'язання зазначених задач.

Відповідно до наведеної класифікації гідравлічного струминного обладнання (рис. 1.4), 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 опиратися на деякий процес отримання вогнегасного струменя із потрібними характеристиками, що попередньо має забезпечуватися застосуванням відповідних технічних пристроїв – пожежних стволів, насадок, гідравлічного пожежного обладнання.

2.1. Гідродинамічні особливості потоку в'язкої рідини в пожежних стволах та насадках із осесиметричним формувальним каналом

Ефективність застосування різних типів гідроструменів пожежно-рятувальними підрозділами ОРС ЦЗ України із використанням пожежно-

рятувальної техніки при пожежогасінні та проведенні аварійно-рятувальних робіт, спрямованих на локалізацію зони впливу небезпечних чинників, залежить від багатьох факторів. Серед них ключову роль відіграє відповідність параметрів отримуваних вогнегасних гідроструменів тим, що повинні бути у конкретний момент часу в конкретному місці. Це пояснюється особливостями динаміки розвитку пожеж, й означає, що оптимальним з позиції ефективності застосування вогнегасних гідроструменів є набуття можливості оперативного коригування виду, форми та параметрів струменів у залежності від особливостей конкретної (миттєвої, оперативної) ситуації.

Розглянемо особливості плину в пожежних стволах та насадках (далі в межах параграфа – насадки), виходячи з наступної схеми: насадку розглядаємо як канал, що забезпечує звуження потоку, а за входом починається так звана гідравлічна початкова ділянка $Z_{\text{п.д.}}$ [22]. На рис. 2.1 потік у насадці представлено трьома ділянками: за кільцевою ізольованою зоною; зоною, у якій спостерігається звуження потоку; ділянкою нестабілізованого потоку довжиною $Z_{\text{п.д.}}$ ($L_{\text{пд}}$, рис. 1.10). На цій ділянці відбувається деформація епюри швидкостей від перетину 3–3 до перетину 4–4 під дією сил інерції при конвективному прискоренні. Передбачається, що в цій області справедлива наступна 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.

У зв'язку із проявом сил інерції від конвективного прискорення [196], градієнт тиску на початковій ділянці є відмінним від константи $\frac{\partial P}{\partial x} \neq const.$

Це дає можливість для всієї розглянутої зони вважати у ядрі потоку справедливою умову

$$\left.\frac{\partial P}{\partial x}\right|_{y=y_{\text{ядра}}} = -\rho U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + \left.\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}\right|_{y=y_{\text{ядра}}}, \qquad (2.1)$$

де P – тиск рідини, ρ – густина, τ_{xx} – нормальні напруження, $y_{\text{ядра}}$ – координата, що визначає ядро потоку на початковій ділянці.

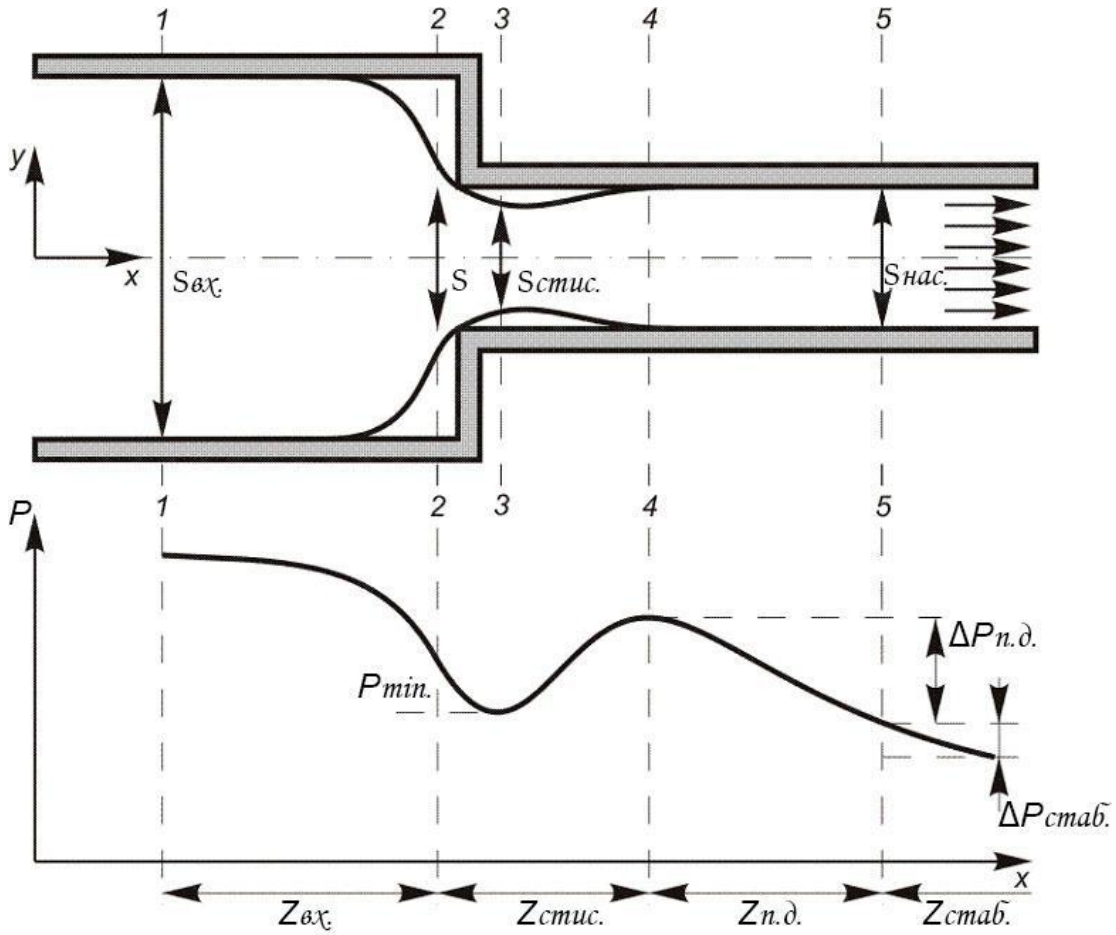


Рис. 2.1 – Схема потоку рідини (води) в насадці з позицій існування гідродинамічної початкової ділянки

Перетворення рівняння руху, відповідно до рекомендацій [27], дає можливість одержати наступні залежності

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

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

й

$$S(x)\frac{dU_{\text{сер}}}{dx} + U_{\text{сер}}(x)\frac{dS}{dx} = 0, \tag{2.2}$$

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

$$\alpha^k = \frac{\int_S U^2 dS}{U_{\text{сер}}^2 S} \quad \text{й} \quad \alpha^E = \frac{\int_S \Delta U_x^2(x,y) dS}{U_{\text{сер}}^2 S} \tag{2.3}$$

Із аналізу поданих залежностей (2.2) випливає, що втрати енергії в насадках забезпечуються як дією сил інерції, так і силами в'язкого тертя, що відповідає методиці розрахунків гідродинамічної початкової ділянки [22].

Розв'язуючи дані рівняння щодо перепаду тисків на початковій ділянці Δp, можна одержати остаточні вирази для перепаду тисків на гідродинамічній початковій ділянці, вони міститимуть два доданки, що характеризують вплив сил в'язкості й сил інерції при конвективному прискоренні.

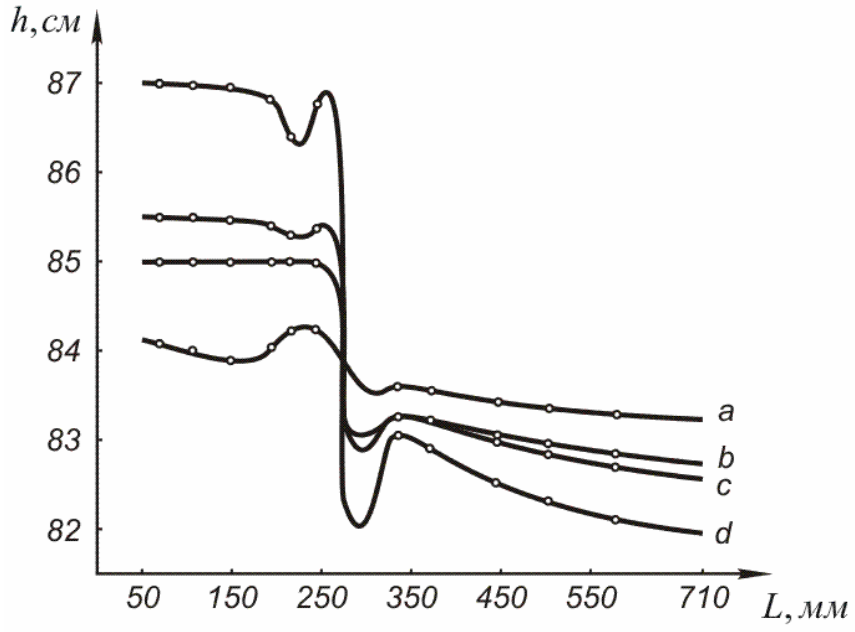


Рис. 2.2 – П'єзометричні лінії потоку в насадці

Результати проведених експериментів (рис. 2.2) із визначення зміни тиску по довжині насадки дають уявлення про характер зазначених втрат і вказують на складну структуру потоку в насадці в області входу (рис. 2.3). Цим

пояснюється вигляд отриманих у результаті експерименту п'єзометричних ліній потоку в насадці за кільцевою ізольованою областю (рис. 2.2).

Аналіз подібних кривих показує, що поблизу площини раптового звуження, при низьких числах Рейнольдса $Re < Re_{\text{гр}}$ спостерігається зниження тиску, причому, ступінь напруження збільшується у напрямку до центру каналу й бічної стінки. При наближенні до площини звуження, тиск p у центральній частині потоку, що відповідає по ширині каналу h, має градієнт близький до нуля. У той же час в області бічної стінки, у безпосередній близькості перед звуженням (по осі x), при досить великих числах Рейнольдса $Re > Re_{\text{гр}}$, величина p набуває екстремального значення.

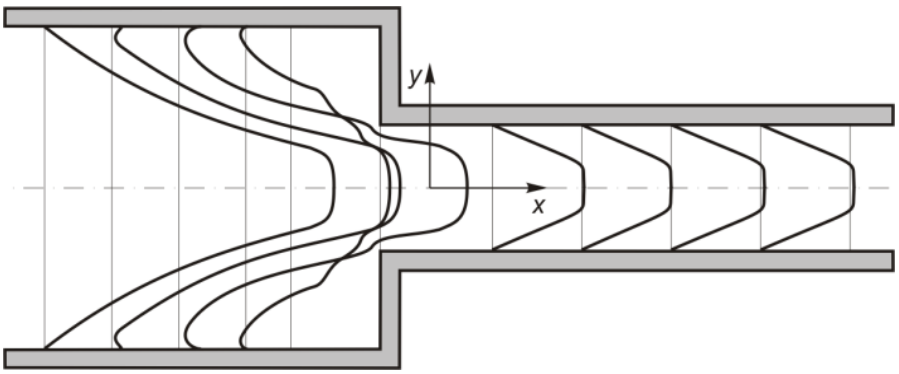


Рис. 2.3 – Деформація епюри швидкостей при раптовому звуженні потоку

Подібна картина має місце й за площиною раптового звуження, де величина тиску швидко відновлюється [22]. У загальному випадку для насадки, як каналу, що забезпечує раптове звуження потоку, мають місце чотири характерні точки-зрізи, дві з яких є екстремумами (точки 3 і 4 рис. 2.1). 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 від 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 $(p_3 - p_4)$.

Для перепаду тиску $\Delta p_{\text{пд}}$ буде справедливим запис [22]

$$\Delta p_{\text{пд}} = \frac{\rho Q^2}{2S_5}\left[X_1\left(\frac{1}{\beta_2}-1\right)-\beta_1^2+1\right], \tag{2.4}$$

де $X_1 = \varphi(S_{\text{вх}}, S_{\text{стис}}, S, l)$;

$\beta_1 = \frac{S_1}{S}$, $\beta_2 = \frac{S_3}{S}$;

l – характерний розмір каналу.

Якщо стиснення потоку відсутнє, тобто $\beta_2 = 1$, то вираз $\left[X_1\left(\frac{1}{\beta_2}-1\right)-\beta_1^2+1\right]$ спрощується до відомого вигляду $(1-\beta_1^2)$.

Слід зазначити, що можливий інший спосіб визначення втрат тиску в області звуження каналу. Аналіз кривих, поданих на рис. 2.2, показує, що вони за своїм характером досить близькі до кривих, які можна описати рівнянням Ван-Дер-Ваальса

$$\frac{p}{0{,}5\rho U_{\text{сер}}^2} = \frac{A}{\frac{x}{H}-\varepsilon} - \frac{B}{\left(\frac{x}{H}\right)^2} ,$$

де $U_{\text{сер}}$ – середня швидкість потоку, H – ширина каналу, а A, B та ε – деякі постійні величини.

При дослідженні цієї залежності нескладно одержати рівняння, що перетворює на нуль першу похідну функції $p(x)$ [22]

$$2B\left[\frac{x}{H}-\varepsilon_1\right]^2 - A\left(\frac{x}{H}\right)^3 = 0 .$$

Подальші перетворення, пов'язані з врахуванням характерних особливостей розглянутої кривої, дозволяють одержати відповідні вирази для A й B [197]

$$\begin{aligned} A &= 2\varepsilon_{U_{\text{вх}}}\left(1-2\frac{\frac{x_1}{H}}{\frac{x_1}{H}-3\varepsilon}\right) - 2\varepsilon_{U_{min}}\cdot\frac{x_1}{H}\cdot\frac{\frac{x_1}{H}-3\varepsilon}{\frac{x_1}{H}-\varepsilon} , \\ B &= \left(\varepsilon_{U_{min}} - 2\varepsilon_{U_{\text{вх}}}\cdot\frac{1}{\frac{x_1}{H}-\varepsilon}\right)\cdot\left(\frac{2}{3\left(\frac{x_1}{H}-\varepsilon\right)}-\frac{1}{\frac{x_1}{H}}\right), \end{aligned} \tag{2.5}$$

$$\varepsilon_{U_{min}} = \frac{p_{min}}{0{,}5\rho U_{\text{сер}}^2},$$

$$\varepsilon_{U_{\text{вх}}} = \frac{p_{\text{вх}}}{0{,}5\rho U_{\text{сер}}^2},$$

де $\varepsilon_{U_{\text{вх}}}$ – безрозмірний тиск у вхідному перетині потоку на гідродинамічній початковій ділянці;

x_1 – координата перетину потоку, у якій тиск p набуває екстремального значення.

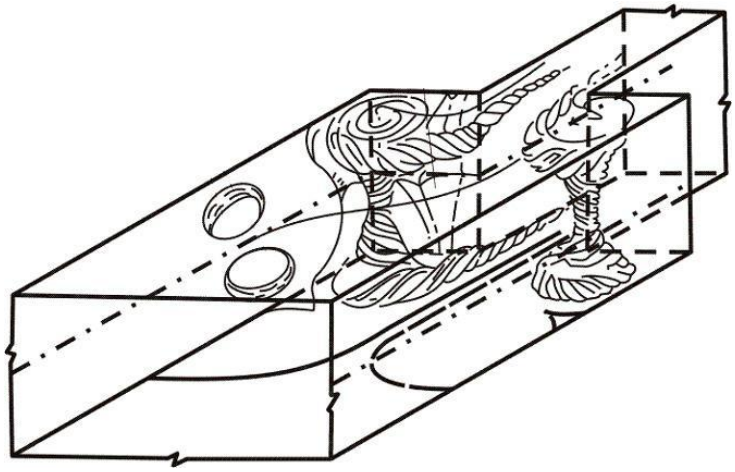


Рис. 2.4 – Картина потоку в області «раптового звуження»

Відповідно до розподілу швидкостей в зоні раптового звуження, отримана картина деформації поля швидкостей має вигляд (рис. 2.4).

Підставляючи вирази, що визначають величини A й B, у рівняння Ван-Дер-Ваальса одержимо остаточно [22]

$$\frac{p}{0{,}5\rho U_{\text{сер}}^2} = \varepsilon_U = \frac{p_{\text{вх}}}{\rho U_{\text{сер}}^2} \cdot \frac{1}{\frac{x}{H} - \varepsilon} \cdot \left(1 - \frac{x_1}{x} \cdot \frac{\frac{x_1}{H} - 3\varepsilon}{\frac{x_1}{H} - \varepsilon}\right) -$$

$$- \frac{p_{min}}{\rho U_{\text{сер}}^2} \left(\frac{\left(\frac{x_1}{H} - 3\varepsilon\right) 2\frac{x}{H} - \left(\frac{x_1}{H} - \varepsilon\right)^2 \left(\frac{x}{H} - \varepsilon\right)}{2\left(\frac{x_1}{H} - \varepsilon\right)\left(\frac{x}{H} - \varepsilon\right)} \right) \frac{x_1}{H} \qquad (2.6)$$

Перевагою у застосуванні цієї залежності є те, що вона пов'язує величину тиску в будь-якому перетині потоку в насадці з екстремальним значенням $p_{\text{вх}}$ і p_{min} .

2.2. Аналіз конструктивних особливостей типових пожежних стволів як струминоформувальних пристроїв

Для визначення основних гідродинамічних параметрів потоків у вогнегасних гідравлічних струменях, впливу на них сил інерції при конвективному прискоренні, поверхневих сил при розпорошенні струменів, аномалії в'язкості, особливо важливо враховувати геометричні особливості струминоутворюючих пристроїв і їх елементів, перед усім пожежних стволів та насадок. Слід констатувати факт відсутності надійних методів та алгоритмів розрахунку подібного типу задач.

Розглядатимемо клас струменів, що називаються незатопленими, тобто таких, що подаються в середовище, густина якого набагато менше густини струменя. У більшості випадків йдеться про незатоплені гідравлічні струмені в повітряному середовищі.

Для потреб пожежно-рятувальних підрозділів ОРС ЦЗ України найчастіше використовуються засоби, здатні генерувати зазначені струмені, з тиском до 1,0 МПа (іноді до 4,0 МПа) і витратою до 40 л/с від однієї одиниці техніки [198].

Формування таких потоків для пожежогасіння здійснюється шляхом подачі під тиском води або спеціальних розчинів через струминоформувальні пристрої – пожежні стволи або насадки. Прийнято називати насадками такі конструкції, в яких можна нехтувати втратами напору по довжині, а діаметр вихідного отвору не менше 1/4 довжини внутрішнього каналу, зазвичай в інших випадках такі пристрої називають стволами.

$L \geq 4 \cdot d$ – ствол,

$L < 4 \cdot d$ – насадка.

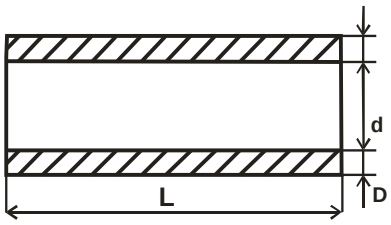


Рис. 2.5 – Найпростіший струминоформувальний пристрій

Зрозуміло, що реальні пожежні стволи й насадки мають значно складнішу конструкцію аніж подану на рис. 2.5. Характеристики отриманих за їх допомогою струменів, окрім визначальних параметрів L і d, залежатимуть від особливостей геометрії входу та виходу ствола, а також внутрішнього струминоформувального каналу (кута звуження/розширення, наявності раптових звужень, перекриттів, зон ежекції, шорсткості поверхні тощо). Зазначимо, що характеристична величина L має визначальне значення при дослідженні особливостей струминоформувальних пристроїв у пожежогасінні, оскільки із позицій гідродинаміки потоку вогнегасної рідини, короткий канал відповідає насадці, а більший – пожежному стволу (із відповідними особливостями їх розрахунків). У випадку, коли величина $L \gg d$, можна і потрібно застосовувати відомі розрахункові методики для довгих труб, що відповідають установкам водяного пожежогасіння або гідравлічному пожежному обладнанню – пожежним рукавам, напірним лініям.

Узагальнена класифікація пожежних стволів, як базових струминоформувальних пристроїв системи отримання вогнегасних струменів, подана на рис. 2.7. Зазначимо, що слід розрізняти ручні та лафетні струминоформувальні пристрої. Їх відмінність, перед усім, полягає у витратах рідини, яку вони забезпечують, та у їх геометричних параметрах. Зазвичай для обслуговування ручних струминоформувальних пристроїв (табл. 2.1) потрібна одна одиниця обслуговуючого персоналу, витрати складають 0,2…7 л/с, а для лафетних (табл. 2.2) – декілька працівників при рівні витрат рідини від 7 л/с.

Основними областями незатоплених струменів є: компактна, в межах якої струмінь зберігає свою циліндричну форму (на цій ділянці суцільність

потоку ще не порушується і при $p = const$, дивергенція вектора швидкості дорівнює нулю $div\,\vec{v} = 0$); роздроблена ділянка, де порушується суцільність середовища й, нарешті, розпилена ділянка, де спостерігається остаточний розпад потоку на окремі краплі.

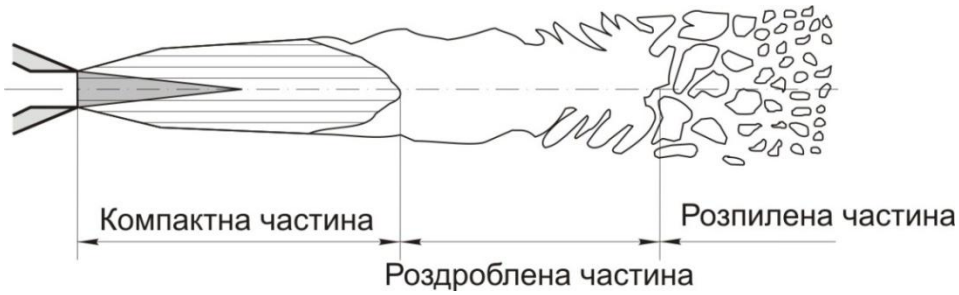


Рис. 2.6 – Узагальнена картина розпаду незатопленого струменя

Досі у літературі застосовуються різні підходи до визначення понять «компактна» та «роздроблена» частини струменя. Найчастіше схиляються до використання класичного поняття «компактна» для тієї частини струменя, де зберігається його суцільність та виконується умова переносу струменем певної кількості води через визначений круг [199, 200].

В науковій літературі немає загального чіткого поділу гідравлічних струменів за значенням тиску. Це пояснюється, наприклад, тим, що «високі» значення тиску для технологічної операції пожежогасіння називають «низькими» для технологічної операції різання (рис. 2.7). Однак, можна вказати, що більшість авторів встановлюють такі види струменів та значення тиску [22]:

– низьконапірні струмені, 0,2–1,2 МПа;

– струмені середнього тиску, 2,0 – 10,0 МПа;

– струмені високого тиску, 12,0-50,0 МПа;

– струмені надвисокого тиску, понад 70,0 МПа.

Разом із тим, будемо дотримуватися класифікації, властивої для пожежної справи, де, наприклад, пожежні рукави високого тиску характеризуються значеннями величини робочого тиску від 4,0 МПа [201], що зазвичай в інших галузях відноситься до середніх тисків. Більш того, для

автоматичних ситем пожежогасіння термін «високий тиск» іноді застосовують від 3,5 МПа [202], а пожежних насосів – від 2,0 МПа [203].

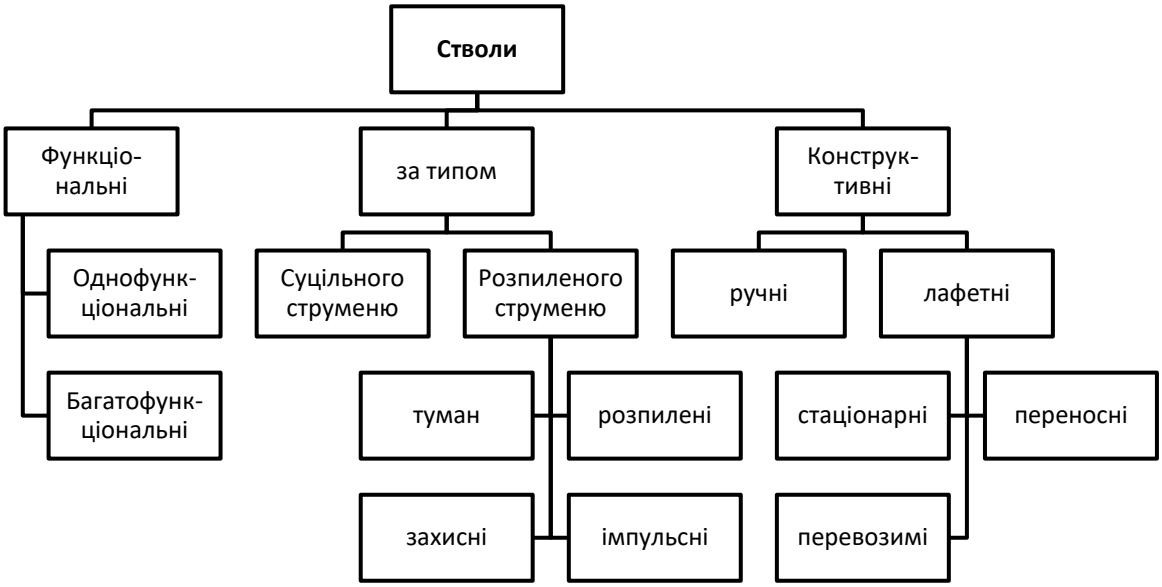


Рис. 2.7 – Класифікація пожежних стволів

Виділимо деякі типи стволів й охарактеризуємо їх, щоб уявити картину розмаїття та виділити області їх можливого застосування.

Гладкоствольні стволи [22]. Даний тип найпростіших стволів слугує для отримання і направлення суцільного струменя води. Вони виконані у вигляді конусоподібних циліндрів з насадками (позиція 1, табл. 2.1), які дозволяють змінювати вихідний діаметр струменя, і відповідно, параметрів струменя. Для кожного рівня витрат існує лише один єдиний розмір ствола, при якому досягається оптимальна швидкість і дальність струменя. Типовими прикладами даного класу стволів є ручні стволи РС-50 та РС-70.

Розпилювальні (розпорошувальні) стволи [22]. До даних стволів відносяться пристрої, які дозволяють отримувати лише розпилені струмені води. Розпилення струменів досягається за рахунок використання насадок пропелерного типу або спеціальної конфігурації вихідного/(вихідних

отвору/отворів ствола, характеризуються його фіксованим або змінним діаметром, обмеженим діапазоном витрат води. Вимагають точного значення тиску на насосі для найбільш оптимального використання й дотримання паспортних характеристик пожежного ствола. Типовими представниками даного класу стволів є ручні стволи «А» та «Б», насадка-розпилювач РВ-12 та лафетний ствол ПЛС-20П з насадкою НРТ-20.

Комбіновані стволи [22]. Являють собою дуже широкий за типажем та номенклатурою клас пожежних ручних та лафетних стволів, які дозволяють отримувати, як суцільні, розпилені так і комбіновані суцільно-розпилені струмені води. Пожежний має можливість вручну змінювати форму струменя від компактного струменя до захисного екрана з кутом розпилення 90º…120º.

Комбіновані стволи мають за типом отримуваних струменів води поділяються на такі типи:

1. стволи для отримання або суцільних або розпилених струменів;
2. стволи для отримання комбінованих струменів;
3. стволи для отримання диспергованих струменів.

За характером подачі вогнегасної речовини стволи поділяються на два типи:

1. безперервної дії;
2. пульсуючої дії.

За типом керування витратами води розрізняють стволи з фіксованим керуванням витрат води і стволи автоматичні:

1. комбіновані стволи з фіксованим керуванням витрати води, коли витрата води залежить від тиску перед насадком ствола (у робочій рукавній лінії) і не керується пожежним;
2. комбіновані автоматичні стволи, коли ствол автоматично підбирає оптимальний діаметр вихідного отвору під реальну витрата води.

Наведемо схематичне зображення суцільного, пульсуючого, комбінованого та імпульсного типів струменів (рис. 2.8).

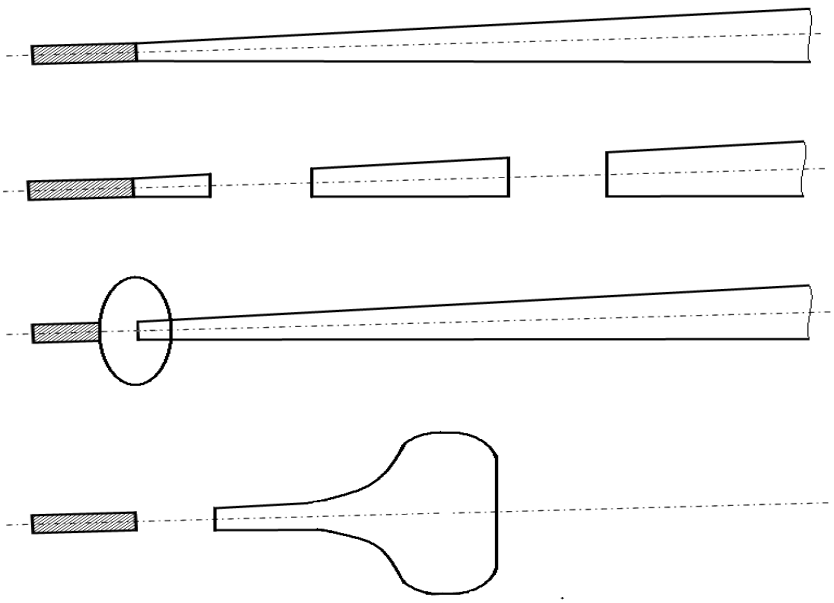


Рис. 2.8 – Найбільш вживані типи струменів.

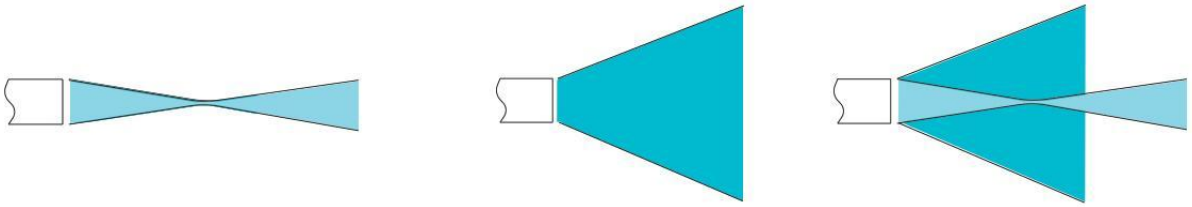


Рис. 2.9 – Різні типи струменів за формою їх генерування [22]: суцільний, розпорошений і комбінований

З огляду на вищенаведені дані подальше вивчення процесу струминоформування має базуватись на ґрунтовному знанні законів гідродинаміки, щоб отримати можливість коректного проектування нових конструкцій стволів та насадок, які повинні забезпечувати отримання оптимальних струменів перед усім з позицій:

– дальності подачі;
– якості розпорошення (дисперсності);
– енергетичних затрат на струминоформування;
– можливості оперативної зміни форми та параметрів струменів.

2.3. Реалізація гідроструминних технологій у процесі розробки конструкцій пожежних стволів та насадок із осесиметричним формувальним каналом

2.3.1. Аналіз структури вільного незатопленого турбулентного струменя

Протипожежна, аварійно-рятувальна та інша спеціальна техніка, яка використовується під час виконання завдань цивільного захисту, а саме для запобігання, виявлення, локалізації та ліквідації пожеж, захисту людей, матеріальних цінностей та довкілля від впливу небезпечних факторів пожеж базується на використанні самих різних сучасних та ефективних технологій, серед яких окремо виділимо гідроструминні.

Як відомо [205, 206], гідравлічні струмені можна розглядати як потоки рідини, що не мають твердих стінок. Залежно від їх призначення до них висуваються різні вимоги: забезпечення певного радіусу дії, величини ударної сили, певні розміри тощо.

У загальному випадку гідравлічні струмені можна поділити на дві групи (розд.1): затоплені і незатоплені. Затоплені гідравлічні струмені (подаються в масу рідини) являють практичний інтерес при вирішенні задач змішування рідин, тепло- і масообміну, тобто у випадках, коли важливо знати такі характеристики струменів, як положення їх полюсів, довжини початкових ділянок, швидкості по осях струменів, області, що обмежують розміри струменів.

Незатоплені струмені, тобто ті, що подаються в газове середовище, отримали досить широкий діапазон використання. Саме вони застосовуються при пожежогасінні.

Основними ділянками незатоплених струменів є: компактна, в межах якого струмінь зберігає свою циліндричну форму; роздроблена; розпорошена

(рис. 2.6). Ділянка Z1 (рис. 2.10) є ядром струменя; Z2 – початкова ділянка, на якій ще не спостерігаються поверхневі вихори рідини; Z3 – основна ділянка струменя; Z4 – ділянка струменя з втратою стійкості поверхні; Z5 – ділянка повного розпаду струменя. В подальшому картина формування та розпаду струменя буде суттєво уточнена.

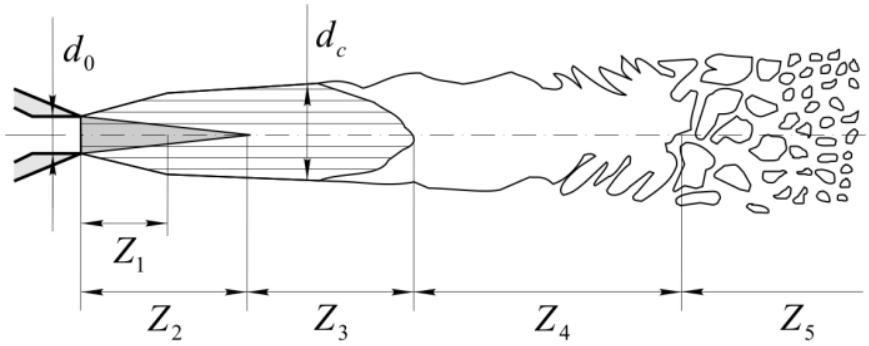


Рис. 2.10 – Схема структури вільного незатопленого турбулентного струменя

В залежності від завдань, які поставлені перед відповідною технікою, здійснюється вивчення і подальше використання тієї чи іншої ділянки струменя. Слід зазначити, що у зв'язку з переслідуваними цілями і відповідно до класифікації (§2.2), незатоплені гідравлічні струмені можна поділити на низьконапірні, середнього, високого та надвисокого тиску. В рамках роботи передусім йдеться про водяні вогнегасні струмені низького й середнього тиску (відповідно 0,2 … 1,2 МПа та 2,0 … 8,0 МПа). Значеннння тиску відноситься до тиску на вході пожежного ствола чи насадки, що формують струмінь. [66].

Важливе значення й окрему роль відіграють питання, пов'язані з реологічними особливостями рідин, з яких формується незатоплений гідравлічний струмінь [207].

В залежності від характеристик гідравлічних струменів, реологічних властивостей рідин визначається область їх застосування: протипожежна техніка, руйнування та різання твердих матеріалів, системи гідроавтоматики, обладнання з переробки полімерних матеріалів тощо. Важливо, що деякі технологічні рішення, які набули застосування в одних галузях, починають використовувати в інших. Так, наприклад, поширення у протипожежній

техніці та обладнанні набувають технології струминного руйнування перепон та різання твердих матеріалів [208, 209] (COBRA-system), що раніше були властиві техніці, яка застосовувалася у гірничій справі.

Ефективність застосування гідроструминних технологій визначається особливостями формування та витікання струменів, складом робочої рідини. Ці фактори впливають на параметри початкової ділянки струменя, які характеризують його далекобійність, компактність, стійкість і руйнівну здатність (ударну силу) [210], а накладення пульсацій спричинює виникнення у потоці додаткової нестаціонарної гідродинамічної сили, що сприяє збільшенню руйнівної здатності струменя.

Проведемо аналіз окремих випадків застосування гідравлічних струменів в процесі гасіння пожеж.

Вогнегасні струмені. Зазначимо, що досить часто у науковій літературі застосовуються різні терміни по відношенню до струменя – «вогнегасний», «протипожежний», а іноді, навіть «пожежний». У будь-якому випадку надалі будемо використовувати термін «вогнегасний» у сенсі «такий, що застосовується для пожежогасіння» відповідно до [19]. Хоч саме термін «пожежний» є найбільш вживаним серед рятувальників, проте він не може вважатися коректним з позиції прикладної лінгвістики (розробки термінології), доречно застосовувати «струмінь вогнегасної речовини».

Під час аналізу потоку рідини у вогнегасному струмені, основними характеристиками зазвичай вважаються дальність польоту і жива сила, яку струмінь повинен мати в кінцевій точці. Крім того, важливими є фактори, що характеризують якість (рівномірність) розпилення струменя та дисперсність потоку в різних його частинах.

Відомо, що дальність польоту пов'язана з траєкторією струменя, яку найчастіше визначають відповідно до формули вільного падіння тіла [211]. У цьому ж випадку проводиться і розрахунок швидкості руху рідини. Згідно з вимогами, висунутими до струменів, проектується і ствол, який повинен мати

таку конструкцію, при якій втрати енергії були б найменшими, а коефіцієнт витрати максимальним. На рис. 2.11 наведено приклад однієї з найпростіших конструкцій таких стволів. Особливістю ствола є плавні переходи від одного перетину до іншого, невисока якість обробки внутрішньої поверхні. На характер руху струменя істотний вплив також має гладкість струменя, що виходить зі ствола, зокрема збереження його компактності на максимально можливій довжині. Іноді для збереження компактності струменя в стволі встановлюють «турбулізатори», що складаються з двох турбін з трьома лопатями між ними. Вогнгасний струмінь зазвичай прийнято поділяти на три (іноді виділяють дві) частини: компактну, роздроблену і розпилену, у випадку двох частин: компактну і дощову або роздроблену частини). Теоретична дальність струменя може бути обчислена відповідно до даних роботи [66] за формулою

$$Z = \frac{H \cdot cos^2\alpha}{1 + \frac{\lambda H}{d} \cdot cos^2\alpha}, \tag{2.7}$$

де Z – дальність подачі струменя; $H = \frac{P}{\rho g}$ – тиск в стволі; d – діаметр сприскy; α – кут нахилу ствола відносно горизонту; λ – коефіцієнт гідравлічного тертя.



Рис. 2.11 – Прямоточний пожежний ствол

На рис. 2.12 показана залежність дальності бою струменя Z від кута нахилу насадки [212, 213]. Аналіз даної залежності дає змогу стверджувати, що найвигіднішим кутом нахилу ствола з позицій дальності його подачі є кут в 25°, окрім того, конусність сприскy має складати 4–5°.

Дуже важливим фактором у формуванні пожежного струменя є умови його роздробленості і утворення окремих крапель. Аналіз цих умов досить повно викладено в роботі [212].

Розглянемо випадок порівняно малих швидкостей руху, коли компактна частина струменя досить велика. Розпад струменя (її дроблення) відбувається під дією капілярних сил. Поверхнева енергія циліндричної ділянки струменя рідини в цьому випадку не є мінімальною. При розпаді на краплі ця енергія зменшується, оскільки відбувається наближення її форми до оптимальної форми рідини зі сферичною поверхнею.

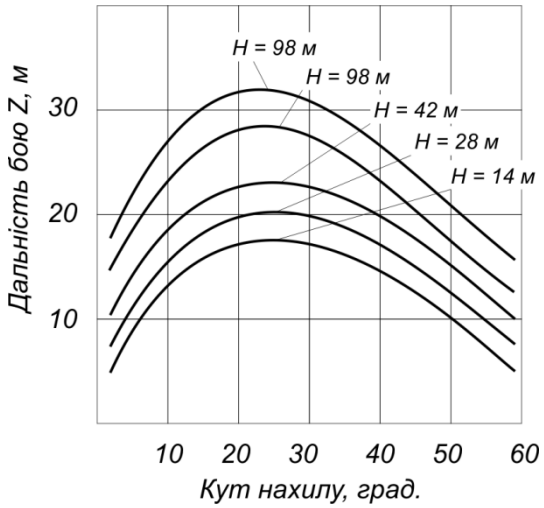


Рис. 2.12 – Залежність дальності подавання ствола Z від кута його нахилу при різних значеннях напору H

Якщо струмінь циліндричний з радіусом R і швидкість його виходу зі ствола складає U_0, то слід враховувати і той факт, що навколишнє середовище може бути джерелом початкових збурень (турбулентності, вібрації ствола тощо) [214]. У такому випадку основними характеристиками процесу розпаду струменя будуть довжина її компактної частини й розміри утворюваних крапель. Довжина суцільної частини визначається величиною Z. Оскільки задача розглядається як симетрична, то рівняння руху рідини в струмені можна записати наступним чином

$$\frac{\partial U_r}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu}{\rho}\cdot\left[\frac{\partial^2 U_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}(rU_r)\right)\right], \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial U_Z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu}{\rho}\cdot\left[\frac{\partial^2 U_Z}{\partial z^2} + \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial U_Z}{\partial r}\right)\right], \quad (2.9)$$

де U_r і U_Z – складові вектора швидкості у циліндричній системі координат; p – тиск.

Динамічний тиск середовища p_m на ділянці Z1 (рис. 2.10) за таких умов буде

$$p_m = p_0 \cdot f\left(\frac{1}{d_0}, \frac{U_0 d_0 \rho}{\mu}\right), \quad (2.10)$$

де $p_0 = \frac{\rho U_0^2}{\mu}$ – динамічний тиск струменя на виході із насадки.

2.3.2. Застосування технології проектування об’єктів нової техніки для створення пожежних стволів та насадок

Формування та оновлення парку сучасної протипожежної й аварійно-рятувальної техніки є ключовим чинником у забезпеченні результативного функціонування системи цивільного захисту населення в умовах аварій, катастроф і надзвичайних ситуацій різного походження – як природного, так і техногенного. Технічні засоби, що застосовуються для гасіння пожеж і проведення аварійно-рятувальних робіт, включно з пожежно-технічним та спеціальним рятувальним обладнанням, засобами пожежогасіння, індивідуального захисту та іншим майном, призначеним для подолання наслідків повеней, землетрусів, а також катастроф техногенного, біологічного, радіаційного, хімічного, екологічного чи військового характеру, мають створюватися з урахуванням сучасних вимог до об’єктів нової техніки [215]. При цьому визначення стратегічних орієнтирів у діяльності органів державної влади у сфері цивільного захисту повинно ґрунтуватися на використанні

технічно досконалих, надійних і високоефективних зразків протипожежної та аварійно-рятувальної техніки [216].

Створення нових високоефективних засобів протипожежного захисту, що сприяли б запобіганню, виявленню, локалізації та ліквідації пожеж може бути забезпечене реалізацією системних заходів наукового дослідження в галузі пожежної безпеки з одного боку та застосуванням сучасних методів проектування об’єктів нової техніки з іншого.

Науковими дослідженнями в галузі пожежної безпеки займаються тисячі науковців по всьому світу. Більшість із них є працівниками навчальних закладів або науково-дослідних установ. Така картина характерна й для України. Нині можна з упевненістю стверджувати, що переважна більшість наукових ідей не знаходять втілення у технічних засобах. Технічне оснащення підрозділів ДСНС України, на жаль, найчастіше можна вважати застарілим. Разом із тим, нинішні технології проектування об’єктів нової техніки, наприклад пожежних стволів чи насадок, дозволяють суттєво скоротити у життєвому циклі техніки часовий проміжок від нової ідеї до її технічної реалізації.

Проблема комплексної автоматизації промислових підприємств тривалий час залишалася одним із найважливіших завдань для керівників відділів, які відповідали за автоматизацію процесів проєктування та виробництва. На великих підприємствах цей аспект завжди розглядався як критично важливий для підвищення ефективності виробничих процесів. У даному контексті мова йде про впровадження сучасних методів проєктування та організації виробництва нової техніки, зокрема пожежних стволів. Для досліджень у якості прототипу було обрано один із найпоширеніших у практичному використанні пожежних стволів.

Щодо вибору програмних засобів проєктування, то перевага була надана одному з лідерів серед вітчизняних систем, що дозволяють створювати техніку різного призначення, включаючи протипожежне обладнання. Зокрема,

компанія Топ Системи – Україна (м. Київ) пропонує комплексне рішення для автоматизації підприємств на основі програмної лінійки T–FLEX. Особливістю такого підходу є інтеграція всіх необхідних інструментів у межах єдиного середовища, що дозволяє уникнути додаткових витрат і забезпечує єдність інформації на всіх етапах життєвого циклу виробу.

Підвищення ефективності використання пожежних автомобілів як складних систем можливо досягти завдяки оптимізації характеристик складових елементів, зокрема пожежних стволів. Це включає збільшення дальності струменя, точніше дозування розчинів піноутворювачів та усунення впливу зміни робочого тиску на похибку дозування. У даному випадку досліджувався не новий ствол, а відомий зразок РС-50, що дозволяє порівняти результати моделювання та експериментального використання існуючого обладнання. Подальші дослідження та моделювання можуть бути застосовані до нових розробок.

Тривимірне твердотільне моделювання проводилося з урахуванням загальних параметрів ствола. Головною метою було встановлення залежностей між конструктивними особливостями та робочими характеристиками, а також визначення оптимальних значень параметрів. Наприклад, було встановлено зв’язок між внутрішнім об’ємом ствола та дальністю струменя [217]. Аналогічні підходи до моделювання процесів у пожежному стволі розглядалися у працях Абрамова Ю. О. та Шаповалової О. О. [218].

Проєктування здійснювалося із застосуванням сучасних, водночас зручних технологій. Основою програмного комплексу стало тривимірне параметричне твердотільне моделювання T–FLEX CAD 3D, що побудоване на бібліотеці математичних функцій Parasolid (розробка компанії Unigraphics Solutions, дочірнього підприємства McDonnell Douglas, нині – Boeing). Серед ключових переваг цієї системи – використання нового параметричного ядра та орієнтація на потреби вітчизняного користувача як у функціональному плані,

так і з урахуванням цінової політики розробників. Це дозволяє забезпечити ефективну розробку конструкцій із високою точністю та мінімізацією витрат часу.

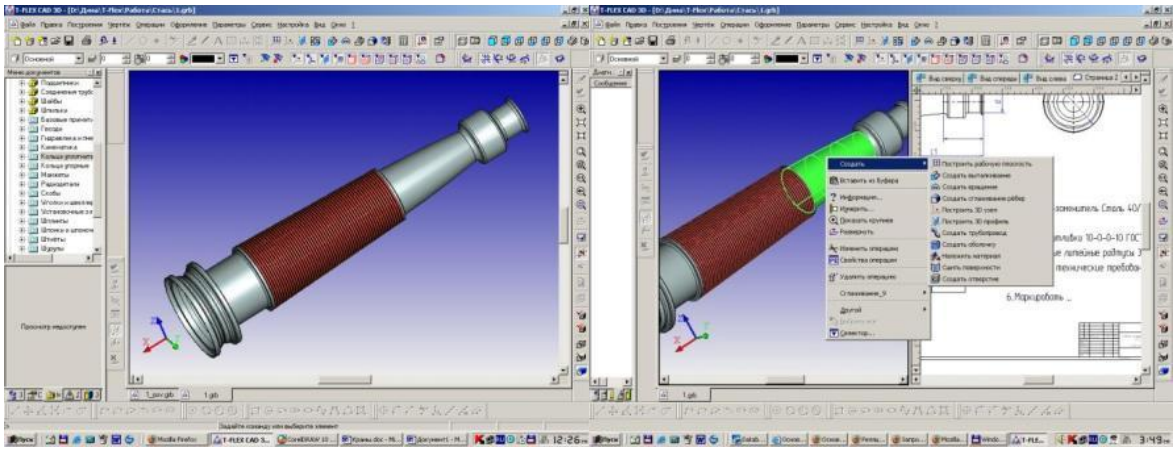


Рис. 2.13 – Створення параметричної збірної 3D моделі пожежного ствола зі змінними характеристиками

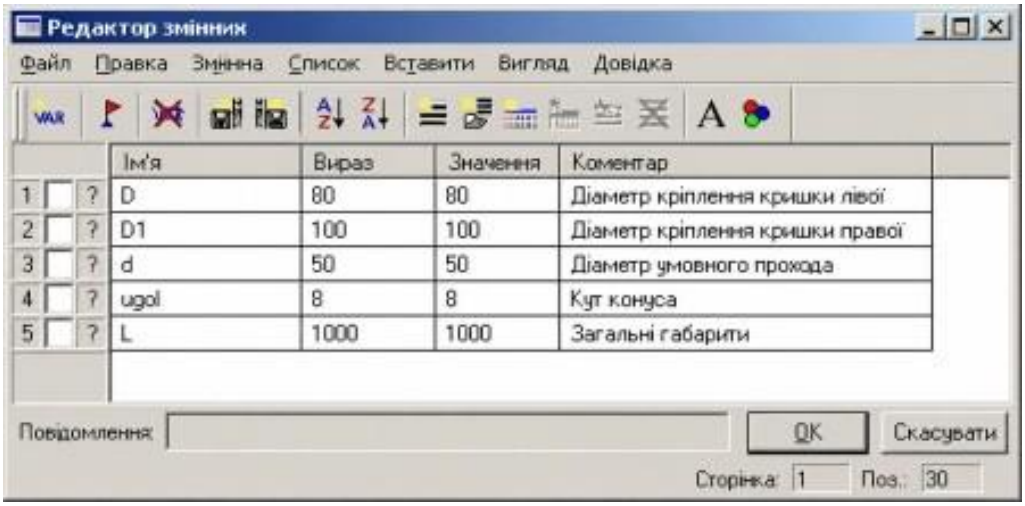


Рис. 2.14 – Створення параметричної збірної 3D моделі, специфікація

Використання лише плоских зображень значно ускладнює створення параметричних збірних креслень, їхню подальшу зміну та автоматичне формування специфікацій. З цієї причини основна увага була зосереджена на розробці параметричної тривимірної моделі пожежного ствола, що дозволяє отримати повний комплект конструкторської документації та уникнути обмежень традиційних систем проектування.

З урахуванням підходу життєвого циклу виробу, після завершення розробки в конструкторському бюро копії креслень надсилаються до технологічного відділу. Тут досвідчені фахівці складають маршрутно-операційні технології для виготовлення кожної деталі на виробництві.

Застосування описаної системи демонструє можливість оцінки складності проектування сучасної протипожежної техніки з використанням сучасних методів. Крім того, її використання для існуючих моделей стволів підтверджує необхідність внесення конструктивних змін, спрямованих на підвищення ефективності їх експлуатації [332, 338].

Без заглиблення у деталі моделювання слід зазначити, що така система суттєво спрощує процес проектування та виробництва пожежного ствола, скорочуючи час, необхідний на етап конструкторської роботи, приблизно втричі. Тривимірна модель створювалася у параметричній системі твердотільного моделювання, яка містить усі необхідні інструменти для двовимірного проектування та оформлення креслярської документації.

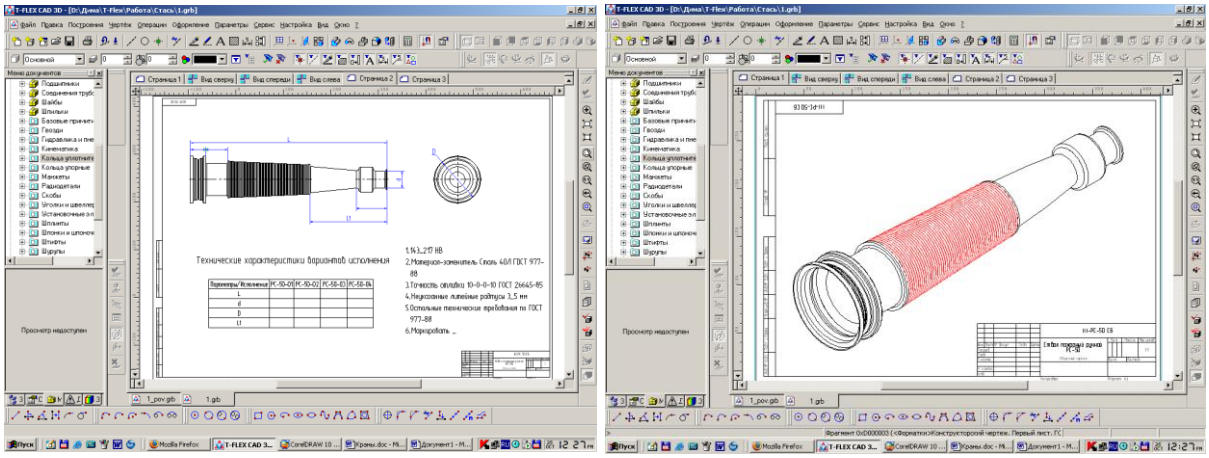


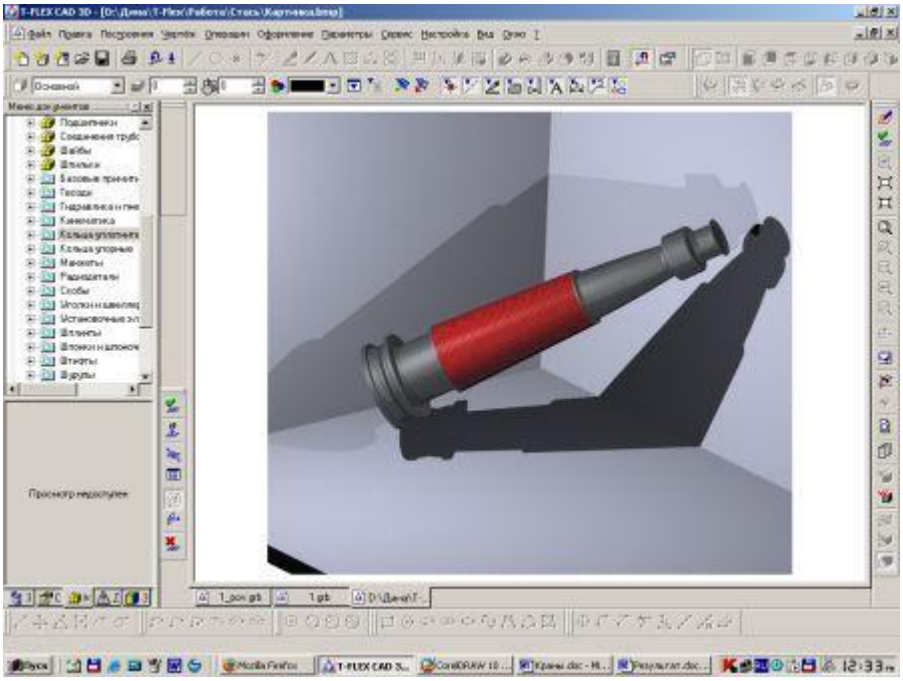
Рис. 2.15 – Геометрична модель, креслення і специфікація на виріб

Для створення базових елементів ствола використовувався наступний набір тривимірних операцій: обертання, лінійчата операція, оболонка, тіло по траєкторії, ливарний ухил, трубопровід, згладжування, булеві операції, створення лінійних і кругових масивів тощо. Наприклад, операція згладжування дозволяла створювати округлення з постійним і змінним

радіусом. При згладжуванні зі змінним радіусом зміна від початкового радіуса до кінцевого могла задаватися як лінійним, так і нелінійним законами.



(а)



(б)

Рис. 2.16 – Реальний ствол (а), фотореалістичне зображення виробу (б)

Важливість отриманих результатів полягає не лише у створенні окремих тривимірних моделей, але й у можливості їх динамічного тестування та оперативного внесення змін для підвищення експлуатаційних характеристик майбутнього виробу. Інтуїтивно зрозумілий користувацький інтерфейс у поєднанні зі спеціально розробленими функціональними можливостями забезпечує конструкторам створення складних тривимірних збірок без необхідності глибокого освоєння складних програмних засобів.

Використання зазначеного підходу до проектування разом із моделюванням процесу тривимірного плину рідини у струминоформуючому каналі моделі ствола РС-50 у програмному комплексі FlowVision дозволило окреслити основні технічні особливості ствола, що визначають характер отримуваного водяного струменя.

Так, при стандартних характеристиках функціонування ствола (витраті 3,7 л/с, тиску 0,4 МПа): довжина внутрішнього каналу виявилася більшою за довжину гідродинамічної початкової ділянки від вхідного отвору ствола (183 мм); конусність 1:13,5 (4,24°) не допускала відривних течій та великих зон завихрень чи пустот; важливим чинником гідравлічних втрат була шорсткість поверхні струминоформувального каналу, визначальним елементом для значень швидкості струменя на виході та довжини гідродинамічної початкової ділянки від вихідного отвору ствола була зона різкого звуження на виході ствола.

Сучасний стан розвитку обчислювальної техніки, а також усталені підходи до створення програмних продуктів у багатьох випадках дозволяють звести завдання розроблення програмного й технічного забезпечення не до їх безпосереднього проєктування, а до обґрунтованого вибору з уже наявних рішень. При цьому динамічний розвиток комп’ютерних технологій істотно ускладнює і часто робить недоцільним створення вузькоспеціалізованого апаратного забезпечення, оскільки темпи оновлення поколінь комп’ютерного hardware та версій software є надзвичайно високими й постійно зростають.

У контексті розглядуваної задачі доцільно наголосити, що розроблення технічного забезпечення не може розглядатися виключно як завершальний етап реалізації системної моделі створення нового високоефективного засобу протипожежного захисту. Навпаки, цей процес тісно інтегрований із розробленням програмного забезпечення та фактично формує фінальну ланку класичного підходу до побудови керованих технічних систем.

Що стосується моделювання пожежного ствола, то правильний вибір його конструктивних рішень і параметрів є одним із ключових чинників, який дозволяє суттєво підвищити тактико-технічні характеристики пристрою [219, 220]. У підсумку це створює передумови для більш повного вирішення завдання розроблення сучасних зразків пожежної та аварійно-рятувальної техніки нового покоління [221].

2.4. Врахування особливостей руху вогнегасних струменів на виході із насадки

Гідравлічна насадка в більшості випадків є короткою трубою або каналом для випуску рідини в атмосферу або перетікання рідини з одного резервуара в інший, теж заповнений рідиною. Як правило, довжина насадки, при якій можливе заповнення всього перерізу каналу і досягається максимальна пропускна здатність для зовнішніх і внутрішніх циліндричних насадок, складає 3–4 діаметра вихідного отвору. При проектуванні чи виборі конічних насадок, що звужуються і розходяться, слід враховувати поняття оптимальної у сенсі витрати конусності. Найбільшою пропускною здатністю володіє коноїдальна насада, поздовжній перетин якої виконується за формою струменя, що витікає з отвору. Пожежні насадки мають суттєві відмінності від простих гідравлічних насадок, оскільки мають специфічну сферу застосування. Важливою характеристикою насадки є її здатність формувати потрібні параметри струменя на його виході, не погіршуючи при цьому «енергетичні» показники струменя. Пожежні стволи, що служать для формування і направлення суцільного струменя води до вогнища пожежі, застосовуються для комплектації пожежних автомобілів, мотопомп та внутрішніх пожежних кранів, що встановлюються в житлових, громадських, адміністративних, промислових будівлях і спорудах, а також інших засобів протипожежного захисту [133, 134, 222].

Для отримання далекобійних струменів з великою ударною силою в протипожежній техніці використовують ручні та лафетні стволи із різними насадками [139, 140]. В більшості випадків для ручних вітчизняних стволів, що формують осесиметричніструмені, діаметри насадок складають 13, 16, 19, 22, 25 мм, лафетних - 28, 32, 38, 50, 65 мм.

Типи рідин, що витікають із насадок. У насадці потенційна енергія тиску перетворюється в кінетичну енергію швидкості. Природньо, щоб струмінь досяг великої швидкості, діаметр вихідного отвору насадки повинен бути менший відповідного діаметра пожежного ствола.

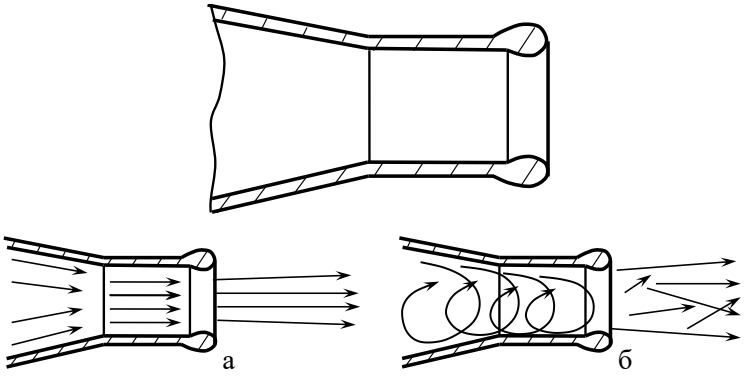


Рис. 2.17 – Типи підведення рідини (води) до насадки

Конічна частина насадки з кутом конусності 13^0 переходить в циліндричну, довжина якої в деяких ручних пожежних стволах приблизно дорівнює розміру одного діаметра, а в лафетних стволах - 2/3 - 3/4 діаметра вихідного перерізу насадки. На кінці циліндричної частини насадки робиться бортик для захисту вихідної кромки від можливих механічних пошкоджень, які призводять до погіршення якості струменя. Конічна частина насадки дозволяє знизити втрати енергії при переході п'єзометричного напору в швидкісний, а циліндрична частина служить для зменшення стиснення перерізу струменя при виході з насадки. На якість струменя суттєвий вплив чинять також умови підведення води до насадки. У випадку, коли потрібно досягати максимальної дальності струменя треба, щоб рідина підходила до насадки прямолінійними струменями (рис. 2.17, а), так як обертання потоку

навколо своєї осі і виникнення відцентрових сил сприяють передчасному роздробленню струменя (рис. 2.17, б).

Для пожежних стволів і насадок характерним є використання різних рідин. Вибір типу рідини визначається видом виконуваних аварійно-рятувальних чи протипожежних робіт, але в загальному випадку може бути зведений до вибору з трьох різних груп, що перетинаються:

- не ньютонівських [223] і ньютонівських рідин [224];
- рідин з полімерними добавками [225, 226];
- рідин з абразивними добавками [227-229].

Визначення параметрів, загальних для всіх типів насадок. Отримання безрозмірних критеріїв для однорідної та аномально в'язкої рідин. Розглянемо випадок, коли рідина однорідна, тобто ньютонівська. Аналіз руху рідини (струменя) на виході з насадки можна провести на основі теорії розмірностей [230, 231]. Такий підхід дає змогу встановити узагальнені закономірності формування струменя на виході з насадки та отримати безрозмірні критерії, що характеризують співвідношення між інерційними, в’язкісними, гравітаційними й аеродинамічними силами, які визначають процес руху рідини. Сила F, з якою струмінь взаємодіє з перешкодою або осередком пожежі, залежить від середнього тиску струменя $P_{\text{сер}}$, визначеного в її перерізі площею S. Також сила F залежить від швидкості струменя на виході з насадки u_0 діаметром d_0, густини повітря $\rho_{\text{пов}}$ і густини рідини $\rho_{\text{р}}$, 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. Отже, для випадку, коли рідина однорідна, маємо

$$F = f\left(P_{\text{сер}}, u_0, \mu, \rho_{\text{р}}, \rho_{\text{пов}}, S, d_0, g\right), \tag{2.11}$$

де u_0, $\rho_{\text{р}}$ та d_0 є величинами, які мають незалежні розмірності. Тому, використовуючи аналіз розмірностей, запишемо

$$\frac{F}{\rho_{\text{р}}^{x} u_0^{y} d_0^{z}} = \Phi\left[\begin{array}{c} \dfrac{P_{\text{сер}}}{\rho_{\text{р}}^{x1} u_0^{y1} d_0^{z1}}, \\ \dfrac{\mu}{\rho_{\text{р}}^{x2} u_0^{y2} d_0^{z2}}, \\ \dfrac{g}{\rho_{\text{р}}^{x3} u_0^{y3} d_0^{z3}}, \\ \dfrac{\rho_{\text{р}}}{\rho_{\text{р}}^{x4} u_0^{y4} d_0^{z4}}, \\ \dfrac{S}{\rho_{\text{р}}^{x5} u_0^{y5} d_0^{z5}} \end{array}\right], \qquad (2.12)$$

де x, y та z із відповідними індексами є показниками ступенів, які необхідно визначити з умови рівності розмірностей чисельника і знаменника.

Знайдемо x, y та z. Знаючи розмірності величин F, $\rho_{\text{р}}$, u_0 і d_0, для того, щоб комплекс $\frac{F}{\rho_{\text{р}}^{x} u_0^{y} d_0^{z}}$ був безрозмірним, потрібно, щоб виконувалася рівність

$$\frac{M}{c} = \frac{H^{y} c^{2y} M^{2z}}{c^{x} M^{4y} c^{z}} .$$

У відповідності з цією умовою складемо наступну систему рівнянь для визначення x, y та z:

$$\begin{cases} x = 1; \\ y + z - 3x = 1; \\ -y = -2, \end{cases}$$

звідки $x = 1$, $y = z = 2$.

Безрозмірний комплекс в лівій частині рівняння (2.12) запишеться у вигляді

$$\Pi = \frac{F}{\rho_{\text{р}}\, u_0^2 d_0^2} .$$

У результаті нескладних математичних перетворень одержуємо й інші параметри $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5$ із виразу (2.11).

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

По суті Π_1 – критерій Ейлера, який характеризує подібність струменів, де домінуючим 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 [232], а саме Π_4 вказує на вплив густинних властивостей рідини, а Π_5 – на зміну геометричних параметрів струменя в залежності від відстані від насадки.

Таким чином, дані критерії по суті характеризують силу взаємодії струменя с перешкодою, яка в безрозмірному вигляді виражається співвідношенням, де сила дії струменя віднесена до геометричних параметрів ствола.

Розглянемо випадок, коли рідина є аномально в'язкою, наприклад відповідає закону Оствальда-де Віля. Рівняння (2.11) набуде вигляду

$$F = f\left(P_{\text{сер}}, u_0, \mu, \rho_{\text{р}}, \rho_{\text{пов}}, S, d_0, g, k, \dot{\gamma}\right), \tag{2.13}$$

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

Використовуючи той самий підхід, що і для ньютонівських рідин, знайдемо для нашого випадку систему критеріїв. Природно, якщо, u_0 , $\rho_{\text{р}}$ та d_0 є величинами, які мають незалежні розмірності, тоді новими будуть тільки два критерії, позначимо їх Π_6 та Π_7.

Формально вони можуть бути подані у вигляді

$$\Pi_6 = \frac{k \cdot u_0^n}{\rho \cdot d_0^{n+1}}, \tag{2.14}$$

$$\Pi_7 = \frac{\dot{\gamma} \cdot d_0}{u_0}. \tag{2.15}$$

Детальний аналіз отриманих критеріїв (2.14) і (2.15), можливо, у подальшому дасть право стверджувати, що саме за їх допомогою можна

пояснювати фізичні особливості отримання суцільних і розпорошених водяних вогнегасних струменів.

Таким чином, використовуючи π–теорему, вдалося зменшити число змінних, від яких залежить шукана величина (2.11), отримавши безрозмірні комплекси. По суті, вони визначають зв'язки між силою взаємодії струменя і геометричними параметрами насадок, реологічними властивостями рідини, співвідношенням фізичних властивостей середовища (рідина-повітря) тощо.

Важливим моментом може служити припущення про те, що саме вирази (2.14) і (2.15) можуть наблизити отримання рішення задачі якісного управління характером водяних вогнегасних струменів, переходом від суцільного до розпиленого струменя.

2.5. Особливості застосування різних вогнегасних струменів на виході із насадки

Традиційно в теорії пожежної безпеки виходять із того, що виникнення й розвиток горіння можливі лише за одночасної присутності горючої речовини, джерела теплової енергії та окисного середовища у відповідних пропорціях. Усунення або порушення хоча б одного з цих елементів унеможливлює займання або призводить до припинення процесу горіння. Поряд із такими способами впливу, як ізоляція пального, зменшення концентрації реагентів, охолодження осередку пожежі чи хімічне гальмування реакцій, результативність пожежогасіння значною мірою визначається правильною оцінкою теплової потужності пожежі. Саме від цього залежить обґрунтований вибір виду та необхідного обсягу вогнегасної речовини[198].

У більшості практичних ситуацій вогнегасний агент необхідно доставити безпосередньо до осередку пожежі. Зазвичай це здійснюється у вигляді спрямованого струменя або розпиленої хмари речовини. Така форма подачі дозволяє ефективно впливати на зону горіння.

Досягнення потрібного результату можливе лише за умови правильного налаштування гідравлічної системи пожежного автомобіля. Параметри її роботи підбирають з урахуванням конкретного місця гасіння. Також беруть до уваги поточний момент розвитку пожежі. У результаті струмінь набуває саме тих характеристик, які є необхідними для успішного припинення горіння [22, 198].

Одним із варіантів, що дозволяє змоделювати теплові процеси в об'ємі, що охолоджується в результаті гасіння, є використання типового підходу [198], що базується на розбитті загальної зони на комірки, які окрім інших характеристик мають й теплові $Q_x^{\text{вх}}(t)$, $Q_y^{\text{вх}}(t)$, $Q_z^{\text{вх}}(t)$. У певний момент часу t кожен елементарний об’єм системи характеризується підсумковим тепловим балансом, що відображає кількість енергії, отриманої або втраченої ним. Реалізація необхідного режиму забезпечується вибором відповідної витрати вогнегасної речовини. Не менш важливим чинником при цьому є характер її розпилення, зокрема розмір частинок.

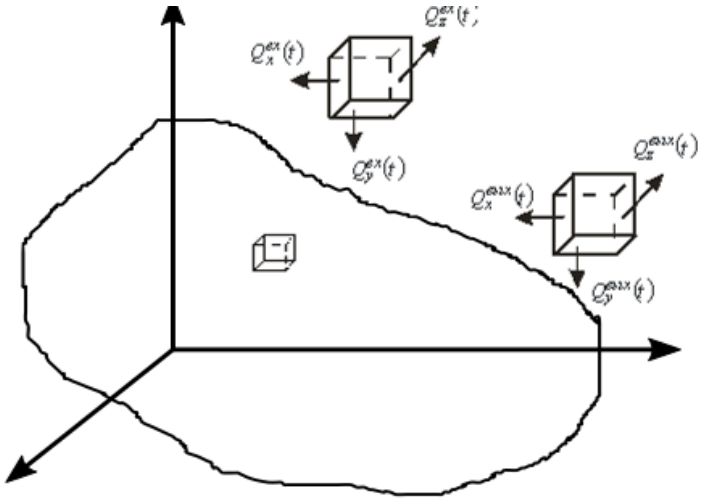


Рис. 2.18 – Область гасіння та розрахункова комірка [198]

Застосування води як базового компонента вогнегасних струменів зумовлене її доступністю та невисокою вартістю. Вирішальну роль при цьому відіграє значна кількість тепла, яку вода поглинає під час переходу в пароподібний стан. Саме ця властивість забезпечує ефективне охолодження зони горіння.

Характеристики водяного вогнегасного струменя, зокрема його дальність, витрата, ефективна відстань подачі та ступінь розпилення, визначаються конструкцією та режимом роботи системи формування струменя. Ключовими елементами такої системи є пожежний ствол або спеціальна насадка. , які безпосередньо впливають на кінцеві параметри подачі води.

Як правило, гідравлічне струминне обладнання, що працює з більш високими тисками, характеризується меншими значеннями витрат рідини і більшими значеннями швидкостей струменів на виході формувального пристрою [233] (рис. 2.19).

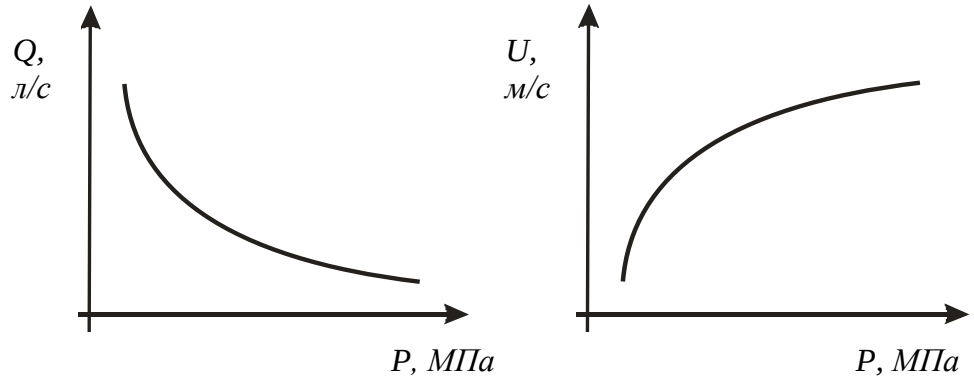


Рис. 2.19 – Характерні залежності гідравлічного струминного обладнання

При застосуванні протипожежної та аварійно-рятувальної техніки у більшості випадків мова йде про тиск $p = 0{,}2 \ldots 4{,}0$ МПа, об'ємні витрати рідини $Q = V/t = 0{,}1 \ldots 100$ л/с (V – об'єм рідини через живий переріз потоку), та швидкість струменя на вильоті із формувального пристрою $U = 10 \ldots 400$ м/с.

Отримання водяних крапель потрібного розміру є результатом складної взаємодії багатьох фізичних чинників, серед яких умови руху рідини, конструктивні особливості обладнання та режим його роботи. Керування цим процесом можливе, зокрема, шляхом застосування спеціальних методів формування нестаціонарних, тобто пульсуючих, водяних потоків, що можуть бути адаптовані до завдань пожежогасіння.

Пульсуючий режим функціонування гідравлічного струминного оснащення вирізняється низкою переваг у порівнянні з традиційною безперервною подачею. Реалізація таких коливальних режимів зазвичай досягається відносно простими інженерними рішеннями. У крайніх випадках пульсації можуть призводити до формування імпульсного потоку з періодичним розривом суцільності струменя. При цьому як робоче середовище, як правило, використовується звичайна вода, що не потребує застосування дорогих або спеціальних рідин.

Важливим напрямом є також створення технічних засобів, здатних формувати вогнегасні струмені з різноманітними характеристиками та забезпечувати швидке перемикання між режимами подачі. Дрібнорозпилені водяні потоки можуть використовуватися як захисні водяні екрани під час раптових викидів полум'я, для інтенсивного охолодження повітря в приміщеннях, а також для зменшення концентрації диму та продуктів горіння, небезпечних для органів зору і дихання.

Висновки до розділу 2

1. На ділянках нестабілізованого потоку у пожежних стволах, насадках та установках водяного пожежогасіння відбувається деформація епюри швидкостей дією сил інерції при конвективному прискоренні, відповідно градієнт тиску на початковій ділянці є відмінним від константи $\frac{\partial P}{\partial x} \neq const.$

2. Встановлено, що втрати енергії потоку в стволах, насадках та установках водяного пожежогасіння забезпечуються як дією сил інерції, так і силами в'язкого тертя, що дозволяє використовувати методику розрахунку гідродинамічної початкової ділянки.

3. Запропоновано виділити п'ять основних ділянок рідинного вогнегасного струменя: ядро струменя; початкову ділянку, на якій ще не

спостерігаються поверхневі вихори рідини; основну ділянку струменя; ділянку з втратою стійкості поверхні; ділянку повного розпаду струменя.

4. Створена параметрична збірна 3D модель ствола РС-50 з можливістю варіювання її характеристиками. При стандартних характеристиках функціонування ствола (витраті 3,7 л/с, тиску 0,4 МПа) довжина внутрішнього каналу виявилася більшою за довжину гідродинамічної початкової ділянки від вхідного отвору ствола (183 мм); конусність 1:13,5 (4,24°) не допускала відривних течій та великих зон завихрень чи пустот; важливим чинником гідравлічних втрат була шорсткість поверхні струминоформувального каналу, визначальним елементом для значень швидкості струменя на виході та довжини гідродинамічної початкової ділянки від вихідного отвору ствола була зона різкого звуження на виході ствола. Подібні дослідження можуть бути проведені для існуючих та нових конструкцій стволів й насадок.

5. Встановлені критерії, що характеризують силу взаємодії струменя вогнегасної речовини с перешкодою, яка в безрозмірному вигляді виражається співвідношенням, де сила дії струменя віднесена до геометричних параметрів пожежного ствола. Новими критеріями, які пропонується застосовувати щодо характеристики сили взаємодії струменя с перешкодою для рідинних осесиметричних вогнегасних струменів є відношення густин повітря й вогнегасної рідини $\rho_{\text{пов}}/\rho_{\text{р}}$ та відношення площі перерізу струменя до квадрату вихідного діаметра пожежного ствола S/d_0^2 .

6. Для випадку застосування поверхнево-активних речовин отримані критерії, що пов’язують консистентну сталу, початкову швидкість струменя, густину рідини та вихідний діаметр ствола. По суті, вони визначають зв'язки між силою взаємодії струменя і геометричними параметрами насадок, реологічними властивостями рідини, співвідношенням фізичних властивостей середовища рідина–повітря.

РОЗДІЛ 3
АНА ЛІЗ ЧИННИКІВ ВПЛИВУ НА ПРОЦЕС ФОРМУВАННЯ СТРУМЕНІВ

Результати аналізу систем струминоформування дають змогу стверджувати про визначальність у процесі отримання струменів із потрібними параметрами найважливішого елемента – пожежного ствола або насадки. Слід розрізняти дві окремі складові струминоформування. Перша – усі технічні засоби, що безпосередньо забезпечують генерування водяних струменів у системах протипожежного захисту. Зазвичай це ємність з рідиною, насос, система рідинопідведення, опційно генератори пульсацій, блок відбору потужності, а завершальним елементом є ствол або насадка. Друга складова – навколишнє середовище, що так чи інакше суттєво впливає на параметри струменя, однак у ній керування струменем, на відміну від першої (технічної) частини зводиться до мінімуму. Така ситуація у струминоформуванні, коли кінцевий елемент системи – пожежний ствол має найсуттєвіший вплив на параметри створюваного струменя, породжує ряд особливостей. Перевагою є можливість зосередитись на конструктивних особливостях одного блоку системи, а саме на стволі чи насадці, для отримання можливості ефективного керування струменем.

3.1. Пожежні стволи та насадки із круглим поперечним перетином внутрішнього струминоформувального каналу

3.1.1. Основні характеристики пожежних стволів та насадок із круглим поперечним перетином

Питання плину рідини в пожежному стволі (його каналі) у першу чергу цікавлять фахівців в області проведення протипожежних робіт з тих позицій, щоб одержувати найбільш ефективні струмені безпосередньо в місці їх

використання, оскільки вони набувають істотних змін, наприклад диспергуються або розпорошуються, на шляху від джерела подачі рідини до вогнища пожежі [234].

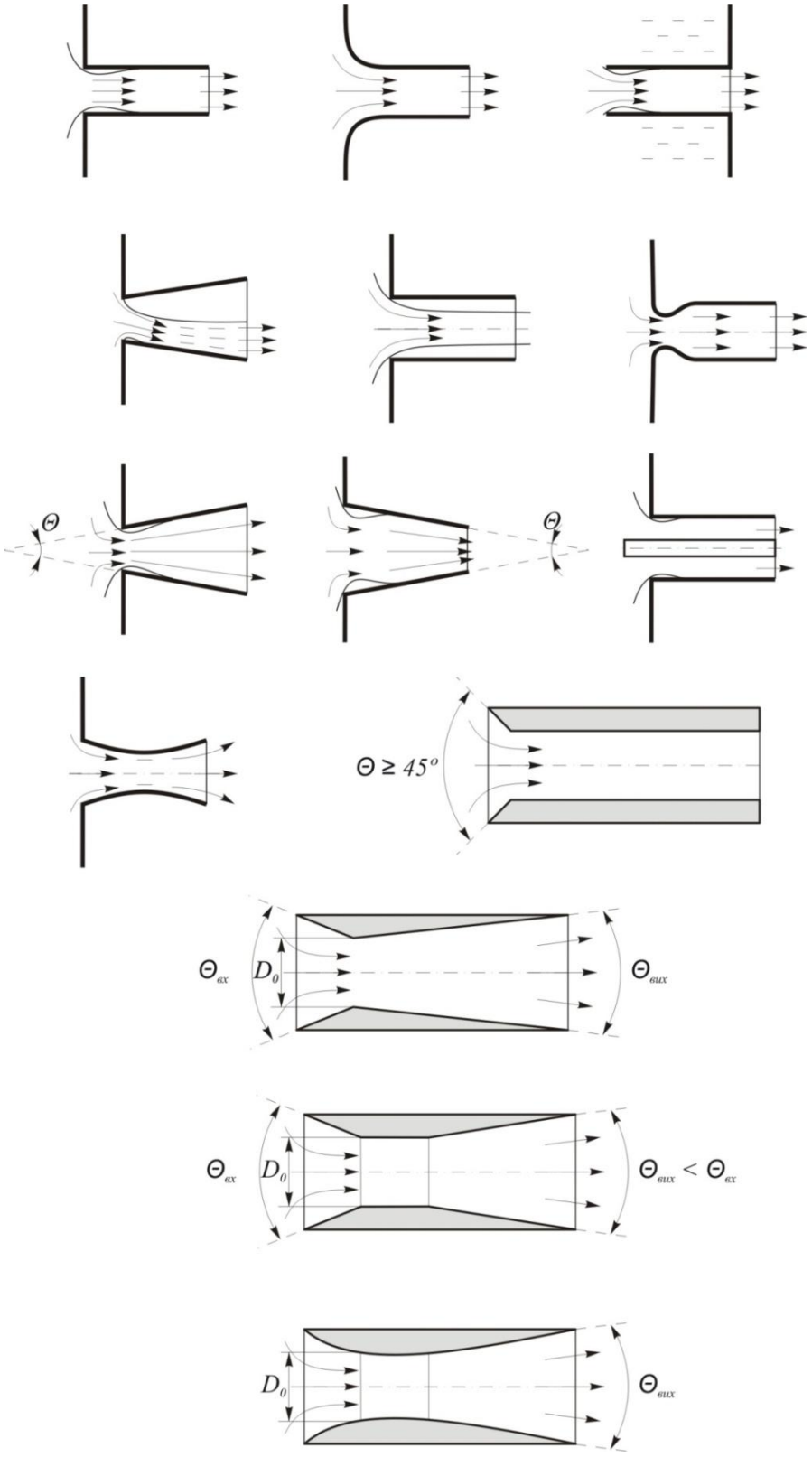


Рис. 3.1 – Схематичний вигляд різних типів насадок із круглим поперечним перетином внутрішнього струминоформувального каналу

Вище наведено приклади основних типів насадок в системах формування струменів, які досліджувалися у даній роботі (рис. 3.1) [235], 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 (1.1), тобто

$$\mu = f(Re, Fr, We, Z/D) \ , \tag{3.1}$$

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

У таблиці 3.1 надані вирази для визначення коефіцієнта витрати для циліндричних насадок різної довжини для різних діапазонів чисел Рейнольдса [71, 87].

Таблиця 3.1

Визначення коефіцієнта витрати

Z/D	Re	Коефіцієнт μ
2…5	$3 \le Re \le 30$	$\dfrac{\mathrm{Re}}{25,2+64\,Z/D}$
2…5	$30 \le Re \le 50$	$\dfrac{1}{(73,6/\mathrm{Re})(Z/D)+5,0(Z/D)^{-3}}$
1…1,5	$16 \le Re \le 100$	$\dfrac{1}{1,44+(72/\mathrm{Re})(Z/D)}$
1…1,5	$10^2 \le Re \le 10^3$	$\dfrac{1}{1,29+(72/\mathrm{Re})(Z/D)}$
4	$8\cdot 10^3 \le Re \le 5\cdot 10^4$	$\dfrac{1}{\sqrt{1,5+\left[1/(1,8Lg\,\mathrm{Re}-1,5)^2\right]\left(\dfrac{Z}{D}-4\right)}}$
1…5	$Re \ge 10^5$	$1-0,185\cdot\left(\dfrac{Z}{D}\right)^{0,8}\dfrac{1}{Re^{0,2}}$

Для пожежних стволів, враховуючи режими їх експлуатації, важливим буде лише випадок, коли $Re \geq 10^5$. Встановлено [87], що значення коефіцієнта витрати насадки μ пожежного ствола мають максимум, який з подальшим збільшенням числа Re зникає, і при $Re \geq 10^5$ значення коефіцієнта μ стабілізуються в межах 0,97–0,98.

3.1.2. Особливості плину в'язкої рідини в насадках

Широке використання насадок у різних технологічних процесах (рис. 1.4), зокрема при формуванні струменів водної вогнегасної рідини, базується на детальному вивченні гідродинаміки потоку в них [27, 236].

Результати проектування насадок, залежно від їх функціонування, суттєво позначаються на характеристиках отримуваних струменів, фактично їх визначають. Вказане перед усім можна віднести до неньютонівских рідин, основними параметрами потоку яких для насадок є довжина та її діаметр, продуктивність (витрата) і перепад тиску на вході/виході. Ці величини зазвичай розглядаються як функції в'язкості, температури, густини рідини.

Однак численні досліди показують, що подібний розрахунок не характеризує повністю «роботу» насадки, як обладнання, що формує струмінь. Особливо це стосується неньютонівских рідин, тому що для деяких з них характерні такі ефекти як «розбухання», еластична турбулентність тощо. Явище розбухання струменя описане у роботах [237, 238], однак теоретичне обґрунтування даного явища й дотепер не зовсім зрозуміле. Окрім того, найбільше дані ефекти проявляються у високов'язкісних речовинах та за умов підвищеної температури. Такі ефекти можливі у разі, якщо насадка використовується не для створення водяної охолоджувальної плівки, а для формування «захисних» або «відгороджувальних» плівок, призначених для теплового захисту чи запобігання доступу окисника до захищуваної поверхні. Для випадків застосування інших речовин із аномалією в'язкості ефект проявляється, проте є менш вираженим. Вайссенберг [239] показав, що за

певних умов у високов'язких середовищах можуть виникати не тільки поздовжні, але й нормальні до напрямку руху середовища напруження. Ним був виявлений ефект поперечної в'язкості (ефект Вайссенберга). Подальші дослідження показали, що даний ефект має місце не тільки в розчинах високополімерів, але й у будь–яких дисперсних системах, що володіють певною пружністю форми. У зв'язку з тим, що ці властивості в значній мірі визначаються часом релаксації $T_{\text{р}} = {}^{\mu}/_{E}$ (μ – динамічна в'язкість, E – модуль пружності), то, зрозуміло, ступінь прояву ефекта Вайссенберга визначається величиною $T_{\text{р}}$.

Застосовуючи Пі–теорему можна зробити висновок, що в загальному вигляді для насадок можна використовувати критеріальну залежність у вигляді

$$\varphi = f(Ho, Fr, Eu, Re^{*}) = 0 \ , \qquad (3.2)$$

де окрім критеріїв гомохромності Ho, Фруда Fr й Эйлера Eu, присутній критерій Рейнольдса Re^{*}(для рідин Оствальда-де Віля), обумовлений залежністю

$$Re^{*} = \frac{\rho U_{\text{сер}}^{2-n}\sigma^{3}}{K\mu e} \ .$$

Поправка Гарріса [240] до узагальненого числа Рейнольдса [241, 242], хоч і не безпосередньо, але враховує явище еластичності, пов'язане з ефектом поперечної в'язкості.

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 буде описати, виходячи з уявлень про гідродинамічну початкову ділянку [197, 141], а розміри насадки визначати, враховуючи так само й довжину гідродинамічної початкової ділянки $Z_{\text{п.д.}}$ [243-245, 247, 248], яка в загальному випадку може

бути функцією не тільки числа Рейнольдса Re, але й числа Вайссенберга Wi [239].

Слід зазначити, що на довжину початкової ділянки, як і на довжину насадки можуть впливати різні фактори. У прикладному плані інтерес складають такі фактори як магнітне поле й пульсації стінок насадки.

Для щілинних насадок наведені закономірності проявляються більш складно, що пояснюється особливостями геометрії каналу та специфікою формування плоского струменя. На відміну від осесиметричних насадок, у щілинних конструкціях потік набуває виражено неоднорідного характеру: виникають значні поперечні градієнти швидкості, локальні перепади тиску та нерівномірний розподіл витрати по довжині вихідної щілини. Унаслідок цього можуть формуватися вторинні течії, циркуляційні області та локальні турбулентні зони, що безпосередньо впливають на структуру та стабільність сформованого струменя.

Однією з основних вимог до щілинної насадки є забезпечення максимально рівномірного розподілу рідини вздовж вихідного отвору. Порушення однорідності швидкісного поля призводить до нерівномірного витікання рідини, локального перевантаження окремих ділянок струменя та зниження ефективності використання енергії потоку. Саме тому під час проектування таких насадок необхідно враховувати не тільки загальні гідравлічні характеристики, а й закономірності локального розподілу швидкостей та тиску в межах щілинного каналу.

Для неньютонівських рідин зазначені ефекти стають ще більш вираженими через залежність в’язкості від швидкості деформації та наявність релаксаційних процесів у потоці. У процесі руху через щілинний канал можуть виникати додаткові нормальні напруження, які викликають деформацію профілю швидкостей, розвиток еластичних нестійкостей і порушення симетрії струменя. Особливо це характерно для середовищ із вираженими в’язкопружними властивостями, де релаксаційні процеси істотно впливають на характер течії у вихідній частині насадки.

Суттєвий вплив на характер течії у щілинній насадці справляє процес формування та розвитку пристінних шарів уздовж вузьких поверхонь щілинного каналу. У міру руху рідини від вхідної частини насадки до вихідної відбувається поступове зростання товщини прикордонного шару, що виникає внаслідок в’язкої взаємодії потоку зі стінками каналу. Через це швидкість рідини поблизу поверхонь щілини зменшується, тоді як у центральній частині каналу потік зберігає більшу інтенсивність руху. Подібна нерівномірність швидкісного профілю призводить до перерозподілу витрати по перерізу щілини та створює умови для виникнення локальних зон із підвищеним або зниженим імпульсом потоку.

У щілинних насадках, де відстань між поверхнями є малою, розвиток пристінних шарів відбувається особливо інтенсивно. У певний момент вони можуть почати взаємодіяти між собою, істотно змінюючи структуру течії в усьому перерізі каналу. Це супроводжується деформацією швидкісного профілю, зміщенням максимуму швидкості до центральної частини потоку та формуванням зон локального гальмування поблизу стінок. Унаслідок цього на виході зі щілини виникає нерівномірний розподіл швидкостей уздовж її довжини, що негативно впливає на однорідність сформованого струменя.

Особливо помітно зазначені явища проявляються у випадках, коли довжина щілинного каналу є недостатньою для повної гідродинамічної стабілізації течії. За таких умов потік не встигає перейти у сформований режим руху, а вихідний профіль швидкостей залишається залежним від умов входу, локальних прискорень та геометричних особливостей насадки. Це може спричиняти появу асиметрії потоку, локальних циркуляційних зон та вторинних течій, які додатково підсилюють неоднорідність розподілу витрати вздовж щілини.

Наявність подібних гідродинамічних ефектів призводить до того, що окремі ділянки щілинної насадки працюють у різних режимах. У частинах щілини з підвищеними локальними швидкостями спостерігається збільшення витрати та інтенсивності струменя, тоді як у пристінних або периферійних

областях можливе зниження швидкості руху рідини. У результаті сформований струмінь втрачає гідродинамічну однорідність, що ускладнює забезпечення рівномірної подачі рідини по всій довжині щілини та знижує ефективність роботи насадки загалом.

З позицій ексергетичного аналізу подібна нерівномірність може розглядатися як наслідок деструкції впорядкованого руху рідини. У такому випадку частина механічної енергії витрачається не на формування однорідного струменя, а на розвиток вихрових структур, вторинних течій та турбулентного перемішування. Тому підвищення ефективності щілинних насадок пов’язується зі зменшенням інтенсивності інерційних і в’язкісних взаємодій, які спричиняють порушення гідродинамічної однорідності потоку.

Для щілинних насадок, призначених для подачі води та водних розчинів із невисоким рівнем аномалії в’язкості, характерним є переважний вплив класичних гідродинамічних процесів, пов’язаних із розподілом швидкостей, втратами напору та розвитком пристінних шарів. У таких рідинах в’язкопружні ефекти проявляються значно слабше порівняно з високов’язкими або полімерними середовищами, тому структура потоку визначається переважно інерційними та в’язкісними взаємодіями. Водночас навіть незначна аномалія в’язкості може впливати на характер течії у вузькому щілинному каналі, змінюючи умови формування прикордонного шару та рівномірність розподілу витрати вздовж щілини. Для таких насадок особливо важливим є забезпечення стабільного та однорідного швидкісного поля на виході, оскільки локальні нерівномірності течії можуть призводити до деформації плоского струменя, утворення зон із підвищеною або зниженою інтенсивністю подачі рідини та зростання локальних гідравлічних втрат. Тому при проектуванні щілинних насадок для води та слабкоаномальних рідин основна увага приділяється оптимізації геометрії каналу, зменшенню впливу вторинних течій і забезпеченню рівномірного розподілу потоку по всій довжині вихідної щілини.

3.2. Пожежні стволи та насадки з некруглою формою поперечного перерізу внутрішнього струминоформувального каналу

3.2.1. Використання стволів, насадок і зрошувачів

Стволи й насадки, як правило, є кінцевим елементом системи подачі вогнегасної речовини до вогнища пожежі або охолоджувану зону й відрізняються від зрошувачів можливістю їх використання «у потрібний час у потрібному місці». Зрошувачі (рис. 3.2) є кінцевим елементом установок водяного пожежогасіння й, у більшості випадків, установлюються стаціонарно й не можуть бути перенесені з місця на місце. У щілинного зрошувача формування водяного потоку здійснюється через щілинний отвір, порожнина якого може перебувати паралельно, перпендикулярно або під будь-яким кутом до порожнини осі зрошувача. Ще однією важливою відмінністю використання пожежних стволів і насадок від зрошувачів є те, що вогнегасна речовина подається або вертикально вгору, або під кутом до горизонту, а у випадку використання зрошувачів, – в основному, зверху вниз. Найважливішою умовою ефективного використання щілинних стволів, насадок і зрошувачів є одержання з їхньою допомогою й доставки в зону горіння або зону теплового захисту тонкорозпиленої рідини, передусім води (діаметр крапель до 150 мкм). При цьому, висока ефективність гасіння обумовлюється підвищеним охолоджувальним ефектом за рахунок високої питомої площі поверхонь крапель, рівномірної дії води безпосередньо на зону полуменевого горіння, зниженням концентрації кисню й розведення горючих парів у зоні горіння в результаті утворення пари. Не слід забувати про захисний ефект завіс із тонкорорпорошеної води від впливу променистого тепла на людей, огороджувальних конструкцій, а також про поглинання й видалення токсичних газів, парів і диму.

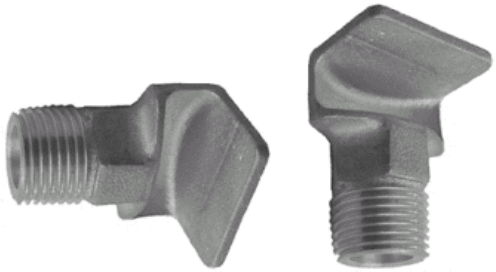


Рис. 3.2 – Зрошувач дренчерний для створення водяної завіси

Використання тонкорозпорошеної води досить ускладнене через потребу мати необхідне обладнання для її доставки в зону горіння. Подати тонкорозпорошену воду на прийнятну відстань, тобто надати їй кінетичну енергію, достатню для потрапляння до захищуваної зони й для подолання бар'єра конвекційних потоків більшості пожеж, досить складно досягти, якщо розмір крапель не перевищує 100 мкм.

Серед насадок для створення захисних водяних завіс в Україні найбільше поширення одержала щілинна насадка-розпилювач РВ–12 (рис. 3.3), призначена для одержання розпорошеного вертикального струменя. Насадку-розпилювач установлюють на ручні пожежні стволи РС–70 замість стандартного сприску. Витрата води становить не більше 12 л/с, при цьому довжина струменя, тобто вертикальна завіса складає до 8 м, напір перед розпилювачем – 0,6 МПа. Одержувана водяна завіса має площу близько 100 $м^2$, а її товщина становить до 1,2 м.



Рис. 3.3 – Щілинна насадка-розпилювач РВ–12 (на стволі РС–70)

Водяна завіса відіграє роль бар'єра тепловому потоку (випромінюванню), у такий спосіб дозволяє перебувати протипожежній техніці й обслуговуючому персоналу в безпосередній близькості від вогнища пожежі. Іншим важливим напрямком використання насадки РВ–12 є ліквідація надзвичайних ситуацій, пов'язаних з розливом сильнодіючих отруйних речовин або викидом їх парів. У випадку ліквідації аварійних ситуацій для зменшення швидкості випаровування, що розлився при аварії аміаку або хлору, найбільш доступний спосіб, що дозволяє знизити швидкість випаровування вказаних рідинних сильнодіючих отруйних речовин, – розведення їх дрібнодисперсним або компактним струменем води, а також розчинами нейтралізуючих речовин. Дрібнодисперсний струмінь, що накриває хмару випарів, забезпечує як нейтралізацію самої рідини, так і абсорбцію й нейтралізацію парів сильнодіючих отруйних речовин.

3.2.2. Використання щілинних насадок

Розглянемо різні профілі внутрішніх каналів пожежних стволів і насадок, як струминоформувальних пристроїв некруглого перерізу, а також процесів, що відбуваються в них при протіканні рідин. Особливістю більшості пристроїв, які стоять на озброєнні пожежно-рятувальних підрозділів ОРС ЦЗ України, є простота їх конструкції та форма внутрішньої струминоформувальної порожнини, яка в поперечному перерізі має форму круга. Оскільки для більшості завдань, які виникають у процесі професійної діяльності пожежників, потрібні «прості» струмені, що забезпечують подачу вогнегасної речовини в зону горіння, немає необхідності в ускладненні конструкцій струминоформувальних пристроїв. Однак, сучасні дослідження в області створення високоефективних засобів пожежогасіння орієнтуються на реалізацію можливостей одержання струменів з особливими унікальними властивостями, як-от тонкорозпорошених дрібнодисперсних хмар безпосередньо в зоні горіння [250, 251] (струменів туману), загороджувальних

теплових бар'єрів і перегородок, охолоджувальних водяних плівок тощо [252, 253, 361]. У такому випадку виникає необхідність зміни конструкції струминоформувальних пристроїв, а саме забезпечення можливості одержання так званих «пласких струменів».

Використання у практиці пожежогасіння одержав принцип створення умов вогне- і теплоперепони водяними завісами, що перешкоджають поширенню пожежі через потік рідини або попередженню прогріву технологічного обладнання до гранично припустимих температур. Завіси забезпечуються використанням пристроїв для випуску й розподілу вогнегасної речовини – пожежних стволів, насадок або зрошувачів, більшість із яких щілинного типу. Груповий захист особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ОРС ЦЗ України й техніки, що працюють на ділянках сильної теплової радіації, забезпечується водяними завісами (екранами), створюваними за допомогою розпилювачів турбінного й віялового типу, а індивідуальна – стволами-розпилювачами.

Існує необхідність аналізу технічних особливостей, принципів застосування й ефективності різних пристроїв зазначеного класу, головним завданням якого є формулювання умов найбільш обґрунтованого застосування спеціальних пристроїв пожежогасіння в конкретних умовах роботи підрозділів ДСНС України. Наступним кроком повинна бути розробка принципів створення технічних пристроїв, здатних ефективно вирішувати завдання створення теплових бар'єрів і захисних водяних завіс.

Серед конструкцій струминоформувальних пристроїв, що мають некруглий вихідний поперечний переріз розглянемо плоскощілинні насадки (рис. 3.4). Вони різняться конструктивними особливостями, областю застосування й режимами їх експлуатації.



а *б*

Рис. 3.4 – Приклади насадок для створення радіальних водяних струменів із пласким перерізом: а – щілинна насадка (автор – Ю. Ю. Дендаренко); б – насадка-розпилювач РВ-12

В Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (нині НУЦЗ України) було розроблено і випробувано ряд насадок (рис. 3.5), вихідні отвори яких відрізнялися від традиційних – круглих. Результати досліджень підтвердили необхідність подальшого вивчення залежності характеристик вогнегасних струменів від форми внутрішніх профілів струминоформувальних пристроїв.

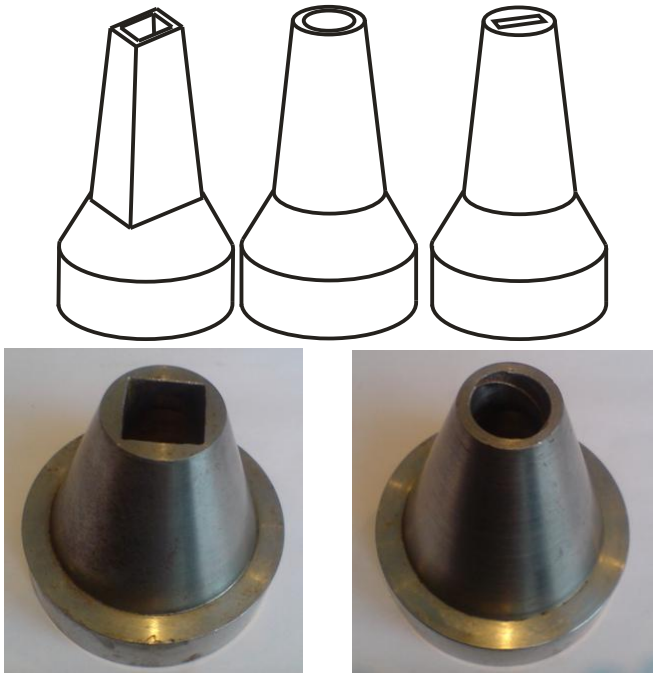


Рис. 3.5 – Приклади насадок із квадратним, круглогвинтовим і щілинним перерізами (автор – П. В. Макаревський)

Для випадку, коли використовувалася насадка із щілинним отвором, у результаті ряду проведених експериментів, було відзначене одержання водяної завіси з явною нерівномірністю товщини захисної водяної перепони. Це вказує на необхідність детального розгляду питань створення пристроїв із гарантованим забезпеченням рівномірної витрати струменя по всій ширині вихідного отвору-щілини.

Більшість технічних засобів пожежогасіння базуються на використанні величезної охолоджувальної потужності води, що має високу питому теплоту, високу питому теплоту випаровування й хімічну інертність стосовно більшості речовин і матеріалів. Існують різні способи подачі вогнегасної речовини (води або водяних розчинів поверхово активних речовин) до вогнища пожежі, на охолоджувану поверхню або в зону, що захищається.

3.2.3. Розв'язання задачі формування водяних завіс

Розв'язання задачі формування водяних завіс може бути здійснене шляхом використання в якості кінцевого елемента системи генерування водяного потоку спеціальних плоскощілинних насадок. Основною проблемою при конструюванні плоскощілинних насадок є зменшення нерівномірності потоку по ширині голівки або забезпечення необхідного параметра однорідності струменя або завіси $V \cdot I$, що визначається відношенням

$$V \cdot I = \frac{Q_{min}}{Q_{max}} ,$$

де Q_{min} й Q_{max}– відповідно мінімальна і максимальна локальні витрати на виході з формувального каналу, $V \cdot I$ – індекс різнотовщинності [254]. Оскільки передбачувані випадки використання щілинних насадок для потреб підрозділів ОРС ЦЗ України досить різноманітні, а створення насадок з можливістю регулювання ширини одержуваних водяних завіс украй складна задача, то мова йде лише про ті конструкції, які дозволяють одержати рівнотовщинні однорідні водяні завіси.

Плоскощілинні голівки застосовуються для формування потоків не лише у пожежній справі. Оскільки швидкості рідин для певних технологічних процесів порівнянні з досліджуваними швидкостями для випадків використання насадок для пожежогасіння, можна теоретично перевірити можливість одержання якісних водяних завіс шляхом застосування відомих конструктивних рішень із іншої предметної області. Таке привнесення відомих результатів для рішення «споріднених» завдань можливо тільки з обов'язковими уточненнями й обмеженнями. Насамперед, для одержання задовільної картини водяної завіси необхідно враховувати основні властивості використовуваних вогнегасних рідин, наприклад, в’язкості.

Використовувані плоскощілинні насадки трикутного типу конструктивно мають три зони (рис. 3.6): зону розширення 1, зону вирівнювання тиску по ширині формувального каналу 2 й зону формування рівномірного потоку на виході з насадки 3 [255-257].

Перехідному каналу надається така форма, яка забезпечувала б рівність гідравлічних опорів на шляху від входу в голівку до будь-якої точки щілини на виході. При цьому плин маси дроселюється в середній частині поперечного перерізу й підсилюється по краях щілини. Виконання умови рівнотовщинності одержуваної завіси $V \cdot I = 1$ в такому випадку забезпечується конструкцією, що одержала назва «риб'ячий хвіст» [258]. До такого типу належить показана на рис. 3.6 голівка [254]. У межах зони 2 струминоформувальний канал має ділянки з різною висотою (меншою на ділянці, що ближче до вихідного отвору-щілини), причому довжина ділянки уздовж лінії плину з більшою висотою, безупинно збільшується з ростом довжини лінії плину, забезпечуючи тим самим рівність гідравлічних опорів уздовж усіх ліній плину в зонах 1–2. Таким чином, є очевидною сталість тиску й витрати по ширині формувального каналу (зона 3) на вході в нього.

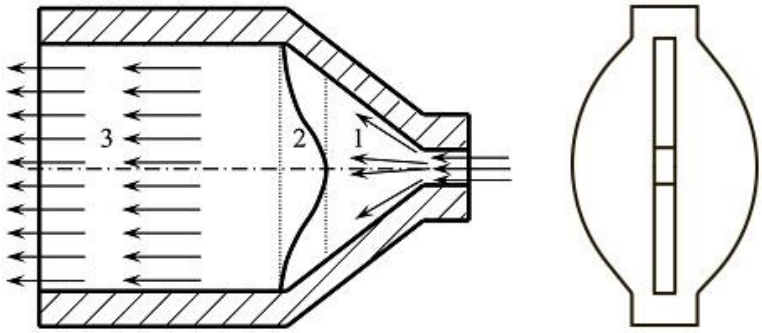


Рис. 3.6 – Плоскощілинні насадки трикутного типу

Профіль лінії переходу ділянок зони 2 при заданому співвідношенні висот може бути розрахований з тим або іншим ступенем точності на основі точного або наближеного методів гідравлічного розрахунку або підібраний експериментально [255]. Однак через явну криволінійність цього профілю виконання його відповідно до розрахункового вигляду досить ускладнене.

Трохи інший підхід, заснований на виконанні умови $V \cdot I = 1$, також названий завданням проектування голівки рівного опору, для трикутного типу голівки може бути заснований на постійному збільшенні висоти H_1 зони 3 від середини ширини щілини до її країв [255].

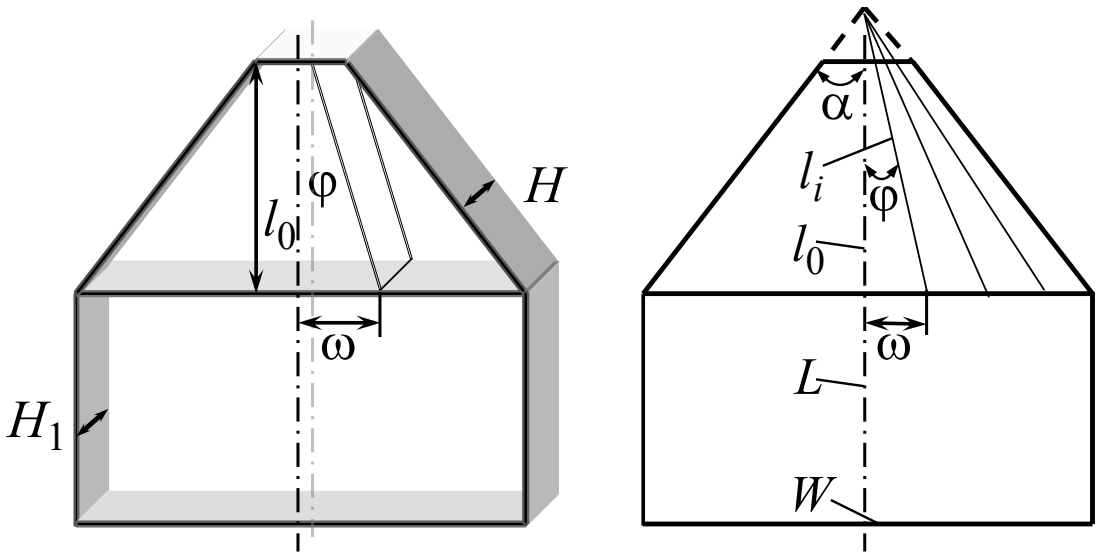


Рис. 3.7 – Визначення параметрів трикутних голівок

Виділяючи у підвідному і формувальному каналах [254] елементарний канал з одиничною шириною на виході, обмежений сусідніми лініями плину l_i

й l_{i+1}, вважаємо його приблизно пласким каналом постійного перерізу. Довжина лінії плину такого каналу

$$L + l_i = L + \frac{l_0}{\cos\varphi_i} .$$

Для випадку $\varphi = 0$ маємо $L + l_i = L + l_0$, для $\varphi = \alpha$ відповідно $L + l_i = L + \frac{l_0}{\cos\alpha}$. Згідно [254] у випадку, коли $\omega \gg H$ в щілинних каналах, що мають прямокутний поперечний переріз і перепад тиску Δp, витрати на периферії q_1 й у центрі q_0каналу можуть бути визначені з виразів

$$q_1 = \frac{1}{2^{n+1}}\frac{m}{n+2}H^{n+2}\left(\frac{p}{L + \frac{l_0}{\cos\alpha}}\right)^n$$

та

$$q_0 = \frac{1}{2^{n+1}}\frac{m}{n+2}H^{n+2}\left(\frac{p}{L + l_0}\right)^n ,$$

де n – показник ступеня реологічного рівняння у формі степеневого закону, m – табличний коефіцієнт.

Таким чином, поділивши ці рівняння, можна одержати

$$V \cdot I = \left(\frac{L + l_0}{L + \frac{l_0}{\cos\alpha}}\right)^n$$

При цьому задача зводиться до відшукання залежності висоти зони H_1 від кута відхилення лінії плину щодо осі насадки φ за умови $V \cdot I = 1$.

Слід зазначити, що для випадку створення плоскощілинних насадок для потреб підрозділів ОРС ЦЗ України серед рідин, з якими вони будуть працювати, найбільш імовірним слід вважати звичайну воду. Тому ніякі обмеження, насамперед пов'язані з появою зон застою, на $\varphi = \alpha$ можна не накладати. Так, для зазначеної вище щілинної насадки-розпилювача РВ–12 $\alpha \approx 90°$, тобто кут розкриття зони 1 (рис. 3.6) є розгорнутим.

Реалізація отриманих результатів. Маючи очевидну з рис. 3.7 геометричну залежність між φ і поточною шириною щілини ω, що складає $\omega = l_0 tg\ \varphi$, можна отримати таблицю значень $\omega - H$, яка буде базовою при виконанні формувального каналу в металі [259]. По суті, так і відбувалося до моменту стрімкого завоювання ринку технологій сучасними інформаційними продуктами, що суттєво підвищують рівень автоматизації різних процесів конструювання й виробництва.

Сучасний підхід дозволяє попередньо математично розраховану геометрію внутрішньої порожнини насадки спроектувати в CAD/CAM/CAE системах і візуалізувати у спеціалізованих програмних пакетах фізичні процеси, що протікають у насадці. До числа CAD/CAM/CAE систем можна віднести T-Flex, Autocad Mechanical Desktop, Solidworks, Unigraphics, Proengineer, Catia, візуалізувати процеси можна в програмних комплексах ANSYS, Abaqus, Flowvision та ін.

Найважливішою умовою для оцінки ефективності використання тієї або іншої насадки є умова рівності витрат струменя (завіси) у всіх точках вихідного поперечного перерізу формувального каналу. Така умова забезпечує рівнотовщинну однорідну завісу. Методи й прийоми вирівнювання потоку ґрунтуються на результатах гідродинамічного аналізу плину рідини в каналі насадки і є одним із завдань їх гідравлічного розрахунку. Окремою задачею, розглянутою при проектуванні й розрахунку насадок, є одержання такого струминоформувального каналу, який би забезпечував відсутність зон застою при номінальному режимі роботи пристрою. Як уже вказувалося вище, спочатку подібні дослідження проводилися при розрахунку формувального інструмента (екструзійних головок) для одержання потоків високов’язкісних речовин, коли конструкція й прохідні перерізи каналів головок і, отже, їхнє загальне конструктивне оформлення залежало від реологічних властивостей використовуваних рідинних речовин [254]. Зважаючи на суттєву відмінність реологічних особливостей речовин, що розглядалися в [259], і води та водних розчинів піноутворювачів, а також їх рівня витрати та швидкості витікання з

насадки, для отримання наглядної картини плину рідини у насадці доречно провести його моделювання за допомогою вищезазначених програмних комплексів.

Фактично, для одержання рівномірної витрати вогнегасної речовини по всій довжині щілини насадки можна використовувати плоскощілинну насадку трикутного типу, а вирівнювання витрати здійснювати або методом зміни довжини щілини («риб'ячий хвіст»), або методом зміни висоти щілини.

3.2.4. Струминоформувальні пристрої для забезпечення рівномірної витрати струменя

Характеристики струменів, одержуваних за допомогою насадок із циліндричними, звужуючими або розбіжними конусними отворами, детально вивчені, а їх розрахунок зазвичай не містить особливих складностей. Більш складним буває випадок, коли вихідний отвір не є круглим. Тоді можна вважати, що усередині струминоформувальних пристроїв існують декілька зон, а саме – початкова циліндрична, перехідна й вихідна зони. При розрахунку таких пристроїв необхідно враховувати втрати, які неминуче будуть характерні для перехідних зон.

У межах даного параграфа термін «рівномірна витрата» вживається як рівномірна витрата по всій площі вихідного отвору-щілини.

Як зазначалося вище, особливе місце серед струминоформувальних пристроїв із некруглим вихідним перерізом займає насадка, що одержала назву «риб'ячий хвіст» [254]. Пристрої, конструкції яких базуються на використанні насадок типу «риб'ячий хвіст» застосовують у випадках, коли необхідно одержати рівність витрати струменя (завіси) у всіх точках вихідного поперечного перерізу формувального каналу. Така рівність забезпечує рівнотовщинну однорідну завісу. Методи й прийоми вирівнювання потоку ґрунтуються на результатах гідродинамічного аналізу плину рідини в каналі насадки і є одними із завдань їх гідравлічного розрахунку.

Дослідження зі створення радіальних водяних потоків проводилися в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля в період з 2003 по 2006 роки. У результаті була створена щілинна насадка для одержання радіальних водяних струменів-екранів, використання яких дозволило здійснити захист сусідніх з палаючим вертикальних сталевих резервуарів для зберігання нафти й нафтопродуктів від теплового випромінювання факела полум'я [100]. У подальшому були зроблені уточнюючі коригування конструкції щілинної насадки, було встановлено циліндричні перегородки для збурення рідини з багатьма отворами малого діаметра [260, 261].



Рис. 3.8 – Насадка для створення радіальних водяних струменів (рис. 3.4 а)

Захист резервуарів від впливу теплового потоку полягав у встановленні між палаючим і кожним сусіднім з ним резервуарами радіальних водяних струменів-екранів, які здатні поглинати й екранувати теплову енергію від факела полум'я, спрямовану на металевий борт об'єкта захисту, внутрішній об'єм якого заповнений нафтою, нафтопродуктом або сумішшю їх парів з повітрям.

Основними паспортними параметрами радіальних водяних струменів-екранів є кут подачі рідини, що становить від 43,5^{o}, висота над рівнем земної поверхні – 2,5 м, довжина струменя – не менше 30 м, кут розпилу води – від 47° при стандартній відстані між резервуарами 12,6 м [100] .



Рис. 3.9 – Демонстрація формування водяної завіси щілинною насадкою-прозпилювачем РВ–12



Рис. 3.10 – Демонстрація формування водяної завіси насадкою для створення радіальних водяних струменів

Для випадку, коли використовувалася насадка із щілинним отвором для створення радіальних водяних струменів, було відзначене одержання водяної завіси з явною нерівномірністю товщини захисної водяної перепони. Встановлено, що перехідному каналу у насадках із щілинним отвором має

надаватися форма, яка забезпечувала б рівність гідравлічних опорів на шляху від входу в насадку до будь-якої точки щілини на виході. Результати експериментів показали, що на відстані від щілини у 29% поперечного перерізу струменя зосереджується близько половини об’ємної маси струменя. Таким чином, водяний захист у зоні теплового впливу факела полум′я, що дозволяє поглинати теплову енергію факела, можна досягнути при меншій на 25% витраті води, при цьому зменшення зони надлишкової товщини струменя на 20% дозволяє зменшити витрати на 10% без погіршення здатності поглинання теплової енергії факела.

Серед головних недоліків насадки РВ–12 слід зазначити її вузькоспеціалізоване використання й труднощі, а іноді й неможливість, зміни параметрів одержуваних струменів, а головною перевагою є простота конструкції й прийнятне значення дисперсності розпорошеного потоку.

Істотний недолік насадки для створення радіальних водяних струменів полягає в тому, що одержуваний струмінь має невисокий коефіцієнт однорідності потоку рідини на виході щілинної насадки. У зв'язку із зазначеною недосконалістю насадки, відбувається нераціональна витрата вогнегасної речовини, особливо економічно недоцільна при використанні дорогих поверхнево активних речовин як добавок до води.

Неоднорідність одержуваного потоку рідини можна пояснити простотою конструкції насадки для створення радіальних водяних струменів, що не забезпечує рівність гідравлічних опорів на шляху від входу в голівку до будь-якої точки щілини на виході. Крім того, як показали експерименти, істотний вплив на однорідність одержуваного струменя справляє якість шліфування губок щілинної насадки й рівномірність ширини щілини по всій її довжині. Дальність подачі (висота «капюшона») вогнегасної речовини при тиску на вході насадки 0,6 МПа й витраті 12 л/с склала 8 метрів.

Проведені експерименти з використанням зазначених насадок дозволяють зробити ряд важливих висновків. По-перше, єдиного рішення по створенню високоефективних віялових і радіальних струменів немає.

Наблизитися до його одержання вкрай складно через технічну неможливість зв'язати воєдино (на одному стволі) різні внутрішні профілі струминоформувальної поверхні, одержавши при цьому можливість змінюючи режими роботи стволів або насадок одержувати необхідні в конкретному випадку пожежогасіння види струменів. По-друге, розрахунки по створенню стволів або насадок для одержання віялових і радіальних струменів слід проводити при початкових умовах витрати рідини – до 20 л/с, дальності подачі – від 8 м, керуючись при цьому можливостями нинішньої аварійно-рятувальної техніки. По-третє, ефективні водяні завіси можуть бути отримані при використанні трикутних плоскощілинних насадок, у яких вирівнювання витрати в будь-якій точці на виході щілинної насадки забезпечується або конструктивним виконанням формувального каналу методом зміни висоти щілини, або методом зміни довжини щілини (насадка типу «риб'ячий хвіст»).

На рис. 3.9 і 3.10 надані зафіксовані картини витікання рідини з насадок двох різних конструкцій: перша – насадкою для створення радіальних водяних струменів, друга – щілинною насадкою-розпилювачем РВ–12. Експерименти проводилися в Академії пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля (2009–2012 рр.) й показали переваги й недоліки кожної з конструкцій, дозволили зробити низку припущень про особливості впливу конструкцій насадок на створення захисних водяних теплових бар'єрів і перепон.

Важливо, що в результаті застосування ліцензованого програмного комплексу FlowVision було виявлено, що суттєвий вплив на нерівномірність витрат вздовж вихідного отвору-щілини в насадці для створення радіальних водяних струменів (рис. 3.10) чинив обраний автором насадки прямокутний вид щілини. Кращі результати стосовно рівномірності витрати вздовж вихідного отвору-щілини досягалися коли центральна зона щілини була дещо вужча аніж на її краях (§3.2.5).

У результаті досліджень було розроблено пожежний ствол нового принципу дії й відповідно нової конструкції (§3.3). При одночасному впливі

звукової й гідродинамічної кавітації може спостерігатися підвищення ефективності даного процесу (відбувається накладення частот коливань ультразвукової й гідродинамічної кавітації). Аналогічний процес спостерігається й у випадку накладення різних звукових частот при ультразвуковій кавітації. В обох випадках відбувається підвищення інтенсивності кавітації за рахунок відмінності резонансних радіусів при високих і низьких частотах. Існування великих кавітаційних пухирців при низьких частотах приводить до їхнього ефективного «розмноження» під впливом високих частот. Ефективно відбувається ріст зародків пухирців; відображається цей процес накладенням і на середніх радіусах пухирців.

Враховуючи представлені міркування, зроблені пропозиції по створенню ствола комбінованої дії, що забезпечує накладення на гідродинамічний кавітаційний процес ультразвукової кавітації. Гідродинамічна кавітація забезпечується відповідним реактором, вмонтованим у ствол, а ультразвукова – пластиною, розташованою на виході зі ствола. За певних умов розглянута пластина виявляється налаштованою в резонанс і в ній виникають достатньо сильні коливання низької частоти.

Змінні за заданим законом площі поперечного перерізу насадки на виході можуть забезпечувати рівнотовщинний струмінь, який призначений для одержання потоків з особливими унікальними властивостями тонкорозпорошених дрібнодисперсних загороджувальних хмар, теплових бар'єрів і перепон або охолоджувальних водяних плівок. Як показано із проведених експериментів, добре відповідає вищевказаним вимогам насадка типу «риб'ячий хвіст».

3.2.5. Особливості гідродинамічного розрахунку щілинних насадок

Відсутність симетрії потоку або відмінність геометрії поперечного перерізу від кола може привести до суттєвих змін гідродинамічних

параметрів. Рівняння руху потоку в каналі з некруглою формою поперечного перерізу, який розташований у площині $y0z$, зводяться до виду

$$a_x - \left[grad\frac{p}{\rho}\right]_x + \frac{\partial \tau_{xx}^*}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0\ ; \tag{3.3}$$

$$a_y - \left[grad\frac{p}{\rho}\right]_y + \frac{\partial \tau_{yy}^*}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = 0;\ \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0\ . \tag{3.4}$$

У якості граничних умов у стінки каналу звичайно приймаються умови прилипанння, тобто приймається $u_x = 0$ на стінці.

Якщо використати поняття ефективної в'язкості, то з (3.3) для більшості реальних середовищ можна одержати

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} = \frac{1}{\mu_{xp}} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}; \tag{3.5}$$

Оскільки при стабілізованому плині $\frac{\partial p}{\partial x} = const$, скориставшись новим позначенням $\nu_x = \frac{u_x \mu_{xp}}{\frac{\partial p}{\partial x}}$ нескладно вираз (3.5) перетворити у рівняння Пуассона [262]

$$\frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} = 1\ . \tag{3.6}$$

Відома низка методів [262] розв'язання даного рівняння. Наприклад, при незмінному значенні в'язкості можна застосувати варіаційний метод.

Для каналів з поперечним перерізом у вигляді квадрата зі стороною рівною $2a$, функція швидкості повинна задовольняти умові мінімуму виразу

$$I = \int_{-a}^{a}\int_{-a}^{a}\left[\left(\frac{\partial u_x}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z}\right)^2 + \frac{2}{\mu_{xp}}\frac{\partial p}{\partial x}u_x(y,z)\right]dydz\ ,$$

а епюра швидкостей – виразу

$$u_x(y,z) = \frac{Q}{a^2}\left[\left(\frac{y}{a}\right)^2 - 1\right]\left[\left(\frac{z}{a}\right)^2 - 1\right]\cdot$$

$$\cdot\left\{2{,}09825 + 0{,}29180\left[\left(\frac{y}{a}\right)^2 + \left(\frac{z}{a}\right)^2\right] + 0{,}87545\left(\frac{y}{a}\right)^2\left(\frac{z}{a}\right)^2\right\}. \tag{3.7}$$

Нескладно переконатися, що зміна τ_{xy} по перерізу каналу носить для ньютонівської рідини лінійний характер.

На підставі залежності між τ_{xy} і $\frac{\partial p}{\partial x}$ визначається коефіцієнт гідравлічного тертя, який у даному випадку

$$\lambda = -\frac{\partial p}{\partial x}\frac{16a}{\rho u_{\text{сер}}^2} = \frac{56{,}92}{Re}, \tag{3.8}$$

$$u_{\text{сер}} = 0{,}28111\,\frac{1}{2\mu_{\text{еф}}}\frac{\partial p}{\partial x}a^2 .$$

Визначення величин $\frac{\partial p}{\partial x}$ і λ може бути здійснене й більш простим способом, – як на підставі методу, запропонованого Буссинеском [71], так і за допомогою методу аналогії між ламінарним плином реальної рідини в призматичному каналі й крутінням стрижня того ж профілю [263].

Задовільні результати дає метод Буссинеска при визначенні втрат енергії у випадку плину низки неньютонівських рідин в каналах із круговим, трикутним і пласкощілинним перерізами. На рис. 3.11 показана якісна картина залежності коефіцієнта λ як функції числа Рейнольдса для неньютонівських рідин, фактично забезпечення рівнотовщинності отримуваної плівки.

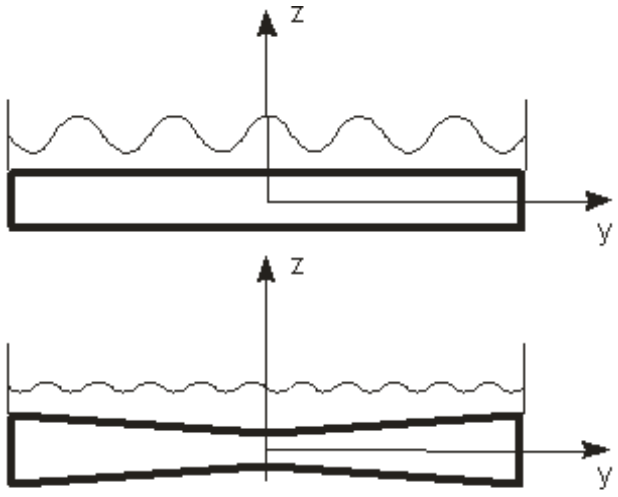


Рис. 3.11 – Форма вихідного отвору щілинного типу

Якщо позначити напір потоку в плоскощілинному каналі як H_0, а для сильновитягнутих трикутника й трапеції відповідно H_Δ, $H_{\text{тр}}$, то нескладно одержати

$$H_\Delta = H_0 \left\{ \frac{\mu_0}{\mu_\Delta} \left(\frac{Q_0}{Q_\Delta} \right)^2 \right\} = \frac{\mu_0}{\mu_\Delta} \left(\frac{l}{h} \right)^4 \cdot \left[\frac{\frac{l}{h}}{2{,}2 \left(1 + \frac{l}{h} \right)^5} \right]^2 ;$$

$$H_{\text{тр}} = \frac{\mu_0}{\mu_{\text{тр}}} \left(\frac{l}{h} \right)^4 \left\{ \frac{\frac{l}{h}}{4{,}4 \left(1 + \frac{l}{h} \right)^4 - \left(1 - \frac{l}{h} \right)^4} \right\}^2 .$$

Звідси можна зробити висновок, що всі особливості зміни відношень $\frac{Q_0}{Q_\Delta}$ й $\frac{Q_0}{Q_{\text{тр}}}$ зі зміною форми каналу характерні й для інших гідравлічних параметрів, наприклад, для коефіцієнтів напору, втрат енергії тощо.

З рис. 3.12 видно зменшення значення коефіцієнта опору при низьких значеннях числа Re для каналів різної форми поперечного перерізу при ламінарному плині досліджуваних високов'язкісних речовин. Зі зростанням числа Re й відповідно переходом до турбулентного режиму коефіцієнт опору продовжує зменшуватися, однак вже не так стрімко.

Проведені експерименти у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за участі проф. О. М. Яхна спочатку для високов'язкісних полімерів, а потім й для водних розчинів поверхнево-активних речовин підтвердили дане твердження в для чисел Рейнольдса до 10^5 [264].

3.3. Стволи і насадки з кавітацією потоку на виході

Використання кавітаційних ефектів при створенні комбінованого ствола, що забезпечує накладання на гідродинамічний кавітаційний процес ультразвукової кавітації. Результати дослідження явища кавітації, основи яких закладені Р. Кнеппом, Л. І. Сєдовим, Мілн-Томсоном, Дж. Дейлі,

І. М. Федоткіним і іншими, є актуальними для самих різних галузей діяльності людини. Кавітація з’являється, або може бути створена, при обтікані різних тіл потоком в’язкої рідини (гідродинамічна кавітація), при ультразвуковому впливі на рідину (ультразвукова кавітація) тощо. У будь-якому випадку вона характеризується утворенням і розвитком пухирців газу, при схлопуванні яких, виділяється досить велика енергія. У роботах Л. І. Сєдова показано, що порушення нерозривності середовища пов'язане з її об'ємною міцністю, тобто «здатністю витримувати розтягувальні напруження». Для води, наприклад, такі зусилля досягають $3{,}9 \cdot 10^2$ МПа. Умови динамічної рівноваги пухирця можуть бути визначені з виразу

$$p_0 = p + \frac{2\delta}{r},$$

де δ – коефіцієнт поверхневого натягу; r – радіус пухирця. Причому коефіцієнт поверхневого натягу визначається як робота A, яку необхідно виконати для того, щоб площа поверхні S змінилася (стала більше) тобто

$$\delta = \frac{A}{S}.$$

Гідродинамічна кавітація, як відомо, може спостерігатися у потоці за поганообтічними тілами й характеризується утворенням каверн. На даному принципі засновані кавітаційні змішувачі, що забезпечують змішування різних середовищ за рахунок енергії схлопування пухирців.

При коливаннях малих газових пухирців у воді у фазі їх стиснення, у короткі проміжки часу, що становлять 10^{-8} … 10^{-9} с, можуть виникати тиски понад 10^2 МПа, а температура досягати 10^4 °С. Досить висока енергія виділяється й при схлопуванні пухирців, коли в обмеженій зоні з'являється область підвищеного тиску (до $4 \cdot 10^3$МПа) [265, 266].

Зазвичай процес гідродинамічної кавітації прийнято характеризувати розмірами пухирців, швидкістю їх схлопування і переносом енергії в потоці. На розмір та час життя пухирців істотний вплив може справляти швидкість руху рідини.

Дещо інший характер носять кавітаційні процеси при ультразвуковій кавітації. Збільшення числа кавітаційних пухирців у цьому випадку відбувається згідно з ланцюговим механізмом, який характеризується тим, що нові мікропухирці виникають у процесі схлопування вже існуючих пухирців. Нові пухирці, що утворюються, є зародками кавітації. Тобто спостерігається картина ланцюгового механізму утворення нових пухирців як наслідку схлопування пухирця, що був утворений раніше.

Якщо припустити, що з одного схлопування пухирця утворюється в середньому j нових пухирців, то можна записати кінетичне рівняння для швидкості зміни концентрації кавітаційних пухирців [265]

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{n}{iT_0} - k_n n^2 + \frac{jn}{iT_0}, \tag{3.9}$$

де T_0 – період акустичних коливань; $n = \frac{dN}{dG}$ – локальна концентрація; G – об'єм, N – кількість пухирців, розподілених в об'ємі.

З рівняння (3.9) маємо

$$n(t) = \frac{j-1}{ik_nT_0 + \frac{j-1-ik_nT_0n_0}{n_0} exp\left[-\frac{(j-1)t}{iT_0}\right]}.$$

При частоті $5 \cdot 10^5$ Гц максимальний радіус пухирця $r_0 = 2{,}6 \cdot 10^{-6}$ м, і $\overline{V_n} = 1$ м/с можна одержати співвідношення для стаціонарної концентрації кавітаційних пухирців

$$n_\infty = \frac{j-1}{1} \cdot \frac{1}{\pi(2{,}6 \cdot 10^{-3})^2 100 \frac{1}{5 \cdot 10^3}} = \frac{j-1}{1} \cdot 2{,}4 \cdot 10^8,$$

$\frac{j-1}{i} \approx 0{,}045$ при $n_\infty = 10^7$см$^{-3}$.

У випадку, коли збудувати систему, де одна частота забезпечує гідродинамічну кавітацію, а інша – ультразвукову, можливим є істотне підвищення інтенсивності процесу утворення нових пухирців під впливом високих частот (з великих пухирців, утворених при низьких частотах), і велика кількість утворених зародків кавітації сприяє їхньому росту при низькочастотних ультразвукових коливаннях.

Створення насадки з кавітацією потоку на виході. Отримання рідинних крапель малого розміру традиційно пов’язують із примусовим подрібненням суцільного струменя шляхом його пропускання крізь отвори обмеженого діаметра або взаємодією з елементами, що забезпечують механічне руйнування потоку. У разі необхідності доставки таких крапель на певну відстань від зони формування виникає потреба у значному збільшенні їх кінетичної енергії, що, у свою чергу, вимагає надання частинкам високих швидкостей. Як джерело енергії для розгону дрібнодисперсних часток у подібних системах, як правило, використовується стиснений газ, зокрема повітря.

У межах поставленої задачі було запропоновано інший підхід до створення розпиленого потоку рідини, який відрізняється від класичних схем отримання дрібнодисперсних часток із високою кінетичною енергією. Основна ідея полягає у відмові від складних багатостадійних технологічних операцій та переході до використання фізичних явищ кавітаційної природи. Застосування гідродинамічної та ультразвукової кавітації дозволило істотно спростити процес формування розпиленого потоку, водночас забезпечивши безпечні умови експлуатації та високий рівень енергетичної ефективності [267].

Запропонований спосіб реалізується за допомогою конструктивної схеми, у якій рідина подається під тиском у циліндричний канал. Уздовж осі цього каналу жорстко закріплено гідродинамічний кавітатор, а безпосередньо на виході з каналу розміщено випромінювач ультразвукових коливань (рис. 3.12). Така компоновка забезпечує послідовну активацію кавітаційних процесів різної природи в межах одного проточного об’єму.

Під час руху рідини під тиском через область гідродинамічного кавітатора у потоці формуються кавітаційні порожнини, які можуть містити газ, пару або їх суміш. Їх виникнення зумовлене локальним зниженням тиску, що спостерігається при різкому зростанні швидкості потоку під час проходження через кільцеву щілину між внутрішньою поверхнею

циліндричного каналу та поверхнею кавітатора. У зоні за кавітатором утворюється кавітаційно збурений потік, у якому відбувається інтенсивне схлопування бульбашок. Цей процес супроводжується генерацією ударних хвиль, які сприяють дезінтеграції рідини з утворенням дрібнодисперсних часток.

Подальший рух газорідинної суміші до виходу з каналу призводить до її взаємодії з ультразвуковим випромінювачем. Дія ультразвукових коливань ініціює додаткові кавітаційні явища, внаслідок яких зростає кількість кавітаційних бульбашок, зменшується їх характерний розмір і водночас підвищується кінетична енергія сформованого розпиленого потоку. Комбінований вплив гідродинамічної та ультразвукової кавітації забезпечує більш інтенсивне подрібнення рідини порівняно з використанням кожного з цих механізмів окремо.

Сформований у результаті такого впливу розпилений потік дрібнодисперсних часток рідини характеризується достатнім запасом кінетичної енергії, що дозволяє спрямовувати його на відстань 10 м. Це є принципово важливим з точки зору практичного застосування способу, зокрема для задач ефективного та безпечного пожежогасіння.

Реалізація способу на практиці може здійснюватися наступним чином [267]. Рідину під тиском подають у циліндричний канал, у центральній частині якого встановлений гідродинамічний кавітатор. Проходячи через кільцевий зазор між кавітатором і стінками каналу, потік інтенсивно прискорюється, що створює умови для зародження та розвитку кавітаційних бульбашок у струменях води. Подальший різкий перепад тиску спричиняє їх схлопування з вивільненням енергії та утворенням ударних хвиль. Унаслідок цього суцільний потік води трансформується у газорідинну суміш із дрібнодисперсними частками, яка надходить до ультразвукового кавітатора, розташованого на виході каналу. Під дією ультразвуку кавітаційні процеси інтенсифікуються, що приводить до остаточного формування розпиленого

потоку рідини з великою кінематичною енергією та можливістю перенесення на відстань 10 м.

У результаті аналізу та обґрунтування принципів формування розпиленого рідинного потоку було розроблено окреме конструктивне рішення розпилювального пристрою. Створена корисна модель ствола з реалізацією кавітаційних процесів безпосередньо на виході потоку належить до спеціалізованих засобів протипожежного призначення. Запропонована конструкція орієнтована на використання в різних умовах експлуатації, зокрема для ліквідації пожеж усередині будівель і споруд, а також на відкритих майданчиках. Крім пожежогасіння, функціональні можливості пристрою дозволяють застосовувати його для зниження рівня хімічного та біологічного забруднення шляхом обробки уражених зон розпиленою рідиною. Таким чином, об’єктом корисної моделі є пожежний ствол, призначений для створення високоефективного розпиленого потоку рідини, який використовується як для припинення процесів горіння, так і для дезактиваційних заходів.

Конструкція пожежного ствола, запропонована в [268], забезпечує формування водяного аерозолю з високим ступенем дисперсності, при якому характерний розмір крапель не перевищує 200 мкм. Такий аерозоль демонструє підвищену ефективність під час гасіння пожеж класів A та B, сприяє локалізації осередку загоряння та створенню захисної зони, а також забезпечує інтенсивне поглинання диму. Одночасно з цим реалізується швидка подача розпиленої рідини та формується стійкий туман із великою дальністю поширення, що досягає приблизно 10–15 метрів.

Пожежний ствол, конструкція якого наведена на рис. 3.12, являє собою пристрій для формування розпиленого потоку рідини та включає корпус 1 із внутрішнім циліндричним каналом 2, призначеним для подачі води. Усередині цього каналу, по його вісі, встановлений гідродинамічний кавітатор 3. Спосіб кріплення кавітатора до корпусу 1 передбачає утворення кільцевої щілини 4 між поверхнею кавітатора та внутрішньою стінкою каналу, що є важливим з

погляду формування кавітаційних процесів. Вихідна частина каналу оснащена випускним соплом 5, яке поступово звужується у напрямку до осі, забезпечуючи необхідні умови для прискорення потоку. Уздовж тієї ж осі каналу розміщений зовнішній генератор ультразвуку 6, закріплений за межами водяного сопла 5.

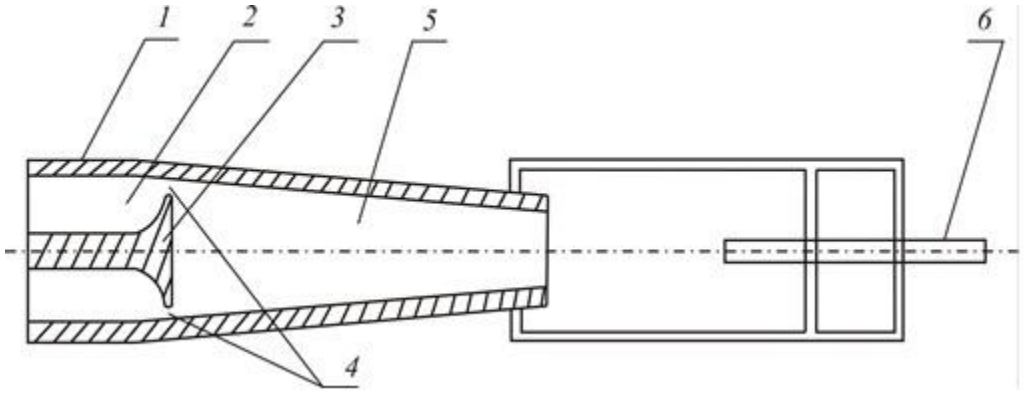


Рис. 3.12 – Ствол з використанням кавітаційних ефектів для розпорошення струменя [268]

Розроблений пожежний ствол [268] має конструктивні особливості, які принципово відрізняють його від традиційних пожежних насадок. Основною з них є виконання гідродинамічного кавітатора у вигляді циліндра з конусоподібним обтічником, вершина якого спрямована проти напрямку руху рідини. Така орієнтація обтічника сприяє інтенсифікації локальних гідродинамічних ефектів. Крім того, кавітатор виконаний із можливістю осьового переміщення, що дозволяє змінювати умови протікання рідини та керувати інтенсивністю кавітації. Випромінювач ультразвукових коливань при цьому розташований у зоні виходу потоку з циліндричного каналу, де взаємодія з дрібнодисперсною рідиною є найбільш ефективною.

Під час створення корисної моделі основним завданням було розроблення пожежного ствола, який за рахунок поєднання раціональної геометрії та використання фізичних явищ гідродинамічної й ультразвукової кавітації забезпечував би формування високодисперсного розпиленого потоку рідини з підвищеною кінетичною енергією. Реалізація такого підходу дозволяє

підвищити ефективність гасіння пожеж без ускладнення конструкції та без застосування додаткових енергетичних джерел.

Пожежний ствол [268] складається з корпусу з каналом для подачі рідини, випускного сопла та генератора ультразвукових коливань і додатково містить осьовий кавітатор, закріплений у корпусі з утворенням кільцевої щілини. Генератор ультразвуку встановлений по вісі каналу та виконаний у вигляді пружної пластини, яка закріплена у двох точках зовні випускного сопла. Таке виконання випромінювача дозволяє поєднати простоту конструкції з ефективною передачею ультразвукових коливань у зону розпилення. Кавітатор, у свою чергу, має циліндричну форму з конусоподібним обтічником, орієнтованим вершиною проти потоку рідини, і може переміщуватися вздовж вісі каналу.

Розташування кавітатора по вісі каналу з утворенням кільцевої щілини між ним і корпусом створює стабільні умови для виникнення гідродинамічної кавітації. У процесі проходження рідини під тиском через зазначену зону в потоці формуються кавітаційні бульбашки або каверни, заповнені газом, парою чи їх сумішшю. Подальше схлопування цих бульбашок супроводжується виникненням ударних хвиль, які сприяють інтенсивному подрібненню рідини з утворенням дрібнодисперсних часток, що володіють значною кінетичною енергією. Важливою перевагою є те, що досягнення такого ефекту здійснюється без використання стисненого газу [268].

Використання пружної пластини як випромінювача ультразвукових коливань забезпечує додаткову активацію кавітаційних процесів. Коли дрібнодисперсний потік рідини, що виходить із випускного сопла під тиском, взаємодіє з поверхнею пластини, виникає ультразвукова кавітація. Унаслідок цього зростає кількість кавітаційних бульбашок, зменшуються їх характерні розміри та відбувається подальше збільшення кінетичної енергії розпиленого потоку.

Комбінована дія гідродинамічної та ультразвукової кавітації дозволяє досягти дуже високого ступеня диспергування води, при якому частинки

розпиленої рідини мають підвищену енергію руху. При цьому водяний туман, сформований пожежним стволом, складається не лише з маси води, а й із маси залученого повітря. Саме це забезпечує зростання загальної кінетичної енергії туману до рівня, за якого стає можливим спрямування фронту потоку на відстань 10 метрів, що в багатьох практичних ситуаціях є достатнім для ефективного гасіння пожеж.

Можливість осьового переміщення кавітатора дає змогу регулювати інтенсивність гідродинамічної кавітації та, відповідно, параметри сформованого розпиленого потоку. Це дозволяє адаптувати характеристики розпилення до конкретних умов експлуатації й отримувати оптимальні режими роботи як для пожежогасіння, так і для дезактивації хімічно та біологічно забруднених ділянок із використанням рідин відповідного призначення.

Робота пожежного ствола здійснюється за таким принципом [268]. Вода, що подається під тиском, надходить у корпус пожежного ствола 1 та рухається вздовж циліндричного каналу 2 у напрямку до гідродинамічного кавітатора 3. Проходячи крізь зону кавітатора, потік спрямовується в кільцеву щілину 4, де внаслідок зміни гідродинамічних параметрів у рідині ініціюється процес кавітації. У цій області формуються кавітаційні бульбашки (каверни), заповнені газом, парою або їх поєднанням, що призводить до утворення кавітаційно збуреного потоку.

Далі сформований кавітаційний потік рідини під тиском надходить до випускного сопла 5 і через нього спрямовується на пружну пластину 6. Оскільки пластина закріплена у двох точках, взаємодія з потоком викликає її коливання. У результаті цих коливань у зоні контакту потоку з пластиною активізуються ультразвукові кавітаційні процеси.

Поєднання гідродинамічної кавітації, що виникає під час проходження рідини через кавітатор і кільцеву щілину, з ультразвуковою кавітацією, зумовленою коливаннями пружної пластини, забезпечує формування

спрямованого розпиленого потоку рідини з високим ступенем дисперсності та підвищеною кінетичною енергією.

3.4. Методи підвищення довговічності стволів і насадок

Для створення умов формування струменів визначальну роль відіграють стан та матеріали, з яких виготовлене струминоформуюче обладнання, його конструктивні особливості (форма) та перед усім його внутрішня порожнина. Розглянемо випадок, коли подальший ремонт і/або експлуатація елемента або системи стають не вигідними економічно (фізичне зношення), на противагу випадку невідповідності параметрів елемента або системи умовам експлуатації через моральне старіння.

На користь округлення і поліровки внутрішніх поверхонь сопла для досягнення максимальної продуктивності свідчать результати багатьох досліджень [269], а однією із основних вимог до конструкції сопла є ефективне перетворення потенційної енергії в кінетичну енергію. Це найкраще досягається завдяки раптовому плавному звуженню потоку від зони входу в сопло до діаметра сопла. Вплив конструкцій насадок в пешу чергу проявляється на стійкості сформованих вогнегасних струменів до розпилення. Співвідношення розмірів сопла Ld^{-1} має досить істотний вплив на початковий профіль швидкості струменя і подальшу форму поверхні струменя. Фактично, відношення Ld^{-1} у деяких випадках може слугувати засобом контролю «шорсткості» поверхні струменя, тобто появі хвильових поверхневих ефектів.

Як зазначається у працях [270, 271], у підрозділах пожежної охорони широко застосовуються різноманітні захисні покриття, зокрема антикорозійні, теплозахисні, а також покриття, стійкі до дії хімічно активних середовищ. Основною перевагою їх використання є підвищення експлуатаційної надійності та ресурсу пожежно-технічного обладнання, наприклад резервуарів пожежних автоцистерн. Найчастіше такі покриття наносять методом

напилення, при цьому їх структура характеризується наявністю меж між окремими частинками та шарами.

У експериментальних дослідженнях, наведених у роботі [270], як захисні матеріали застосовувалися: цинк Zn – ДСТУ 3640:2001 марки Ц2; алюміній Al – ДСТУ EN 573 марки А; ніхром марки НЖХц 16–15–1,5; латунь – ДСТУ EN 1412 марки Л62. Зазначені матеріали продемонстрували позитивні результати з точки зору захисних властивостей. Водночас для пожежних стволів як низького, так і високого тиску перспективними та достатньо ефективними є кремній-органічні покриття. Їхній хімічний склад детально розглянуто в роботі [272].

Такі покриття тривалий час успішно застосовуються в обладнанні хімічної промисловості, що пояснюється відносною простотою їх нанесення як на внутрішні, так і на зовнішні поверхні. Разом з тим, характер поверхні основного матеріалу може зумовлювати утворення різних типів мікронерівностей або, навпаки, сприяти підвищенню гладкості обробленої поверхні.

Наявні нерівності, як правило, не знижують захисної ефективності покриттів, однак можуть істотно впливати на величину гідравлічного тертя потоків, що рухаються вздовж поверхонь з таким покриттям. У подальшому розглядається вплив кремній-органічних покриттів, нанесених на внутрішні поверхні каналів різної геометрії, які використовуються в гідравлічному пожежному обладнанні, зокрема в пожежних стволах [273].

У роботах, присвячених дослідженню захисної дії окремих типів покриттів, що виконувалися в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України та Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», застосовувалися кремній-органічні покриття на основі полісилоксанового ланцюга, структура якого утворена чергуванням атомів кремнію *Si* та кисню *O*.

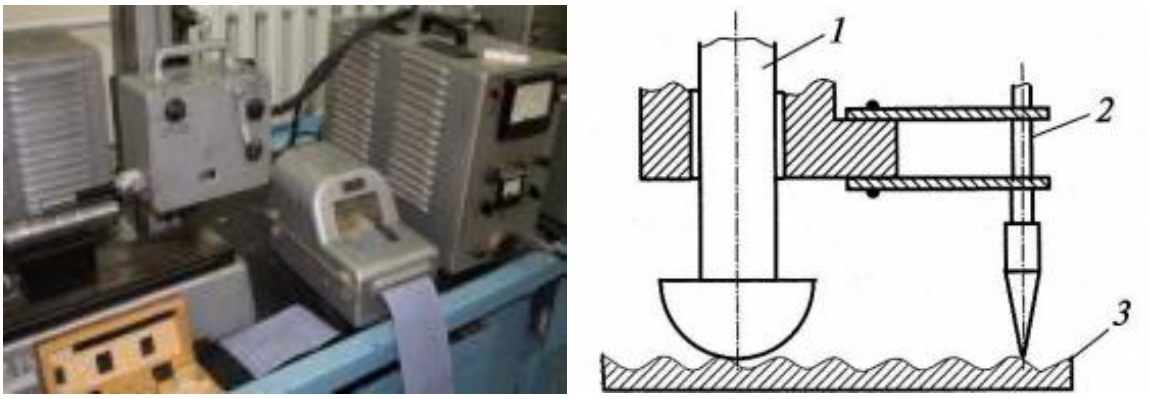
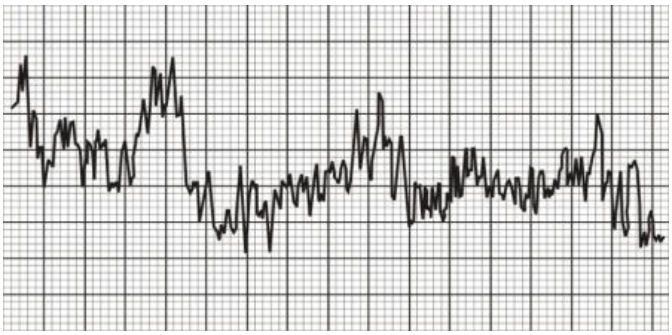
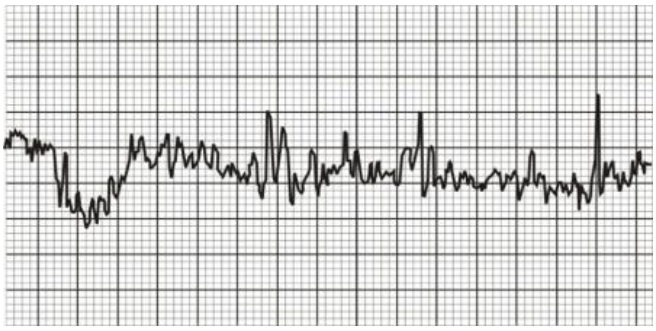


Рис. 3.13 – Профілограф-профілометр [274]
1– навідна голівка; 2 – голка; 3 – досліджувана поверхня.

Важливо, що окрім силіконових зв’язків кремній-органічні полімери містять кремній-вуглецеві зв’язки. Саме тому полімери, що утворюють дану плівку, набувають високої термостійкості та твердоти, жорсткості, масло- та бензостійкості, хімічної та морозостійкості та мають електроізоляційні властивості [275].



а)



б)

Рис. 3.14 – Профілограма внутрішньої поверхні труби (а) та органічного скла (б) з кремній-органічним покриттям № 130 (якісна картина)

Варто підкреслити, що використання таких покриттів дозволяє досягати високого кута змочування, що є ключовим фактором при мінімізації гідравлічних опор у потоках рідин [273].

Шорсткість поверхні визначали за допомогою профілографа-профілометра моделі 201 (рис. 3.13). Експериментальні дані були представлені у вигляді профілограм для різних кремній-органічних покриттів (рис. 3.14 а, б). Досліди проводилися як на стальних трубах (рис. 3.14 а), так і на органічному склі (рис. 3.14 б). Аналіз показав, що рельєф обробленої поверхні значною мірою залежить від матеріалу основи, навіть якщо використовується однаковий тип покриття. У процесі експериментів кут змочування поверхні коливався в межах $90^0 3' \ldots 102^0 24'$.

Для визначення гідравлічних опор застосовували сталеві труби з покриттями у потоках як в'язких, так і аномально в'язких рідин у режимах ламінарного та турбулентного руху. В якості робочих рідин використовувалися вода та водяні розчини карбоксилітилцелюлози. Величина шорсткості труб змінювалася залежно від типу покриття, що дозволяло регулювати кут змочуваності α.

Було встановлено, що для чисел Рейнольдса до 10^5 експериментальні дані добре узгоджуються з розрахунками за формулою Блазіуса [276], скоригованою коефіцієнтом β. Значення цього коефіцієнта залежить як від числа Рейнольдса, так і від хімічного складу кремній-органічного покриття, що дає змогу враховувати вплив матеріалу на гідравлічні властивості потоку.

Таким чином,

$$\lambda_{\text{покр}} = \frac{0{,}3164}{\sqrt[4]{Re}} \cdot \beta \,. \qquad (3.10)$$

Для досліджуваного діапазону чисел Рейнольдса та кута змочуваності α коефіцієнт β набуває значень, наведених в таблиці 3.4.

На рис. 3.14 (а, б) подані залежності коефіцієнта гідравлічного тертя від числа Рейнольдса в системі координат $\lg 100\lambda - \lg Re$ (кожна з кривих відповідає певному значенню кута змочуваності α). Аналіз представлених

графіків демонструє, що збільшення кута змочуваності веде до зменшення гідравлічного опору λ. Цей ефект має важливе практичне значення, оскільки при незмінній потужності зменшення сил в'язкого тертя дозволяє підвищити один із ключових параметрів системи генерації водяних струменів – витрату рідини.

Таблиця 3.2

Значення коефіцієнту β для досліджуваного діапазону чисел Рейнольдса та кута змочуваності α

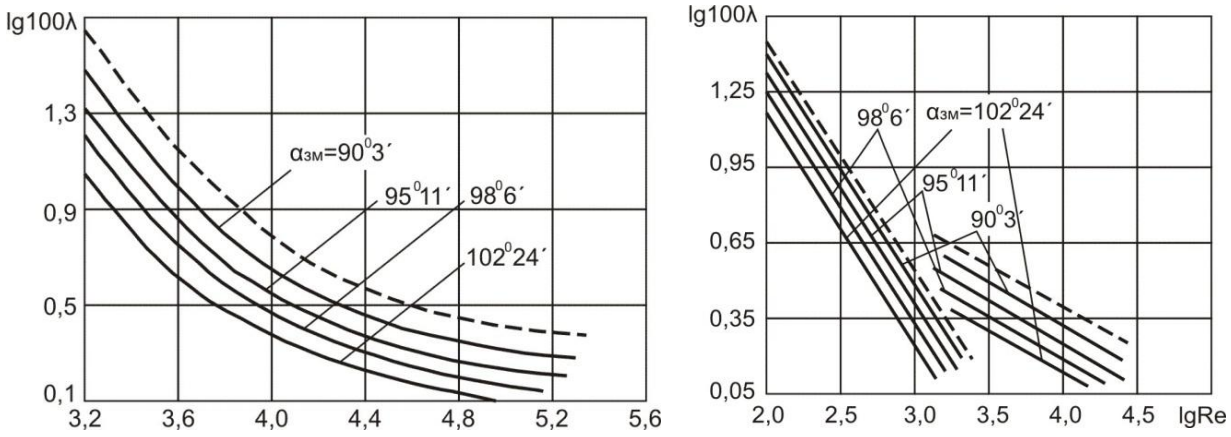
Число Re	Кут змочуваності α	Коефіцієнт β	$\lambda_{\text{покр}}$
14150	$90^0 3'$	0,764	$0{,}2417/\sqrt[4]{\text{Re}}$
17800	$95^0 11'$	0,851	$0{,}2693/\sqrt[4]{\text{Re}}$
71995	$98^0 6'$	0,941	$0{,}2977/\sqrt[4]{\text{Re}}$
26300	$102^0 24'$	1,035	$0{,}3275/\sqrt[4]{\text{Re}}$
31056	$98^0 6'$	0,974	$0{,}3110/\sqrt[4]{\text{Re}}$

Іншим, окрім кута змочуваності α, показником ефективності досліджуваних покриттів (в гідравлічному сенсі) є деяка функція $f(x)$, що характеризує зміни максимальних розмірів виступів шорсткості по довжині каналу. Використовуючи подану [276] формулу для визначення коефіцієнта $\lambda_{\text{покр}}$, функцію $f(x)$ можна визначити таким чином

$$f(x) = D\left(\frac{\lambda_{\text{покр}}^{1/m}}{\lambda_0} - \frac{B}{Re}\right), \tag{3.11}$$

де D – діаметр каналу, наприклад, пожежного ствола; B – експериментально визначений параметр, що залежить від властивостей покриття (зокрема кута змочування); m – константа.

Врахування даної функції $f(x)$ суттєве у тих випадках, коли ступінь шорсткості кремній-органічного покриття спричиняє вплив на величину $\lambda_{\text{покр}}$.



а) *б)*

Рис. 3.15 – Графіки залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса під час руху води (а) і 1%-го розчину карбоксиметилцелюлози (б) в трубах без покриття (пунктиром) і з кремнійорганічним покриттям (пряма лінія)

Значення функції $f(x)$ були отримані на основі аналізу профілограм і графічних залежностей наведених на рис. 3.14, 3.15. В табл. 3.5 наведено значення $f(x)$ при заданих параметрах B, α в діапазоні Re, при яких проводилися досліди.

Таблиця 3.5

Значення функції $f(x)$

Кут змочування	Значення Re	Значення B	Функція $f(x)$
$\alpha = 90^0 3'$	$8354 \le \mathrm{Re} \le 27608$ $27608 \le \mathrm{Re} \le 49391$ $49391 \le \mathrm{Re} \le 105225$ $105225 \le \mathrm{Re} \le 142363$	$4050,2 \le B \le 6914,3$ $6914,3 \le B \le 19889,4$ $19889,4 \le B \le 31884,1$ $31884,1 \le B \le 37342,1$	1,0
$\alpha = 95^0 11'$	$7467 \le \mathrm{Re} \le 21728$ $21728 \le \mathrm{Re} \le 51317$ $51317 \le \mathrm{Re} \le 100049$ $100049 \le \mathrm{Re} \le 141874$	$6735,0 \le B \le 9554,1$ $9554,1 \le B \le 30685,0$ $30685,0 \le B \le 49577,6$ $49577,6 \le B \le 721153,0$	4,0
$\alpha = 98^0 6'$	$16864 \le \mathrm{Re} \le 30333$ $30333 \le \mathrm{Re} \le 62955$ $62955 \le \mathrm{Re} \le 99048$ $99048 \le \mathrm{Re} \le 126926$	$15249,5 \le B \le 20677$ $20677 \le B \le 56646,7$ $56646,7 \le B \le 80704,1$ $80704,1 \le B \le 95257,6$	5,0

Із наведених результатів можна зробити висновок, що за допомогою формули (3.11) при відомому значенні функції $f(x)$ можна визначити коефіцієнт $\lambda_{\text{покр}}$ з врахуванням особливостей кремній-органічного покриття [273].

Скориставшись π–теоремою для загального випадку напірних та безнапірних потоків в'язкої рідини можна визначити основні критерії, які характеризують потоки рідини вздовж різних поверхонь. Такими критеріями є: критерій Рейнольдса $Re = \frac{U_{\text{сер}}\delta}{\nu}$; Фруда $Fr = \frac{U_{\text{сер}}^2}{2g\delta}$; Вебера $We = \frac{\rho U_{\text{сер}}^2}{\sigma}$.

Таким чином, для напірних потоків в каналах з кремній-органічним покриттям, зручним для оцінювання впливу кремній-органічного покриття на гідравлічні втрати енергії є залежність між критеріями

$$Eu = a_0 + a_1 lgRe + a_2 lgRe^2 + a_3 lgRe^3, \qquad (3.12)$$

де a_0, a_1, a_2, a_3, – відповідні коефіцієнти, які залежать від форми поверхні, що отримується в результаті нанесення кремній-органічного покриття. Проведені досліди з трубами діаметром 50 мм при русі води зі швидкостями, які відповідають числам Рейнольдса $2{,}5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 1{,}8 \cdot 10^4$ дозволили визначити дані коефіцієнти (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Значення коефіцієнтів, які залежать від форми поверхні, що отримується в результаті нанесення кремній-органічного покриття

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

Проведені досліди дозволяють дати оцінку впливу кремній-органічних поверхонь на потік в'язкої рідини в елементах систем генерування водяних потоків, які використовуються в пожежному обладнанні [273].

Висновки до розділу 3

1. Структуру потоку в пожежному стволі й насадці в можна описати, виходячи з уявлень про гідродинамічну початкову ділянку, а розміри насадки слід визначати, враховуючи так само й довжину гідродинамічної початкової ділянки, яка в загальному випадку може бути функцією не тільки числа Рейнольдса Re, але й числа Вайссенберга Wi.

2. Для випадку, коли використовувалася насадка із щілинним отвором для створення радіальних водяних струменів, було відзначене одержання водяної завіси з явною нерівномірністю товщини захисної водяної перепони. Встановлено, що внутрішньому каналу у насадках із щілинним отвором має надаватися форма, яка забезпечувала б рівність гідравлічних опорів на шляху від входу в насадку до будь-якої точки щілини на виході. Результати експериментів показали, що на відстані від щілини у 29% поперечного перерізу струменя зосереджується близько половини об'ємної маси струменя. Таким чином, водяний захист у зоні теплового впливу факела полум'я, що дозволяє поглинати теплову енергію факела, можна досягнути при меншій на 25% витраті води, при цьому зменшення зони надлишкової товщини струменя на 20% дозволяє зменшити витрати на 10% без погіршення здатності поглинання теплової енергії факела.

3. Підвищення довговічності та ефективності стволів і насадок може бути забезпечене використанням спеціальних покриттів, наприклад кремній-органічних. Так, для стволів типу РС-50 при витраті 2,7 л/с й тиску на вході 0,4 МПа хмара розпилу мала нормальний радіус 1,28 ... 2,10 м (розкид 39%). Після покриття внутрішніх каналів пожежних стволів кремній-органічним покриттям і повторення експериментів для усіх 10 стволів хмара розпилу мала нормальний радіус 1,24 ... 1,74 м (розкид 29%, тобто зменшився на 26%), при цьому витрати рідини зросли до 8%, а середня дальність на 0,7 м (2,4%).

РОЗДІЛ 4
ФОРМУВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ ТА ПУЛЬСУЮЧИХ ВОГНЕГАСНИХ РІДИННИХ ПОТОКІВ

Пульсуючі й імпульсні потоки викликають останнім часом великий практичний інтерес у зв'язку з високою ефективністю їх використання для пожежогасіння. Серед основних їх переваг необхідно відзначити економію рідини при фактичній відсутності зниження ефективності використання в порівнянні з суцільними струменями, високий коефіцієнт ексергії, здатність до розпорошення струменів.

4.1. Генератори імпульсів, класифікація, переваги й недоліки

Створення пульсуючих та імпульсних потоків може бути забезпечене застосуванням у системі генерування вогнегасних струменів окремого елемента – генератора пульсацій. Розробка методів розрахунку і створення вогнегасних струменів дозволяє реалізувати напрацювання накладення нестаціонарних пульсацій на стаціонарний потік. Вплив нестаціонарних пульсацій на процес розпаду струменя може бути описаний із використанням уявлень про хвильовий рух на поверхні рідини, запропонований В. Г. Лєвічем [84].

За результатами проведеного патентного аналізу всі відомі генератори імпульсних струменів, з урахуванням механізму дії та способу формування струменя робочого середовища (рідинного або газового), доцільно умовно класифікувати на п’ять базових типів: клапанні, поршневі, роторні, гідроударні та кумулятивні генератори імпульсних струменів [277]. При цьому слід підкреслити, що запропонований поділ має узагальнений характер, оскільки значна частина технічних рішень поєднує декілька принципів роботи, що унеможливлює їх однозначне віднесення до лише однієї групи.

Найчисельнішою з точки зору представленості є група генераторів імпульсних струменів клапанного типу, принцип функціонування яких схематично наведено на рис. 4.1. До цієї категорії належать пристрої, в яких утворення імпульсного струменя забезпечується періодичним відкриванням і закриванням одного або декількох клапанів, унаслідок чого відбувається подача окремих доз робочого середовища під визначеним тиском [278]. Від джерела, наприклад компресора, робоче середовище, будь-то рідина або газ, до даних пристроїв подається під деяким початковим тиском. Далі, проходячи через систему різних каналів, отворів і клапанів, робоче середовище переривчасто, у вигляді імпульсів струменя, подається у випускний канал. Тиск на виході при цьому може бути нижчим, рівним або перевищувати початковий тиск.

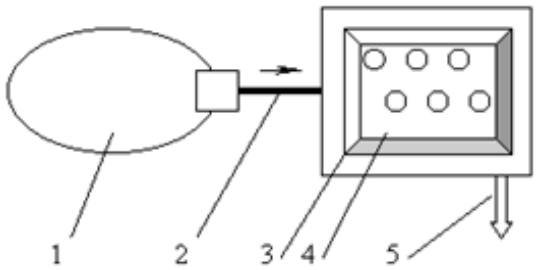


Рис. 4.1 – Принципова схема генератора імпульсних струменів клапанного типу: 1 – джерело тиску робочого середовища (компресор або ємність зі стисненим повітрям); 2 – підвідна магістраль; 3 – робочі механізми з набором каналів, отворів; 4 – система клапанів; 5 – випускний патрубок.

Розглянемо випадок, коли робочий струмінь подається під тиском з підвідного каналу, на напрямні, які формують робочий струмінь, за допомогою якого й приводяться в обертання турбіна й вал [278]. Далі потік спрямовується в простір за патрубком і через вікно виходить у відвідний канал. При обертанні патрубка вікно періодично збігається із сектором кругового кільця переривника й потік переривається, що приводить до різкого збільшення тиску, чому сприяє форма щілиноподібного вікна, яке забезпечує перекриття потоку і його звільнення за короткий проміжок часу. Частоту коливань тиску при незмінній

витраті середовища можна регулювати кількістю переривників потоку, установлених по периметру патрубка.

Клапани й переривники потоку мають різні принципи дії залежно від їхнього виконання й поставлених перед ними завдань. Є клапани обертові, із заданим числом отворів і каналів, які по черзі відкриваються, даючи періодично вихід робочому середовищу, тарілчасті, кулясті, поршневі й плунжерні, що здійснюють зворотно-поступальні рухи [278].

Перевагами генераторів імпульсних струменів клапанного типу є відсутність додаткового приводу, окрім як робочого середовища під тиском. Такі генератори найчастіше мають нескладну конструкцію й досить простий принцип дії, тобто є технологічними. Недоліком генераторів зі складною конструкцією виконання є наявність великої кількості компонентів з недостатньою герметичністю.

До генераторів імпульсних струменів поршневого типу [278], віднесені пристрої, у яких робочий тиск рідини створюється за допомогою поршневих або плунжерних блоків, що приводяться в дію обертовим кулачковим валом (рис. 4.2).

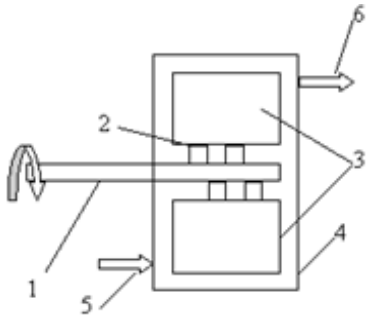


Рис. 4.2 – Принципова схема генератора імпульсних струменів поршневого типу:
1 – приводний вал; 2 – поршневі або плунжерні пари; 3 – робочі камери;
4 – робоче обладнання із системою гідроліній; 5 – впускний патрубок;
6 – випускний патрубок.

Генератори цього типу, окрім гідроліній та приводного вала, конструктивно містять корпус, у якому розміщені блоки циліндрів, а також поршні або плунжери, що формують у циліндрах замкнені робочі порожнини. У

процесі обертання приводного вала кулачкові елементи впливають на поршні, унаслідок чого відбувається періодична зміна об’єму рідини. Сформований таким чином пульсуючий потік об’єднується в гідролініях і надходить до камер виконавчого обладнання, де й утворюється імпульсний струмінь.

На відміну від генераторів клапанного типу, у зазначених пристроях робоче середовище не подається під заздалегідь створеним постійним тиском, оскільки необхідний рівень тиску формується безпосередньо самим генератором у процесі його роботи. Головною перевагою таких генераторів є можливість досягнення значно вищих значень робочого тиску порівняно з клапанними аналогами. Водночас до їх недоліків слід віднести потребу в окремому приводі для обертання вала, а також підвищену конструктивну складність.

Характерною особливістю генераторів імпульсних струменів роторного типу є використання вузла «ротор–статор» [278], який є ключовим елементом у процесах нагнітання тиску та формування пульсуючого струменя робочого середовища (рис. 4.3).

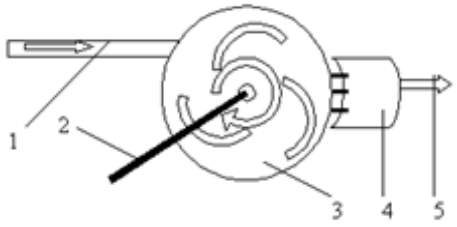


Рис. 4.3 – Принципова схема генератора імпульсних струменів роторного типу:
1 – підвідний патрубок ; 2 – приводний вал; 3 – ротор з робочими камерами;
4 – робоче обладнання із системою гідроліній; 5 – випускний патрубок.

Під час обертання ротора, оснащеного замикаючими елементами, робоча рідина через всмоктувальний канал надходить у робочу камеру гідропульсатора, після чого під тиском подається через нагнітальний отвір до відповідного виконавчого механізму, забезпечуючи формування імпульсу тиску. Не заглиблюючись у деталі функціонування таких пристроїв, можна зазначити, що на виході формується пульсуючий струмінь робочого середовища.

Ротор зазвичай характеризується складною геометрією, різноманітною формою та системою отворів. У процесі його обертання ці отвори циклічно перекриваються та відкриваються, унаслідок чого відбувається періодичне нагнітання тиску і порційне витікання рідини. До основних переваг генераторів роторного типу належить здатність забезпечувати високу частоту пульсацій за одночасно значної енергетичної потужності вихідного струменя. Разом з тим, їх суттєвим недоліком є відносно висока конструктивна складність.

До окремої групи ми віднесли генератори імпульсів, що використовують принцип гідроудару [278]. Рідина в даних обладнаннях протікає по трубопроводу з певною швидкістю (рис. 4.4). При різкому перекритті трубопроводу кінетична енергія рідини перетвориться в енергію тиску, таким чином, у трубопроводі різко наростає високий тиск. У результаті відкривається клапан і струмінь, що має високу енергію, витікає з отвору або сопла. При падінні тиску клапан різко закривається, тим самим, герметизизує трубопровід по якому протікає рідина. Клапан, що перекриває трубопровід, працює із заданою періодичністю, яку забезпечує приводне обладнання. Перевагою генераторів даного типу є простота конструкції й висока енергія вихідного струменя. Недоліком є або втрата робочої рідини або зайві витрати на кільцювання системи.

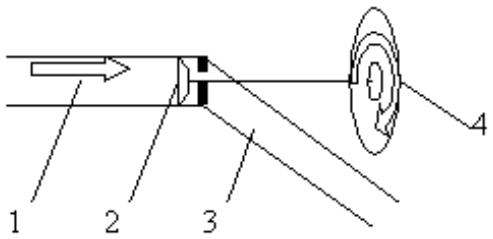


Рис. 4.4 – Принципова схема генератора імпульсних струменів гідроударного типу: 1 – трубопровід; 2 – запірний клапан; 3 – відвідний канал; 4 – привідний пристрій для щвидкого спрацьовування клапана.

До п'ятої групи генераторів імпульсів струменів можна віднести генератори кумулятивного типу. Ці генератори приводяться в дію або за

допомогою електричних імпульсів або за допомогою робочого середовища, що знаходиться під високим тиском. До складу генератора (рис. 4.5) входить робоча камера, у якій власне й акумулюється висока енергія струменя робочого середовища. Перевагами генераторів даного типу є простота конструкції й висока енергія вихідного імпульсного струменя.

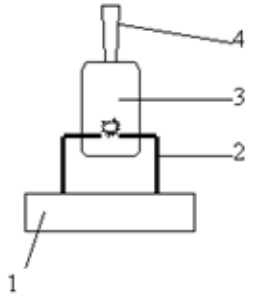


Рис. 4.5 – Принципова схема генератора імпульсних струменів кумулятивного типу: 1– генератор електричних імпульсів; 2 – підвідні лінії; 3 – робоча камера; 4 – випускний патрубок.

Для визначення критеріїв, що характеризують імпульсні потоки, більш докладно розглянемо характеристики імпульсних генераторів поршневого типу. Незважаючи на те, що технічні рішення в кожному конкретному випадку мають свою специфіку, можна припустити, що основні фактори, що впливають на швидкість витікання струменів v на виході є для них спільними.

4.2. Математична модель пульсуючих потоків, що можуть бути застосовані для пожежних стволів, насадок і установок водяного пожежогасіння

4.2.1. Ламінарний пульсуючий рух в’язкої рідини у пожежному стволі з круглим поперечним профілем внутрішнього каналу

Питання руху в’язкої рідини у циліндричному каналі з круговим поперечним профілем для ламінарного пульсуючого руху детально висвітив

Л. Г. Лойцянський [30]. Процеси руху рідини у пожежному стволі, насадці, чи у системі трубопроводів установок водяного пожежогасіння можуть бути описані відповідними рівняннями. Основне диференціальне рівняння для ламінарного нестаціонарного руху в циліндричному каналі з круговим поперечним профілем, що може мати місце у системі трубопроводів установок водяного пожежогасіння, запишемо у циліндричних координатах. Якщо вибрати вісь руху рідини уздовж вісі ствола $0z$, серед компонент u, v, ω вважатимемо відмінною від нуля тільки осьову компоненту швидкості. Відповідно до рівнянь Нав'є-Стокса для ізотермічного потоку (густина ρ і коефіцієнт вязкості μ є константами, для ортогональних осей x,y,z та компонентами швидкості u, v, ω) маємо [30]

$$0 = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}\,, 0 = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}\,,$$

$$w = \frac{\partial \omega}{\partial z} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + \nu\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2}\right), \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0,$$

і, як наслідок,

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \mu\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}\right). \tag{4.1}$$

У випадку не довільного, а круглого перетину (4.1) для циліндричних координат перепишемо у вигляді

$$\frac{1}{\rho} f(t) = \frac{\partial \omega}{\partial t} - \nu\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \omega}{\partial r}\right), \tag{4.2}$$

де $\frac{\partial \omega}{\partial t}$ – локальне прискорення, $f(t) = -\frac{\partial p}{\partial z}$.

Оскільки рух осесиметричний, в момент часу $t = 0$ початкова умова $\omega = \omega_0(r)$, а гранична умова $\omega = 0$ для точки $r = a$ (a – радіус внутрішньої поверхні ствола).

Якщо закон зміни перепаду тиску у стволі гармонічний, сталий пульсуючий рух $f(t) = \rho A \cos(\omega t)$. При введенні змінної $\tau = \nu t$ можна отримати [30]

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \varphi}{\partial r}, \tag{4.3}$$

частинний розв'язок якого міститиме функції Кельвіна $ber(x)$ та $bei(x)$, як дійсну і уявну частини бесселевої функції нульового порядку від комплексного аргументу. Тому шуканий розподіл швидкостей матиме вигляд [30]

$$\omega(r,t) = \frac{A}{\omega} \cdot$$

$$\cdot \left\{ \left[1 - \frac{bei\left(a\cdot\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right)\cdot bei\left(r\cdot\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right)}{ber^2\left(a\cdot\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right) + bei^2\left(a\cdot\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right)} - \frac{ber\left(a\cdot\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right)\cdot ber\left(r\cdot\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right)}{ber^2\left(a\cdot\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right)\cdot bei^2\left(a\cdot\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right)} \right] \cdot \sin(\omega t) + \right.$$

$$\left. + \frac{bei\left(a\cdot\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right)\cdot ber\left(r\cdot\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right) - ber\left(a\cdot\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right)\cdot bei\left(r\cdot\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right)}{ber^2\left(a\cdot\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right)\cdot bei^2\left(a\cdot\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}\right)} \cdot \cos(\omega t) \right\}. \tag{4.4}$$

Для (4.2) відповідно до Слєзкіна М.О. [279] у випадку раптово прикладеного перепаду тиску розподіл швидкостей

$$\omega(r,t) = a^2 \frac{\Delta p}{4\mu l}\left[1 - \frac{r^2}{a^2} - 8\sum_{k=1}^{\infty} exp\left(-\frac{\nu\lambda_k^2 t}{a^2}\right)\frac{J_0(\lambda_k r/a)}{\lambda_k^3 J_1(\lambda_k)}\right], \tag{4.5}$$

де J_0 і J_1 – бесселеві функції 0-го та 1-го порядків, а λ_k – корені рівняння $J_0(\lambda_k) = 0$.

4.2.2. Розподіл швидкостей та напружень у пульсуючих потоках

У гідравлічних системах широке поширення одержали нестаціонарні течії в трубах і каналах з певною формою поперечного перерізу. У нашому випадку інтерес становлять течії, у яких насадки використовуються як елементи систем формування струменів для пожежогасіння.

Імпульсний спосіб гасіння пожеж вважається перспективним способом. Імпульсний рух (імпульс) являє собою векторну величину, рівну для матеріальної точки добутку маси m цієї точки на її швидкість v і спрямовану так само, як вектор швидкості. Відзначимо, що імпульсний рух є окремим випадком пульсуючого потоку, оскільки є розривним. Висока ефективність імпульсного

пожежогасіння підтверджується поки ще «обережними спробами» застосування даних нових технологій [138]. У зв'язку із цим виникає необхідність дослідження зазначених потоків з метою виявлення зміни в часі локальних характеристик потоків.

Одним з окремих випадків руху рідини у пожежному стволі є пульсуючий рух. У більшості випадків для практичних застосувань має смисл використовувати циліндричні труби із круговим профілем поперечного переріза [217, 287]. Для (4.4) запишемо

$$\left.\begin{aligned} ber(x) &= re\{J_0(x\sqrt{i})\} = 1 - \frac{x^4}{2^2 4^2} + \frac{x^8}{2^2 4^2 6^2 8^2} - \cdots, \\ bei(x) &= -im\{J_0(x\sqrt{i})\} = \frac{x^4}{2^2 4^2} - \frac{x^8}{2^2 4^2 6^2 8^2} + \frac{x^{10}}{2^2 4^2 6^2 8^2 10^2} \ldots \end{aligned}\right\}.$$

Відзначимо, що зазначені аналітичні вирази відповідають пульсуючому руху, що встановився, з гармонійним законом зміни перепаду тиску в трубі $f(t) = \rho A \cos(wt)$.

Усі рівняння, що були записані вище, можна вважати справедливими лише за умови, що сили інерції від конвективного прискорення не великі й на струмінь впливають лише сили в’язкого тертя.

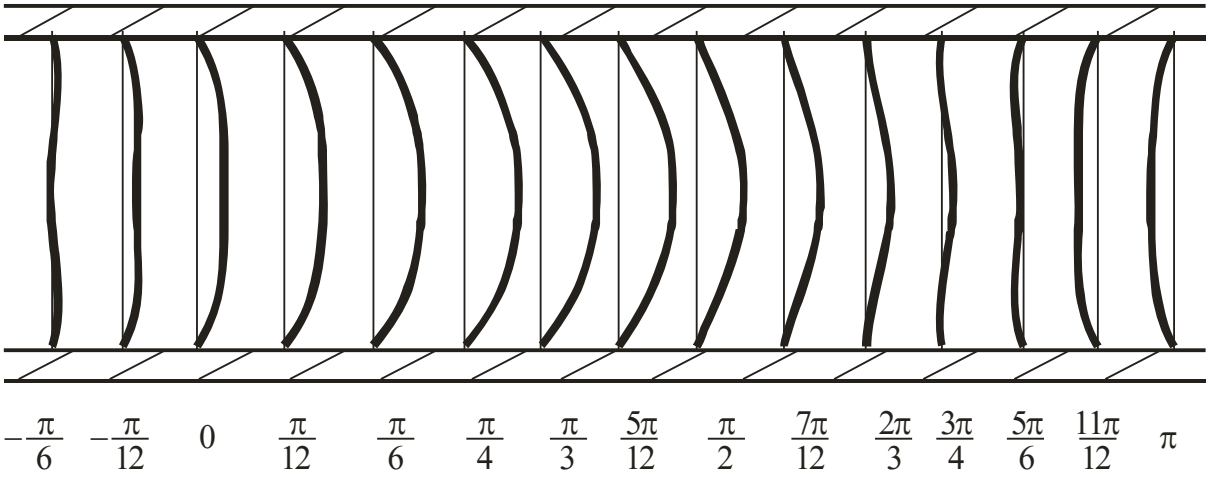


Рис. 4.6 – Епюри швидкостей для параметра $a\sqrt{\rho\frac{\omega}{\mu}} = 2{,}849$ [287]

Картина зміни епюр швидкостей в часі [287] для значень параметра $a \cdot \sqrt{\rho\frac{\omega}{\mu}}$ подана на рис. 4.6. По вісі абсцис вказані моменти часу.

У даному випадку гармонійні зміни перепаду тиску в пожежному стволі забезпечуються генератором імпульсів. Як було зазначено, аналіз існуючих генераторів дозволив виділити серед них п'ять основних типів: генератори імпульсних струменів клапанного, поршневого, роторного, гідроударного й кумулятивного типів. Такий поділ проводився залежно від принципів дії та способів генерування струменів.

Відомо [280, 281], що на формування течії в граничному прошарку вплив чинять в'язкість, теплопровідність і дифузійна здатність рідини. Усередині динамічного граничного прошарку відбувається плавна зміна швидкості від її значення в зовнішньому потоці до нуля на стінці, внаслідок прилипання в'язкої рідини до твердої поверхні. Керування шириною цього прошарку може допомогти розв'язати проблему збільшення коефіцієнта корисної дії ствола за рахунок збільшення ядра потоку й чисельного значення його імпульсу й енергії [66, 282].

На рис. 4.7–4.9 подані епюри швидкостей для різних значень параметра $a \cdot \sqrt{\rho \frac{\omega}{\mu}}$, з яких видно наскільки різною може бути картина руху рідини у стволі, залежно від радіусу, фази, частоти, в'язкості. Зазначене дає можливість зрозуміти у який спосіб потрібно намагатись отримувати течії, які володіли б потрібними параметрами, за рахунок врахування основних важелів впливу на процес струминоформування.

Крім того, велике значення має форма епюри швидкостей. Для одержання максимального ефекту дії струменя з позиції його ударної сили, що забезпечує дальність генерування струменя, форма епюри в частині ядра струменя на виході насадки повинна бути близькою до прямокутної. Максимальні розміри площі прямокутника свідчать про максимальну кінетичну енергію струменя, що досягається шляхом добору її параметрів (у першу чергу фази й частоти).

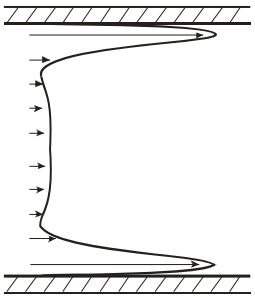


Рис. 4.7 – Епюра швидкостей для різних значень параметрів (радіус r = 0,02095 м; фаза 0,0954; частота F= 28 Гц; в'язкість 7E–3)

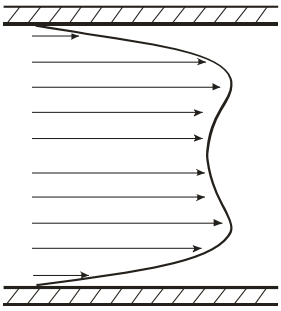


Рис. 4.8 – Епюра швидкостей для різних значень параметрів (радіус r = 0,05095 м; фаза 1,94779; частота F= 34 Гц; в'язкість 0,02)

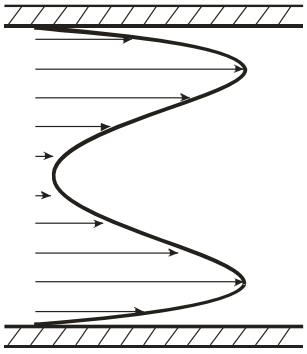


Рис. 4.9 – Епюра швидкостей для різних значень параметрів (радіус r = 0,02095 м; фаза 0,0954; частота F= 28 Гц; в'язкість 9E–3)

Перспективними є дослідження, які дозволили б одержати керовані розпилені струмені, а це можна досягнути лише за умови детального вивчення й моделювання потоків з можливістю оперативного варіювання їх основними характеристиками з метою вибору оптимальних параметрів стволів.

Локальна кінетична енергія потоку. Вивчення поняття локальної кінетичної енергії потоку має особливий сенс для подальших досліджень, перед усім для визначення умов забезпечення найвищих ексергійних показників [283] системи струминоформування.

Як видно з рис. 4.10, картина епюр для швидкостей і енергії принципово відрізняється лише відсутністю в останніх «зон відставання» (негативної складової).

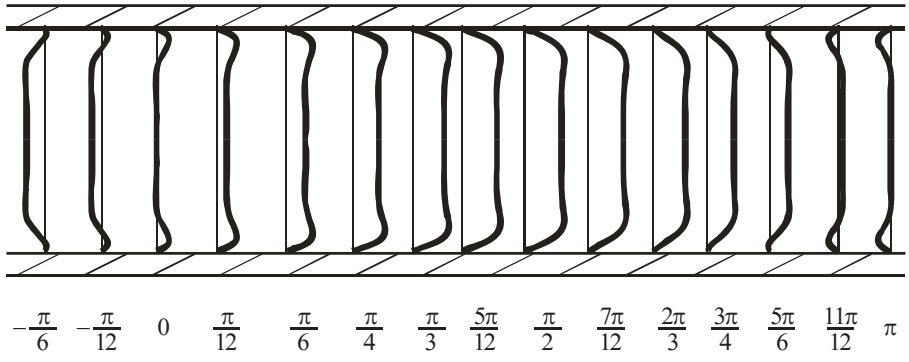


Рис. 4.10 – Епюри швидкості та енергії для параметра $a \cdot \sqrt{\rho \frac{\omega}{\mu}} = 11{,}672$ [30]

Найчастіше на практиці має сенс використання поняття середньої швидкості потоку $u_{\text{сер}}$. У нашому випадку також можна використати поняття $u_{\text{сер}}$, оскільки для кругових перерізів форму потоку можемо вважати симетричною.

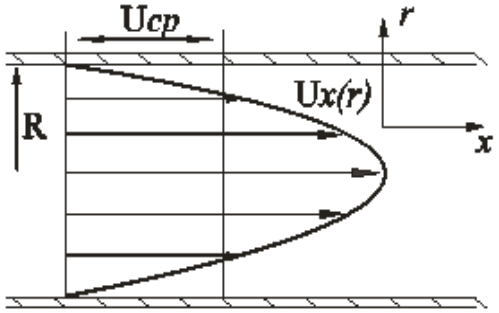


Рис. 4.11 – Епюра розподілу швидкостей у каналі ствола

У такому випадку важливим є одержання більш високого чисельного значення середньої швидкості потоку $u_{\text{сер}}$ й максимально, на скільки це можливо, близької форми ядра потоку до прямокутної форми, що й вивчалося із застосуванням створеної комп'ютерної програми моделювання потоку.

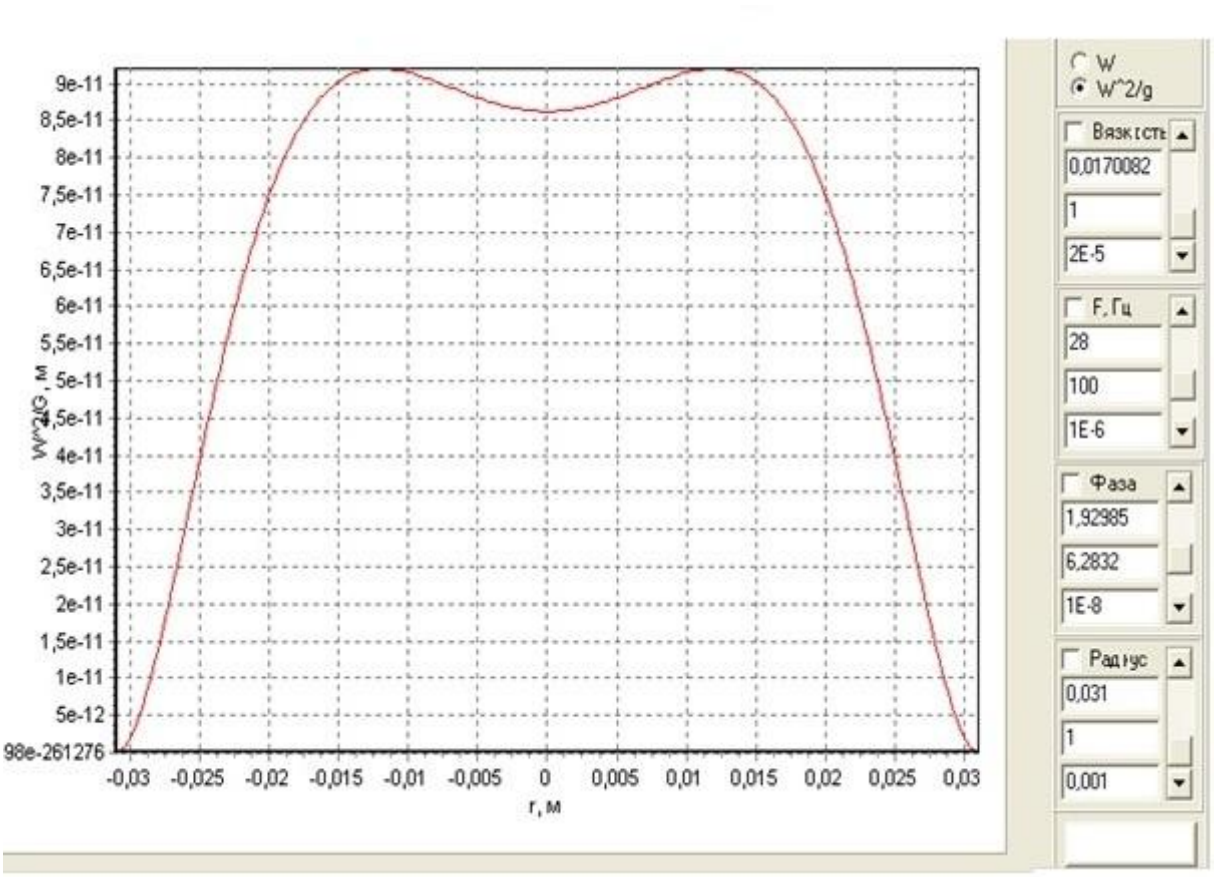


Рис. 4.12 – Приклад роботи програми моделювання потоку в каналі пожежного ствола

Зауважимо, що використання поняття середньої швидкості $u_{\text{сер}}$ забезпечується тим, що кількість рідини Q, яка проходить за одиницю часу t через площу поперечного перерізу S буде для середньої швидкості $u_{\text{сер}}$ відповідати реальній витраті $Q = u_{\text{сер}}S$.

Моделювання процесу руху вогнегасної речовини в обмеженому об'ємі ствола шляхом підбору її параметрів (фази і частоти) здійснювалось завдяки авторській програмі Tube1.1© (співавтор-програміст О. Пірогов), яка суттєво

спрощує вибір його оптимальних параметрів (геометричні розміри й технічні особливості ствола, насадки).

Покажемо яким чином залежить форма епюри від основних характеристик ствола та потоку, якими можна варіювати, здійснюючи комп'ютерне програмне моделювання потоку [284].

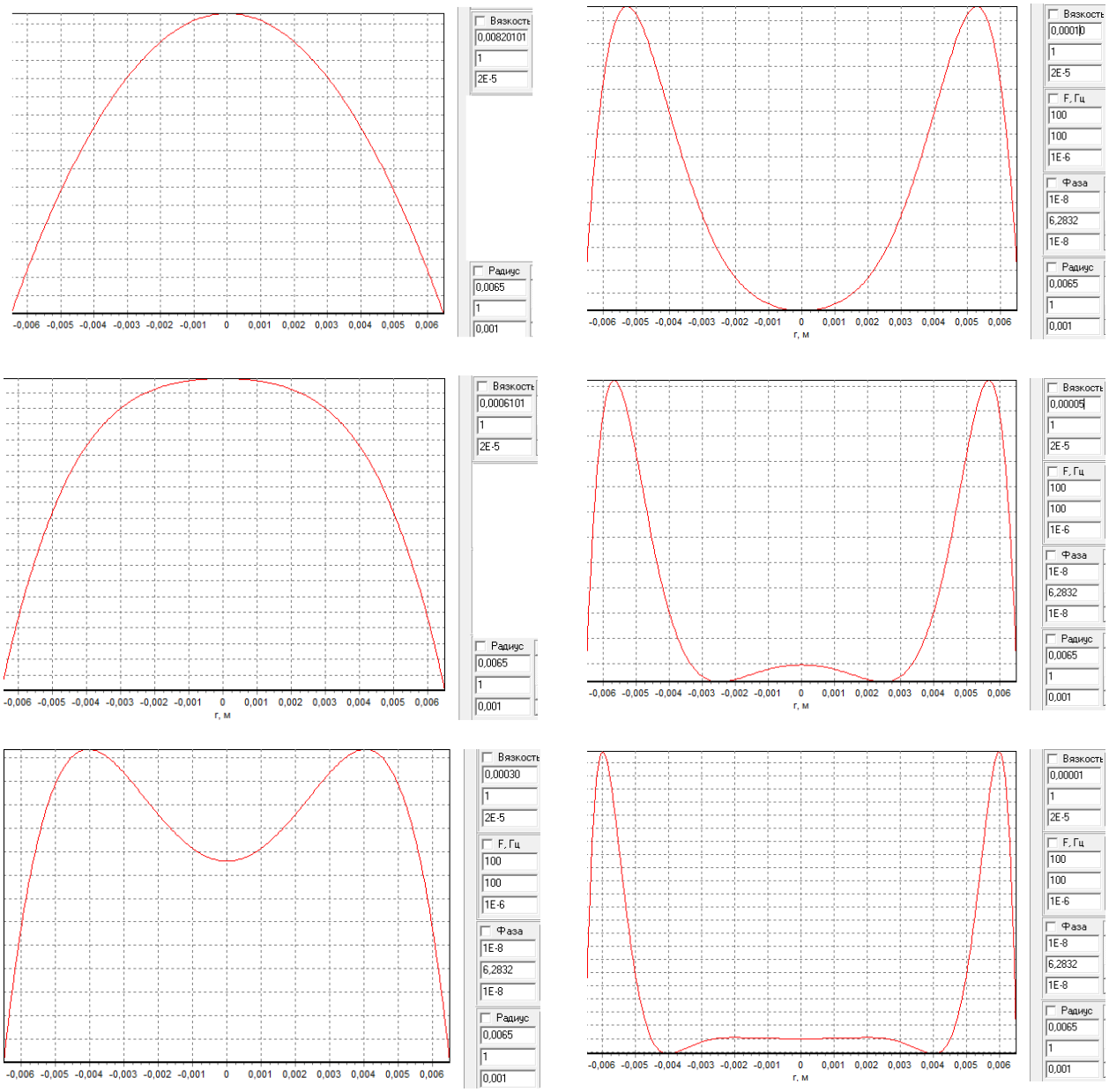


Рис. 4.13 – Приклад роботи програми моделювання потоку в каналі (варіювання в'язкістю, зменшення)

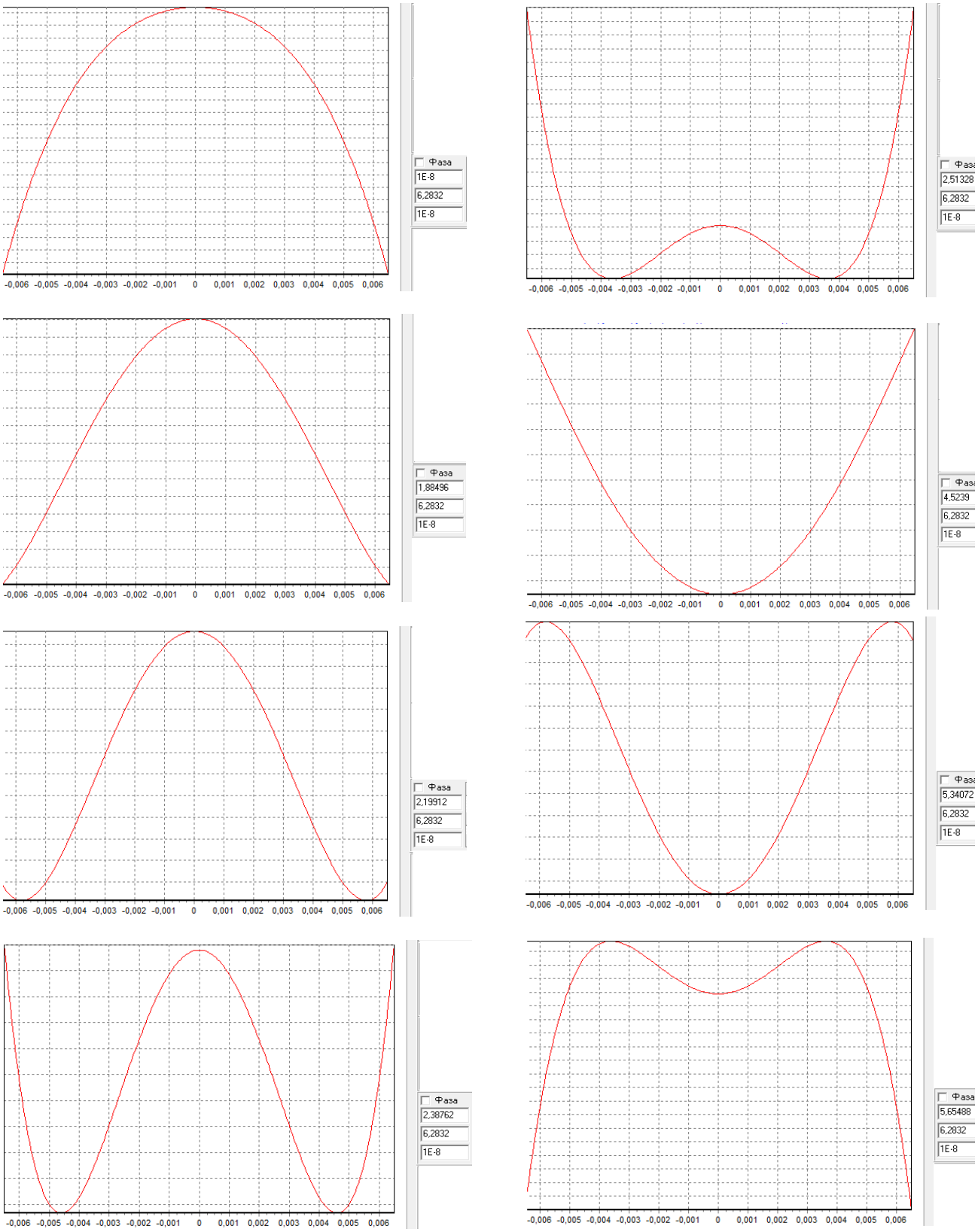


Рис. 4.14 – Приклад роботи програми моделювання потоку в каналі (варіювання фазою, зменшення)

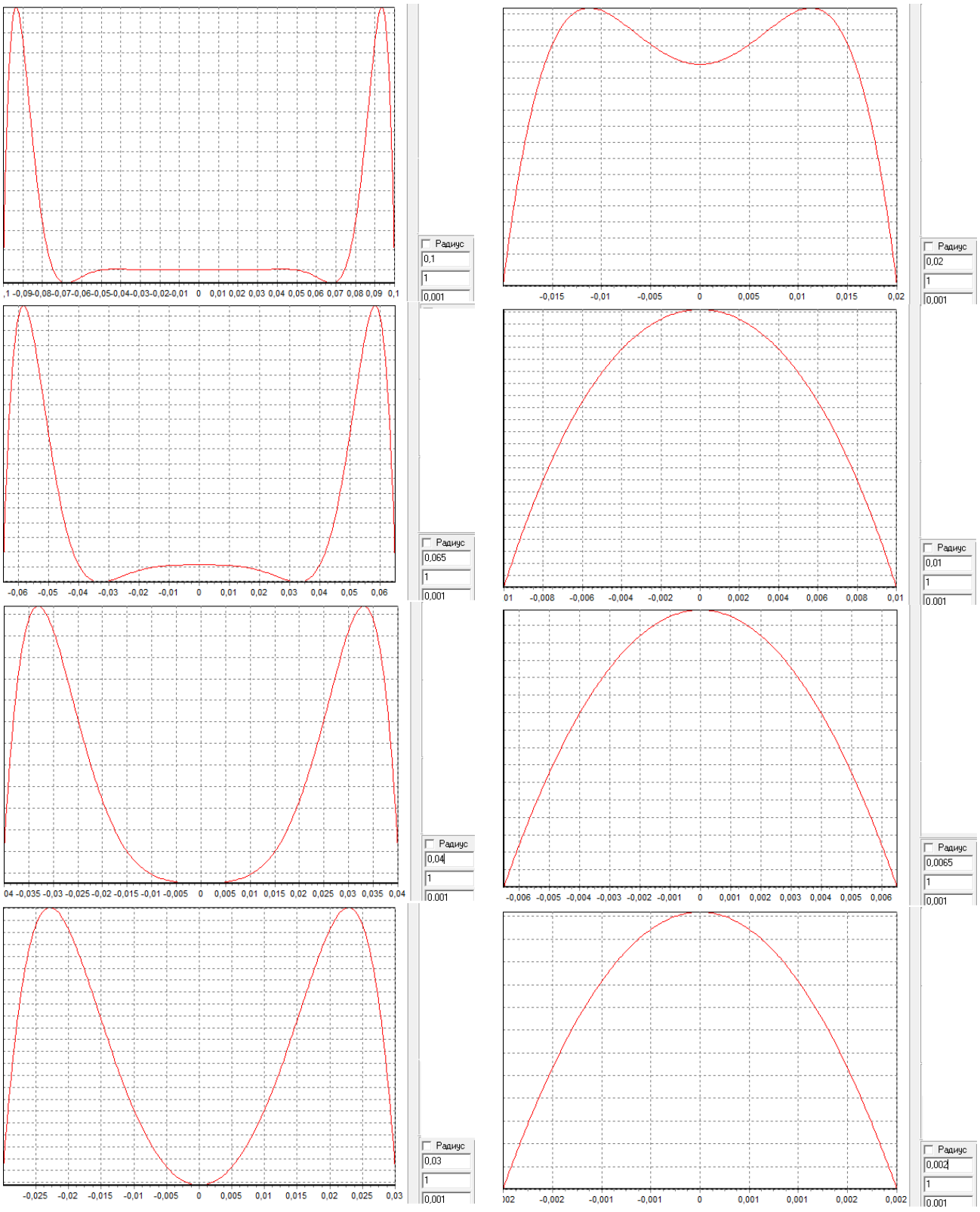


Рис. 4.15. – Приклад роботи програми моделювання потоку в каналі (варіювання радіусом, зменшення)

Картини залежності форми епюр від основних характеристик ствола та потоку, якими можна варіювати (рис. 4.13 – 4.15), вказують, з одного боку, на

можливість та необхідність комплексного врахування всіх чинників впливу на процес струминоформування, а з іншого, на важливість чіткого встановлення меж основних характеристик потоку, в рамках яких і мають відбуватися подальші дослідження.

4.2.3. Основні принципи генерування імпульсних та пульсуючих потоків у гідравлічному пожежному обладнанні та критерії, що характеризують такі потоки

Як відомо, застосування пульсуючих струменів у пожежогасінні у деяких випадках може бути більш ефективним у порівнянні зі стаціонарними потоками (струменями).

Суттєвим аспектом застосування імпульсних струменів у процесі пожежогасіння та проведення аварійно-рятувальних заходів є особливості взаємодії струменя з об’єктом впливу або середовищем, у якому відбувається гасіння. Результативність функціонування генератора імпульсних струменів, а відповідно й ефективність усієї системи імпульсного пожежогасіння, передусім визначається характером дії вогнегасної речовини на осередок пожежі.

До базових механізмів припинення процесу горіння належать: зниження температури в зоні горіння та осередку пожежі, відокремлення окиснювача від горючої речовини, зменшення концентрації паро- та газоповітряної суміші до безпечного рівня, а також уповільнення або припинення хімічних реакцій горіння. Більшість відомих вогнегасних речовин впливають на процес гасіння комплексно, однак для кожної з них характерна домінуюча вогнегасна властивість, яка в конкретних умовах є вирішальною. Так, як зазначалося раніше, для води визначальним чинником є її здатність ефективно охолоджувати зону реакції.

Розпилені струмені, у порівнянні із суцільними, забезпечують вищу вогнегасну ефективність, головним чином завдяки значному збільшенню сумарної поверхні контакту крапель із полум’ям. Пульсуючі струмені, як

правило, формуються за високого тиску, що дає змогу отримати дрібнодисперсну структуру вогнегасної речовини з підвищеними показниками ефективності впливу на осередок пожежі.

Генератори імпульсних струменів клапанного, поршневого, роторного, гідроударного і кумулятивного типів дозволяють накладати пульсації на потік, що суттєво позначається на його властивостях, наприклад, на здатності до розпорошення.

Критерії, що характеризують імпульсні потоки. Пульсуючі струмені найчастіше подаються під великим тиском, в результаті чого досягається досить ефективна з вогнегасних позицій тонкодисперсна структура вогнегасної речовини.

Для створення імпульсних струменів з потрібними параметрами для самого різного технологічного обладнання [141, 142], і таких, які б, скажімо, оптимальним чином забезпечували виконання поставлених задач пожежогасіння, потрібно створити систему, яка складалася б щонайменше з трьох основних частин: генератора, ствола-насадки і системи управління.

Аналіз роботи генератора можна провести, базуючись на теорії розмірностей [230]. У результаті аналізу принципів роботи поршневих генераторів імпульсних струменів і даних випробувань деяких з них, можемо записати [217, 278]

$$u = f(n, \rho, \nu, p, N, Q, n_i, \delta), \tag{4.6}$$

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

$$\Pi = \frac{u}{\sqrt{n\nu}}, \Pi_1 = \frac{p}{n\rho\nu}, \Pi_2 = \frac{N}{\rho\nu^2\sqrt{n\nu}},$$
$$\Pi_3 = \frac{Q\sqrt{n^3}}{\sqrt{\nu^3}}, \Pi_4 = \frac{n_i}{n}, \Pi_5 = \frac{\delta\sqrt{n}}{\sqrt{\nu}}, \tag{4.7}$$

де u – швидкість струменя на виході генератора, p – тиск спрацьовування клапана, N – потужність генератора, Q – об’єм разового викиду речовини, n та n_i

– відповідно частота обертів приводного валу і частота імпульсів, ν – в’язкість речовини, δ – зазор між поршнем і циліндром.

Найважливіше, що вказані параметри обумовлюють зв'язок між механічною системою створення пульсацій й гідравлічними параметрами струменя.

Таким чином, використовуючи π–теорему, вдалося зменшити число змінних, від яких залежить шукана величина, отримавши безрозмірні комплекси. Як видно з співвідношень (4.7), багато з наведених комплексів є характеристиками розглянутих генераторів пульсацій. По суті, вони визначають зв'язок між механічною системою створення пульсацій і гідравлічними параметрами струменя [71, 205].

Надалі дослідження параметрів, згрупованих у вигляді безрозмірних комплексів, як і у випадку отримання безрозмірних критеріїв для однорідної та аномально в'язкої рідин, має призвести до істотного скорочення експериментальних досліджень та спрощення апроксимації. У той же час, аналіз вказує на істотну роль імпульсних генераторів в обладнанні подібного типу для гасіння осередків горіння.

Таким чином, вибір типу генератора, як основного елемента імпульсної системи, з п'яти запропонованих груп залежить від конкретного характеру дій пожежогасіння.

4.3. Особливості пульсаційного плину рідини в циліндричних каналах пожежних стволів і насадок

Існуючі конструкції циліндричних каналів пожежних стволів і насадок, як пристроїв для створення і спрямування струменів води, піни, порошку та інших вогнегасних речовин, дозволяють отримувати найрізноманітніші струмені, які можуть використовуватися для гасіння або локалізації пожеж, створення водяних туманних теплових полів, хмар розпорошеної рідини тощо. Пожежні стволи і насадки дозволяють отримувати суцільні і розпорошені струмені, а

також перекривати потік, не відключаючи при цьому пристрій живлення. Найчастіше отримані технічні рішення носять лише інженерний характер, при цьому наукова сторона питання не береться до уваги, або ж майже не враховується. Детальне наукове вивчення процесів формування струменів [285] дозволило б отримувати кращі інженерні рішення, фактично більш гнучко підійти до вирішення «тисячолітньої» проблеми створення ефективних технічних засобів гасіння пожеж.

Перспективним способом гасіння пожеж вважається імпульсний спосіб. Імпульсний рух (імпульс) являє собою векторну величину, рівну для матеріальної точки добутку маси m цієї точки на її швидкість v й спрямовану так само, як вектор швидкості. Імпульсний рух є окремим випадком пульсуючого потоку, оскільки є розривним. Висока ефективність імпульсного пожежогасіння підтверджується експериментально, проте спроби застосовувати дані нові технології поки ще є малоактивними. Пояснити таку ситуацію, окрім високої вартості, можна невеликою кількістю технічних засобів-реалізацій, що базуються на використанні імпульсного пожежогасіння та, відповідно, недостатньо «пропрацьованими» методиками їх застосування. Дослідження зазначених потоків повинно дозволити реалізувати «потенціал» для підвищення ефективності пожежогасіння, що у них закладений. Для цього потрібно виявити зміни із часом локальних характеристик пульсаційних потоків.

Одним з випадків руху рідини по каналам є пульсуючий ламінарний рух, якісно описаний вперше Дж. Уомерслі для судин [286]. В більшості випадків для практичних застосувань є сенс використовувати циліндричні труби з круговим профілем поперечного перерізу, у пожежній справі такими є циліндричні канали пожежних стволів, насадок і систем трубопроводів установок водяного пожежогасіння. Найперші роботи щодо дослідження потоків для подібних випадків слід відносити до 1879 року [287]. Розгляд пульсуючого ламінарного руху пов'язаний із використанням функцій Бесселя. Для аналітичного виразу (4.4) розподілу швидкостей [30, 287] $J_0\left(x\sqrt{i}\right)$ – бесселева функція нульового порядку від комплексного аргументу, а дійсні функції Кельвіна $ber(x)$ та

$bei(x)$ представляють дійсну і взяту з протилежним знаком уявну частини $J_0\left(x\sqrt{i}\right)$ (Re – дійсна, Im – уявна частини).

Рівняння (4.4) записане із врахуванням, що рух осесиметричний, в 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 рівнянням (4.5).

Усі рівняння, що були раніше записані, можна вважати справедливими лише за умови, що сили інерції від конвективного прискорення не великі і на струмінь впливають сили в'язкого тертя.

Звичайно ж, епюри швидкостей, в які входять функції Кельвіна, досить показові, але в нашому випадку більш цікавими є епюри енергії. Зрозуміло, що мова йде про кінетичну енергію потоку в циліндричних трубах з круговим профілем поперечного перерізу.

Дослідження показали, що характеристики потоку всередині ствола значно змінюються при варіюванні його ключових параметрів – для цього була створена спеціальна програмна модель, яка дозволяє ефективно імітувати рух вогнегасної речовини в обмеженому об’ємі ствола. Завдяки цьому стало можливим оцінювати й підбирати оптимальні параметри конструкції з урахуванням кількох факторів – технологічності виготовлення, витрати вогнегасної речовини, економічної ефективності та, найважливіше, енергетичних характеристик потоку. Саме ці характеристики визначають, наскільки результативним буде процес пожежогасіння та забезпечують максимальну ефективність роботи ствола.

Важливим висновком розгляду епюр швидкостей і енергій може стати встановлення функціональної залежності ширини граничного прошарку від тих чи інших характеристик потоку речовини.

Окрім в'язкості, теплопровідності і дифузійної здатності рідини, велике значення має форма епюри швидкостей. На виході насадки для отримання максимального ефекту дії струменя форма епюри в частині ядра струменя повинна бути близькою до прямокутної.

4.4. Розподіл локальної кінетичної енергії пульсуючого потоку в струминоформуючому каналі пожежного ствола

Отримання більш високого чисельного значення середньої швидкості потоку $u_{\text{сер}}$ і максимально, на скільки це можливо, близької форми ядра потоку до прямокутної форми є вкрай важливим із позицій отримання струменів максимальної дальності та значення сили взаємодії (ударної сили) струменя з перешкодою.

Зауважимо, що використання поняття середньої швидкості $u_{\text{сер}}$ справедливо у випадку, коли кількість рідини Q, що проходить за одиницю часу t буде для середньої швидкості $u_{\text{сер}}$ відповідати реальній кількості [71]

$$Q = \int_S u(S)\, dS = u_{\text{сер}} S \ , \tag{4.8}$$

де S – площа поперечного перерізу каналу, а швидкість елементарної цівки (елементарного струменя) залежить від її ординати

$$u_x(r) = f(r) \ . \tag{4.9}$$

В результаті нескладних математичних перетворень і, враховуючи, що кінетична енергія

$$E_k = \int_S \frac{\rho g u(S)}{g} \frac{u^2}{2} = \frac{\rho}{2} \int_S u^3(S)\, d(S) =$$

$$= \frac{\rho}{2} \int_S \left(u_{\text{сер}} \pm \Delta u\right)^3 d(S) = \frac{\rho}{2} \int_S {u_{\text{сер}}}^3 + \quad , \tag{4.10}$$

$$+ \frac{\rho}{2} \int_S 3 u_{\text{сер}} \Delta u^2 dS = \frac{\rho u_{\text{сер}}^2}{2} \left(1 + 3 \frac{\int_S \Delta u^2 dS}{{u_{\text{сер}}}^2 S}\right)$$

запишемо відомий вираз для кінетичної енергії потоку в цілому [71]

$$K_{\text{П}} = \frac{u_{\text{сер}}^3}{2g} \left(1 + 3 \frac{\int_S \Delta u^2 dS}{{u_{\text{сер}}}^2 S}\right) = \frac{u_{\text{сер}}^2}{2g} \alpha \ , \tag{4.11}$$

де α – коефіцієнт Коріоліса

$$\alpha = 1 + 3\frac{\int_S \Delta u^2 dS}{u_{\text{сер}}{}^2 S}, \qquad (4.12)$$

що враховує нерівномірність розподілу швидкостей елементарних цівок $u_x(r)$ за площею перерізу потоку S.

У правій частині виразу для конкретного каналу змінюватися буде тільки приріст швидкості Δu. Для нестаціонарного режиму цей коефіцієнт є функцією часу $\alpha(t)$, причому при $\Delta u \approx 0 \Rightarrow \alpha = 1$.

Моделювання процесу руху вогнегасної речовини в обмеженому об'ємі ствола стало можливим після складання програми, яка спрощує вибір його оптимальних параметрів (§4.2.2). У першу чергу мова йде про геометричні розміри і конструкційні особливості пожежного ствола.

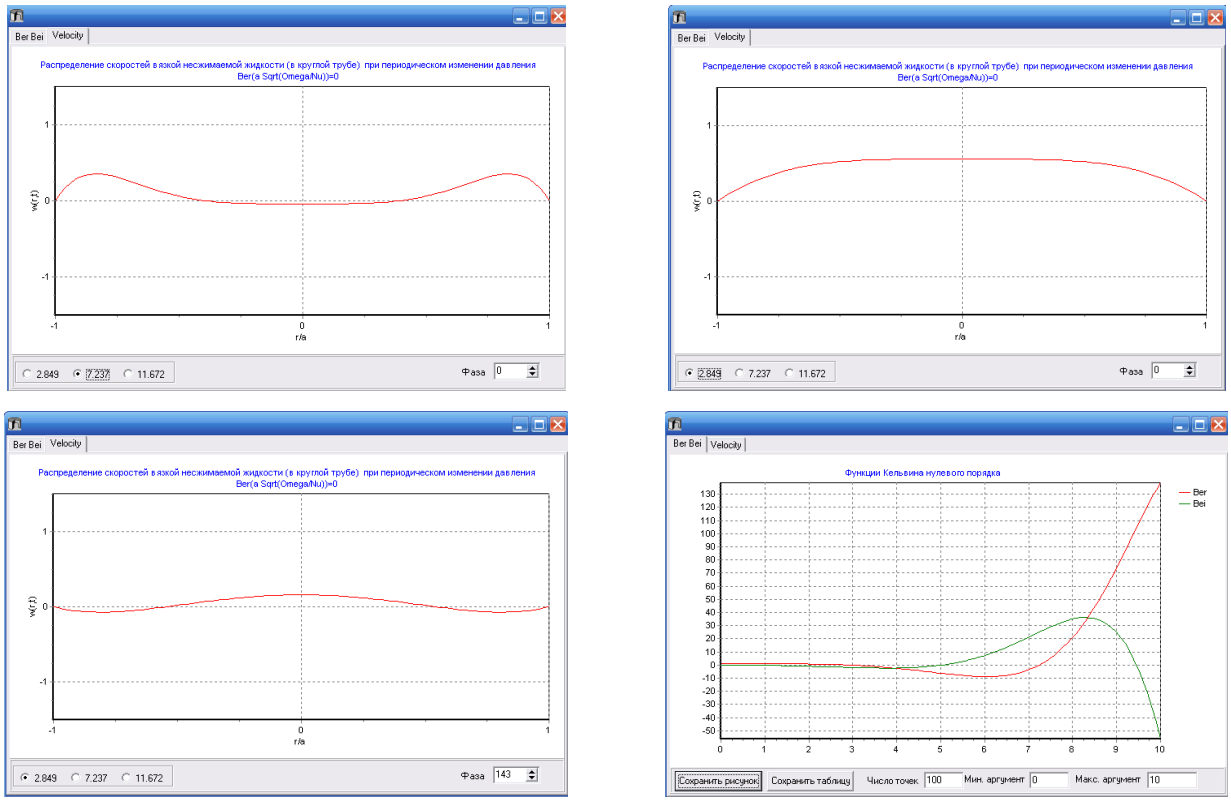


Рис. 4.16 – Приклад роботи програми моделювання потоку в каналі Tube1.1©

Проведені спрощення, в зв'язку з заміною реального потоку змодельованим, повинні враховувати реальне відхилення розподілу швидкостей

елементарних цівок $u_x(r)$ за площею перерізу потоку S, що виникає в зв'язку з введенням поняття середньої швидкості потоку $u_{\text{сер}}$. Ефективним інструментом у цьому випадку може бути використання коефіцієнта Коріоліса α.

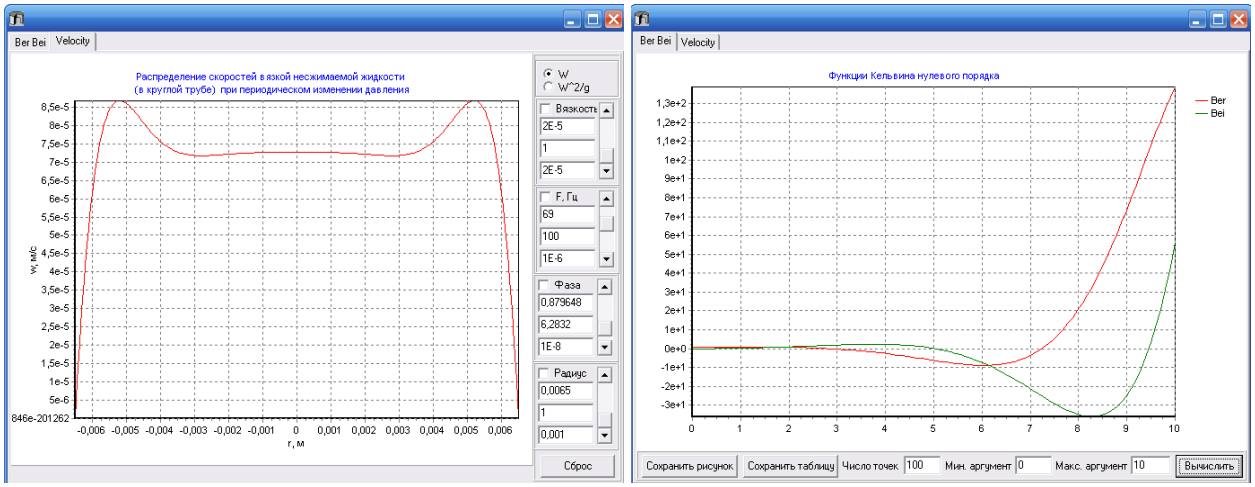


Рис. 4.17 – Скрін-шоти роботи програми моделювання потоку в каналі Tube2.1©

Використання поняття $u_{\text{сер}}$ є можливим, оскільки для кругових перерізів форма потоку симетрична.

4.5. Існуючі пристрої для отримання пульсуючих потоків та їх застосування

Суттєве розширення кола задач, що вирішуються пожежно-рятувальними підрозділами ОРС ЦЗ України вимагає відповідного розширення номенклатури і покращення можливостей її технічного забезпечення. Базовим технічним засобом, який і сьогодні становить основу оснащення пожежно-рятувальних підрозділів, залишається пожежний автомобіль. Результативність виконання завдань з пожежогасіння значною мірою визначається рівнем його технічного укомплектування та можливостями встановленого обладнання. Одним із перспективних шляхів суттєвого підвищення ефективності технічного оснащення пожежних автомобілів є створення нових, а також раціональне й обґрунтоване використання наявних засобів протипожежної техніки пульсуючої (імпульсної) дії.

Важливим моментом використання пульсуючих струменів при пожежогасінні та проведенні аварійно-рятувальних робіт є характер взаємодії потоків чи сумішей рідин із елементами об’єктів та горючим середовищем [288]. Ефективність роботи генератора імпульсних струменів як однієї із складових усієї системи гасіння і, як наслідок, ефективність роботи пожежного автомобіля передусім залежить від характеру впливу вогнегасної речовини на середовище пожежі. Оскільки мова йде про використання води та водних розчинів у якості основних вогнегасних речовин, зазначимо, що базовою використовуваною властивістю є охолодження зони реакції, а розпилені струмені забезпечують суттєво вищий в порівнянні із суцільними потоками ефект. Останній досягається перш за все за рахунок різкого збільшення загальної площі поверхні одночасного рівномірного охолодження середовища пожежі та випаровування крапель.

Поділ за принципом отримання пульсуючих потоків. Відповідно до критерію формування необхідних параметрів потоків рідин і газів (рис. 4.18) [217, 278], серед наявних конструктивних рішень генераторів пульсуючих потоків умовно виокремлюють п’ять основних типів. При цьому слід зауважити, що для окремих технічних рішень неможливо однозначно визначити їх належність до певного типу, оскільки вони поєднують ознаки кількох конструктивних схем. Разом з тим, аналіз показує, що переважна частина відомих генераторів пульсуючих потоків належить до клапанного або поршневого типів. Вибір типу генератора, як основи імпульсної системи, із п’яти виділених груп залежить від конкретного характеру дій пожежогасіння.

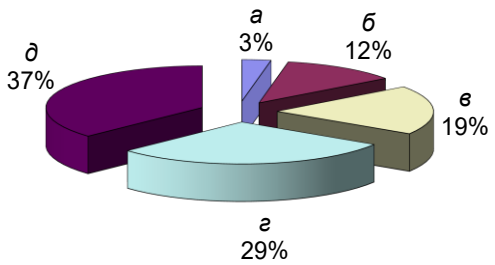
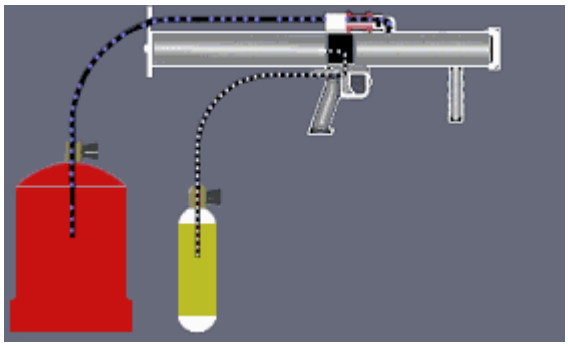


Рис. 4.18 – Типи систем генерування пульсуючих потоків:
а – кумулятивні; *б* – гідроударні; *в* – роторні; *г* – поршневі; *д* – клапанні.

Серед імпульсної техніки локальної дії значного поширення у світі набули пристрої, що базуються на так званих IFEX TECHNOLOGIES, а типовим представником може бути імпульсний водяний вогнегасник IFEX–3000 (ФРН), що використовує у якості вогнегасного заряду воду або пінний розчин піноутворювача (рис. 4.19). Він ефективний лише під час гасіння невеликих вогнищ пожежі [278, 289]. Його основні технічні характеристики наведені у табл. 4.1.



а)



б)

Рис. 4.19 – Зовнішній вигляд (а) та принцип дії (б) IFEX–3000 [290]

Таблиця 4.1.

Технічні характеристики IFEX–3000

Характеристика	Значення
Min/max вогнегасної речовини	0,25-1,00 л
Max довжина пострілу	16 м
Ширина розбризкування	3м (на відстані 5 м)
Робочий тиск	25 кгс/см^2
Тиск спрацювання клапана	35 кгс/см^2
Час спрацювання клапана	20 мс
Max швидкість крапель	120 м/с=432 км/год
Розмір крапель	2…200 мкм
Маса порожнього пристрою	6,8 кг

Самою значущою перевагою даної моделі є те, що в ній вдалося досягнути загальної сумарної площі поверхонь крапель одного пострілу до 60 м^2, що дозволяє реалізувати одну із головних вимог ефективного гасіння – швидке охолодження вогнища пожежі. Опір повітря, що діє на водяний потік, розбиває водяні краплини і зменшує нормальний середній розмір краплини приблизно від 700 мкм до 100 мкм. Таким чином, охолоджувальна поверхня одного літра води збільшується від звичайних 5,8 м^2 до вже зазначених 60 м^2. Як наслідок, у такий спосіб вдається температуру в обмежених замкнутих приміщеннях зменшувати від смертельно небезпечних 1000°С до 40°С лише за декілька секунд [289].

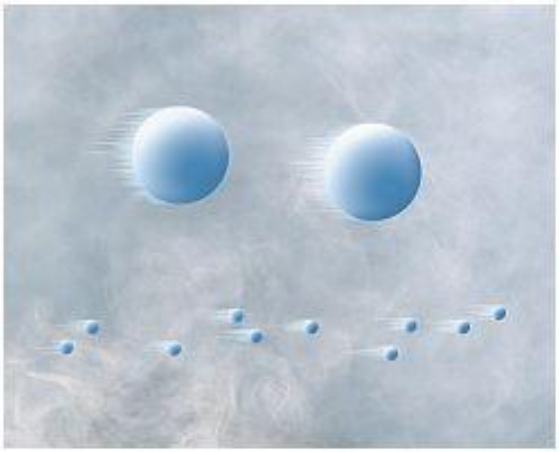


Рис. 4.20 – Розпорошення краплин рідини в IFEX–3000 [290]

За даними Національного протоколу статистики Великої Британії (Implementing National Statistics Code of Practice and Release Practice Protocol), не зважаючи на незначне зменшення чисельності загиблих на пожежах за останні роки, загалом тенденція процентного співвідношення кількості загиблих в жилих приміщеннях до інших категорій загиблих залишається незмінною упродовж останніх двох десятиліть [291]. Саме в таких приміщеннях може бути застосована імпульсна техніка, наприклад IFEX–3000, що забезпечує одночасно подачу мінімальної кількості вогнегасної суміші і досягнення при цьому максимального ефекту гасіння [289].

Вищезазначене стосується використання імпульсної техніки та технологій передусім для гасіння пожеж всередині житлових приміщень, оскільки дальність подачі вогнегасної речовини вказаної техніки у більшості випадків не перевищує

10 м. Однак, на практиці значна кількість надзвичайних ситуацій вимагає подачі вогнегасної суміші на відкритих майданчиках на відстані більші ніж 20, а іноді навіть і 30 м.

Технічні засоби для реалізації таких потреб забезпечують подачу води і на більші відстані, проте це здійснюється за рахунок великого тиску на виході пожежного ствола. При цьому значно зростає інтенсивність подачі води, що вимагає великих об’ємів цистерн пожежного автотранспорту.

Цікавим технічним рішенням, яке слід виокремити, стала розробка науковцями Дніпропетровщини ствола, що отримав назву ручного ствола диспергувальної дії [138, 139, 140] та в деяких випадках забезпечила зменшення використання вогнегасних сумішей в 35 разів, не знижуючи при цьому ефективності пожежогасіння.

Перспективним способом одержання дальнобійного диспергованого водяного струменя з діаметром крапель 100–400 мкм є гідравлічне диспергування з використанням енергії гідравлічного удару або гідравлічних пульсацій [138]. Використовуючи такий принцип, вітчизняні фахівці розробили і виготовили зразки ручних і лафетних пожежних стволів, які були випробувані на полігоні Українського науково-дослідного інституту цивільного захисту.

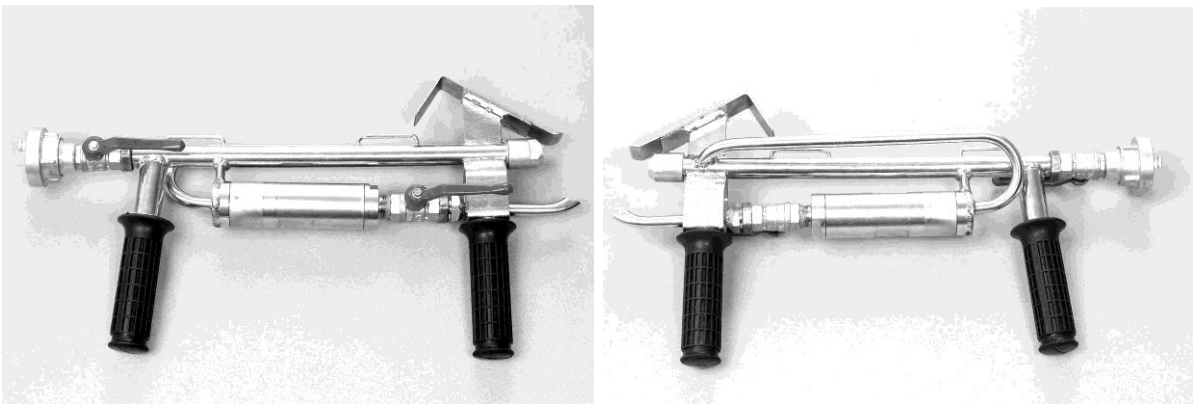


Рис. 4.21 – Зовнішній вигляд ручного ствола диспергувальної дії РСД–2

Оскільки практично була доведена ефективність стволів диспергувальної дії, то вони мають перспективу використання у практичних підрозділах ДСНС України. В НУЦЗ України всі випадки їх використання фіксуються і

аналізуються (передусім маючи на меті виявлення недоліків їх функціонування для доопрацювання їх конструкції в наступних моделях).

Результати випробування вітчизняного ствола подані в табл. 4.2.

Таблиця 4.2.

Результати випробування ручного ствола диспергувальної дії РСД–2 [138]

Тиск на виході насоса установки УВПП-400, МПА	Визначення параметрів		
	Об'ємні витрати води, л/с	Довжина суцільного струменя, м	Довжина диспергованого струменя, м
0,5	0,67	21,0	15,0
0,6	0,70	21,4	15,4
0,7	0,73	22,6	16,0
0,8	0,78	24,4	16,9
0,9	0,81	25,1	17,1
1,0	0,88	25,4	17,3
1,1	0,91	25,9	17,6

Подібно до ствола РСД–2 діє пожежний диспергуючий лафетний ствол ПЛСД–2. Основні результати випробування ПЛСД–2 подані в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3.

Результати випробування ПЛСД–2

Параметр	Значення
Робочий тиск, МПа	0,7…0,9
Витрата водного розчину при тиску 0,8 МПа, л/с	10,6
Довжина суцільного водяного струменя при тиску 1,1 МПа, м	40,0
Довжина диспергованого водяного струменя при тиску 1,1 МПа, м	40,0

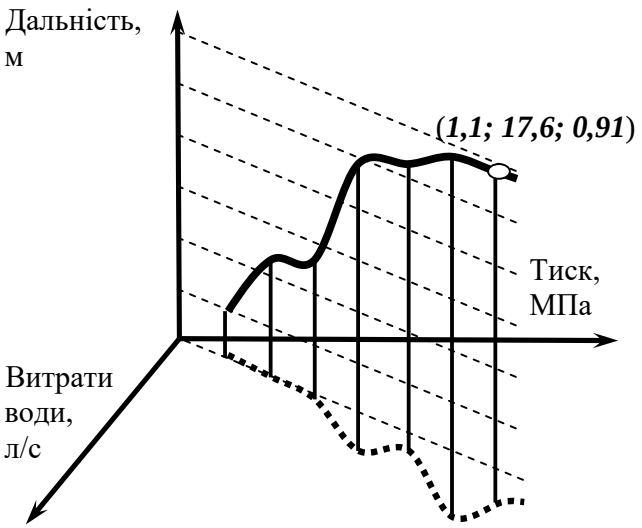


Рис. 4.22 – Картина залежності дальності подачі диспергованого струменя та витрат води від тиску на виході насоса

Найвагомішими перевагами зазначеного ствола є суттєве зменшення витрат води у порівнянні із найуживанішими стволами, значне розпилення води, що покращує ефект зниження температури вогнища пожежі та дальність подачі розпиленого струменя [289]. Важливо, що що ствол є вітчизняною науковою розробкою, виготовлений також в Україні, й за умови його масового виробництва може стати більш економічно доступним.

4.6. Ексергійні особливості системи генерування струминних пульсуючих потоків

У даному параграфі ексергійні особливості системи формування струменів водної вогнегасної речовини аналізуються на прикладі системи генерування пульсуючих струминних потоків. Вивчення конструкцій протипожежної техніки та її складових, що застосовуються для генерації як стаціонарних, так і пульсуючих вогнегасних струменів [140, 217, 278], дозволяє виділити основні компоненти гідравлічних систем пожежних автомобілів (ПА). До них відносяться: джерела тиску та системи їх контролю, механізми, що формують

пульсації потоку із заданою частотою, пристрої регулювання напрямку та інтенсивності потоку, а також самі пожежні стволи (рис. 4.23) [277].

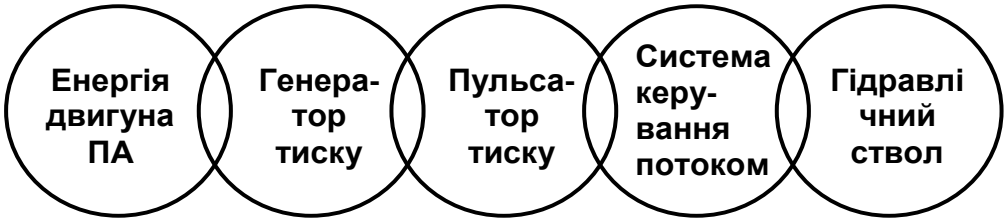


Рис. 4.23 – Принципова схема системи формування струминних потоків у ПА

Після того як вогнегасна рідина виходить з формувального отвору, безпосередньо впливати на форму струменя стає досить складно. Тому всі бажані параметри зон розпилення та розпорошення формуються не стільки вручну, скільки через конструкцію самої системи водопінних комунікацій пожежного автомобіля, характеристики її окремих елементів та фізико-хімічні властивості самої вогнегасної речовини.

Огляд системи (рис. 4.23) дозволяє оцінити гідродинамічні властивості струменя, ефективність обладнання для його формування, а також економічну доцільність різних проектних рішень. У цій схемі взаємодія компонентів відбувається через рідину – воду, яка безпосередньо формує струмінь. Основними параметрами для оцінки роботи системи є витрата Q та тиск P при заданих значеннях в’язкості і температури рідини.

Дослідження роботи таких гідравлічних систем можна проводити різними способами: функціональним, морфологічним та інформаційним [292]. Функціональний підхід допомагає визначити, які властивості система проявляє в конкретний момент часу. Морфологічний аналіз дозволяє розглядати систему як цілісну структуру – сукупність елементів і зв’язків між ними, наприклад, «насос»–«пульсатор» чи «пульсатор»–«регулятор витрат». При цьому зв’язки можуть бути енергетичними, функціональними або управляючими. Інформаційний підхід дає змогу оцінити, як структура та функціональні

характеристики системи залежать від кількості та якості наявної внутрішньої й зовнішньої інформації.

Таким чином, комбінування цих підходів дозволяє не лише глибше зрозуміти роботу системи в цілому, а й оптимізувати її елементи для досягнення бажаних параметрів струменя та ефективного розпилення вогнегасної рідини.

Згідно з дослідженнями С. І. Пастушенка [293], формальний опис подібної системи можна подати наступним чином. У деякий момент часу $t \in T$ надходить вхідний параметр в систему $x(t)$; він є вектором в m–вимірному просторі вхідних параметрів. У той самий момент часу t на систему діє деяка зовнішня сила $V(t)$, яка описується n–вимірним вектором у просторі X.

Характеризуючи систему набором внутрішніх параметрів $X_{\text{внутр}}(X_1, X_2, \dots, X_n,)$, їх можна розглядати як вектор у k–тому просторі.

Якщо початковий стан системи позначити через $Z_{\text{поч}}$, то для будь-якого моменту часу можна стверджувати, що система знаходиться в стані, який характеризується $Z(t)$.

Таким чином, вихідні параметри системи в момент часу $t \in T$ $(t_c > t_0)$ в межах $t_0 -> t_c$ визначаються відношенням $y(t) = F[t_0, z_0, x(t), X(t), V(t)]$.

Розвиток струминної протипожежної техніки та автоматизованих систем управління не лише підвищує ефективність роботи обладнання, але й веде до ускладнення його конструкції, збільшення кількості компонентів, у тому числі вимірювальної та регулювальної апаратури. Оскільки такі системи встановлюються на автомобілі з конкретними характеристиками, робота гідравлічної частини значною мірою залежить від параметрів транспортного засобу, наприклад від потужності приводу насосної станції. Це підкреслює актуальність техніко-економічних досліджень, спрямованих на визначення оптимальної структури та параметрів струминного обладнання.

У цьому плані перспективним є використання ексергійного підходу для аналізу механічних систем струминної техніки [294, 295, 370].

Метод ексергії дозволяє оцінювати не тільки кількість енергії, але й її якість – тобто ті потоки, які реально здатні виконувати роботу, що забезпечує термодинамічно обґрунтовану оцінку системи. При цьому аналіз охоплює лише ту частину енергоресурсів – роботу, масу робочих тіл, витрати рідини, теплоту тощо – яка може бути використана для виконання корисної роботи.

На основі першого та другого законів термодинаміки складаються відповідні рівняння ексергії. Якщо втрати ексергії застосовуються як показник незворотності процесів, їх можна визначити за формулою

$$\Pi = T_0 \Delta S_\Sigma = 0, \tag{4.13}$$

де T_0 – температура навколишнього середовища, а ΔS_Σ – сумарна зміна ентропії ($П = 0$ – зворотній процес, $П > 0$ – незворотній процес), тоді для реальних процесів справедливо [370]

$$E_\Sigma^{\text{вх}} = E_\Sigma^{\text{вих}} + \Pi, \tag{4.14}$$

$$E^{\text{П}} = E^{\text{К}} + \Pi, \tag{4.15}$$

де $E_\Sigma^{\text{вх}}, E_\Sigma^{\text{вих}}$ – сумарні ексергії усіх потоків енергоресурсів на вході й виході із системи; $E^{П}$ – потрачена енергія; $E^{\text{К}}$– використовувана (корисна) енергія.

Транзитна енергія $E_{\text{К}}$ є відповідним «баластом» в сумарних потоках ексергії на її виході та вході, тобто

$$E_{\text{К}} = E_\Sigma^{\text{вх}} - E^{\text{П}} = E_\Sigma^{\text{вих}} - E^{\text{К}}. \tag{4.16}$$

Оскільки ексергія потоку роботи E_N дорівнює самій роботі

$$E_N = N = m \cdot e_{\text{техн}}, \tag{4.17}$$

де m – маса робочого тіла, $e_{\text{техн}}$ – питома технічна робота, а енергія потоку кінетичної енергії $E_K = {mv^2}/{2}$, тепловий потік $E_\phi = \left(I - {T_0}/{T_u}\right)\Phi$, T_u – середньодинамічна температура, то не має складності написання рівняння ексергетичного балансу.

Окрім того, із рівнянь (4.14) і (4.15) можна отримати вираз для ккд будь-якого процесу, що відбувається в пристрої $\eta_{\text{вх}} = {E^{\text{К}}}/{E^{\text{П}}} = I - {\text{П}}/{E^{\text{П}}}$.

Схема, представлена на рис. 4.24, дозволяє наочно оцінити роль кожного блоку в процесі передачі енергії від двигуна автоцистерни до моменту повного розпилу струменя і доставки вогнегасної речовини до осередку пожежі [277]. Ефективність роботи окремих компонентів, а разом з тим і всієї системи імпульсного пожежогасіння, перш за все визначається тим, як саме вогнегасна речовина впливає на вогнище пожежі.

Більшість двигунів, що виробляють енергію для подальшої передачі на генератори тиску (насоси), мають коефіцієнт корисної дії, який не перевищує 0,35. Існуюча система передачі енергії – з використанням коробки відбору потужності, коробки перемикання передач та системи валів – дозволяє передати лише близько 30% початкової потужності двигуна. Пристрій, який відповідає за створення пульсацій, знижує потужність ще на 3–15%. Додаткові втрати виникають у системі керування потоком і гідравлічному стволі, зменшуючи потужність (відповідно 0,9 і 0,95).

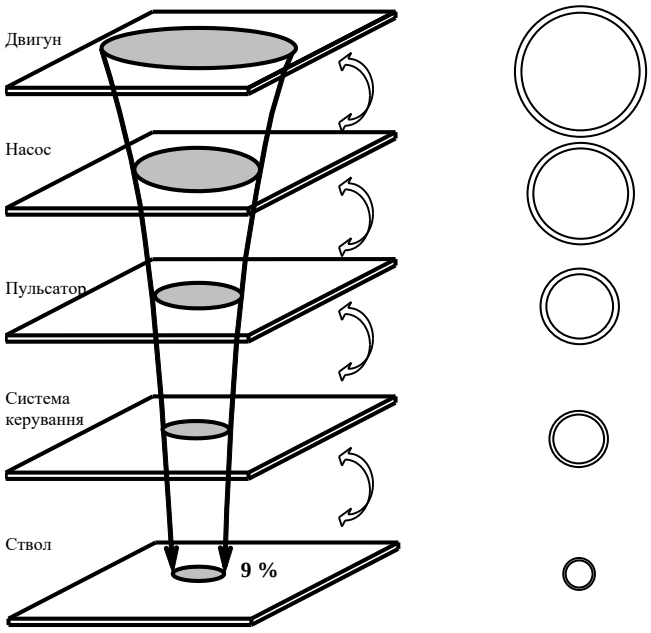


Рис. 4.24 – Ексергійні зменшення в існуючій системі генерування потоків

Таким чином, аналіз спрощеної схеми, представленої на рис. 4.24, дозволяє зробити висновок, що сучасні системи формування струминних потоків, які застосовуються у вітчизняній протипожежній техніці, здатні передавати не більше ніж 9% від максимальної енергії, яка могла б бути реалізована в ідеальній системі генерації потоків

$$K_{заг} = K_{двиг} \cdot K_{насос} \cdot K_{пульс} \cdot K_{керув} \cdot K_{ствол} = 0.35 \cdot 0,3 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,95 \approx 0,09.$$

Рівень працездатності системи, який найбільш близький до показника ексергії, на сьогоднішній день виявляється недостатнім і не може задовольнити ні розробників протипожежної техніки, ні самих рятувальників. Основна причина полягає в тому, що більшість існуючих автоцистерн через зазначені вище фактори не забезпечують номінальні режими роботи встановлених на них пожежних насосів, що безпосередньо впливає на ефективність створення вогнегасних потоків.

Метод аналізу систем генерації водяних струменів у пожежогасінні можна вважати універсальним, оскільки він дозволяє оцінювати використання всіх видів енергії на шляху її проходження – від енергії, яку виробляє двигун автомобіля, до кінетичної енергії отриманого струменя води чи суміші води з піноутворювачем. Такий підхід фактично забезпечує формування повного енергетичного балансу досліджуваної системи, що дає змогу кількісно оцінити втрати енергії на кожному етапі передачі.

Метод відзначається простотою застосування та наочністю: він дозволяє наочно відслідковувати, як енергія передається між окремими елементами системи – від двигуна до генераторів тиску, через механізми пульсації і систему керування потоком, і нарешті до гідравлічного ствола. Окрім того, він відкриває можливість встановити взаємозв’язок між ексергетичними характеристиками і техніко-економічними показниками системи, що дозволяє обґрунтовано визначати ефективність використання ресурсів.

Завдяки такому аналізу було встановлено, що наявні системи передачі енергії у вітчизняних автоцистернах дозволяють передавати лише близько 9% від максимальної потенційної енергії, яка могла б бути реалізована в ідеальній

схемі генерації водяних потоків. Це підкреслює необхідність подальшого вдосконалення конструкції як самих насосних установок, так і систем керування, для підвищення ефективності протипожежних комплексів.

Висновки до розділу 4

1. Виділено п'ять основних типів генераторів імпульсних струменів залежно від принципу дії та способу генерування струменя.

2. Досліджено розподіл швидкостей та напружень у пульсуючих потоках вогнегасної речовини в об’ємі ствола, отримані епюри швидкостей для випадку, коли гармонійні зміни перепаду тиску в стволі забезпечуються генератором імпульсів. Моделювання процесу руху вогнегасної речовини в об’ємі ствола шляхом підбору її параметрів (фази і частоти) здійснювалось завдяки авторській програмі, яка суттєво спростила вибір його оптимальних параметрів. Варіювалися значення в’язкості рідини, радіус вихідного отвору насадки, фази пульсатора. Визначено, що форма епюри в частині ядра струменя на виході насадки була близькою до прямокутної, що вказує на максимальну кінетичну енергію струменя, для вихідного круглого отвору радіусом 6,5 мм, при температурі 20ºС, кінематичній в’язкості $1{,}019…1{,}033\cdot10^{-6}$ м^2/с.

3. Отримані критерії, що характеризують імпульсні потоки. Важливо, що вказані параметри обумовлюють зв'язок між механічною системою створення пульсацій й гідравлічними параметрами струменя.

4. Ефективність системи генерування вогнегасних струменів запропоновано оцінювати за допомогою ексергійного методу. Показані ексергійні зменшення в існуючій системі генерування потоків. Визначено, що досліджувана система формування струминних потоків дозволяє передавати щонайбільше 9% енергії, яку можна було б отримати в деякій ідеальній системі генерування потоків.

РОЗДІЛ 5
ВРАХУВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОТОКУ В'ЯЗКОЇ РІДИНИ В СИСТЕМІ ПОЖЕЖНИЙ СТВОЛ – ВІЛЬНИЙ СТРУМІНЬ

Розділ присвячено аналізу взаємозв'язку між характеристиками сформованих гідравлічних струменів та конструктивними й експлуатаційними особливостями гідравлічного пожежного обладнання, за допомогою якого вони створюються. Оскільки після витікання вогнегасного гідравлічного струменя із пожежного ствола чи насадки впливати на нього вкрай складно, усі його характеристики мають бути закладені на етапі проходження рідини внутрішніми каналами пожежного обладнання, при цьому розглянуті варіанти «класичних» струменів та струменів з некруглим поперечним перерізом, змішуваних течій. Визначені основні чинники впливу на гідродинаміку потоку рідини в струминоформувальних каналах пожежних стволів та насадок.

5.1. Гідродинамічна початкова ділянка компактної частини струменя на виході з насадки для струменів з круглим поперечним перерізом

Згідно з дослідженнями, результати яких наведені в [296], що насамперед ґрунтуються на низці випробувань, характер розподілу динамічних тисків по перерізу струменя рідини на виході з насадки підпорядковується законам, які відображають фізичний процес взаємодії водяного потоку, що рухається з певною швидкістю в повітряному середовищі [234]. Для перерізу струменя на вильоті з пожежного ствола (насадки) є характерним рівномірний розподіл динамічних тисків, близький до прямокутного (епюри). Природно, що при віддаленні струменя від насадки характер розподілу динамічних тисків усе більше змінюється за рахунок криволінійного розподілу векторів поздовжніх швидкостей у периферійних частинах струменя.

При цьому швидкості й динамічні тиски розподіляються в перерізах струменя відповідно до кривої ймовірності Гаусса

$$\frac{u}{u_{\text{ос}}} = e^{-\varphi\left(\frac{r_x}{r_{0,5}}\right)^2},$$

$$\frac{p_x}{p_{\text{ос}}} = e^{-\varphi\left(\frac{r_x}{r}\right)^n},$$

де u – швидкість струменя на відстані r_x від осі; r – радіус струменя в досліджуваному перерізі; $r_{0,5}$ – радіус струменя в точці, де її швидкість становить половину осьової швидкості; $u_{\text{ос}}$ -– осьова швидкість струменя в певному її перерізі; p_x, $p_{\text{ос}}$ – відповідно динамічний тиск струменя в досліджуваній точці й осьовий динамічний тиск у цьому ж перерізі; φ – коефіцієнт; n – показник, рівний для водяних струменів «2».

Одержавши криву узагальненої безрозмірної залежності зміни середнього динамічного тиску водяного струменя вздовж його осі [296], можна проаналізувати характер перерозподілу енергії струменя на різних ділянках його руху. Така залежність свідчить про те, що в межах початкової ділянки, де втрати енергії є відносно незначними, а структура струменя зберігає достатню впорядкованість, рівняння середніх динамічних тисків може бути подано у вигляді

$$\frac{p_{\text{сер}}}{p_0} = 1{,}45\left(10^6 \frac{d_0}{l \cdot Re}\right)^{0,2}, \tag{5.1}$$

а за межами початкової ділянки

$$\frac{p_{\text{сер}}}{p_0} = 194\left(10^6 \frac{d_0}{l \cdot Re}\right)^{1,22}, \tag{5.2}$$

де $p_{\text{сер}}$, p_0 – відповідно середній динамічний і початковий тиски струменя; d_0 – діаметр насадки; l – відстань від насадки до досліджуваного перерізу по осі руху струменів.

У роботі [296] стверджується, що безрозмірний параметр l/d_0 може для зазначених струменів бути досить надійним узагальнюючим параметром.

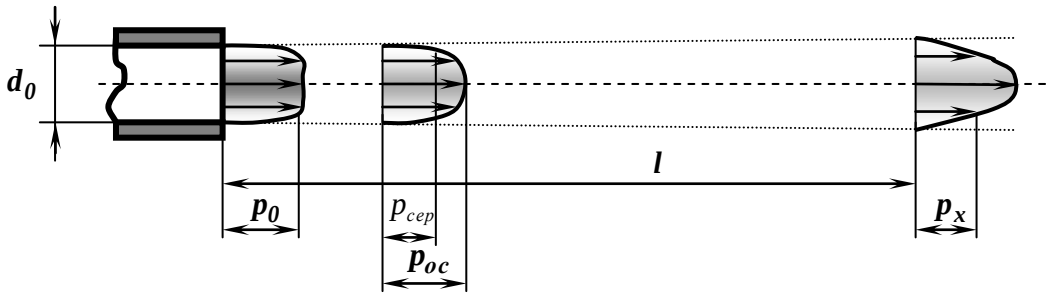
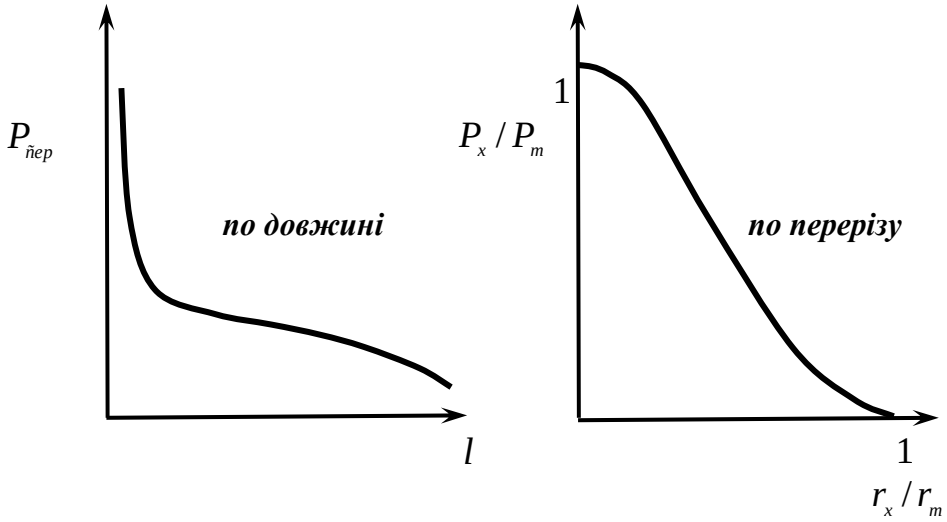


Рис. 5.1 – Тиски на гідродинамічній початковій ділянці компактної частини струменя на виході з насадки



P_m - тиск на виході з насадки радіусом r_m

Рис. 5.2 – Графіки залежності середніх динамічних тисків струменів по довжині струменя та її перетину (за межами початкової ділянки в безрозмірних координатах)

Усе вищевикладене записане щодо характеру розподілу динамічних тисків по перерізу й довжині струменя водяного потоку, що рухається з певною швидкістю в повітряному середовищі, але потрібно уточнити, що мова йде в більшості випадків про струмені середнього й високого тиску, хоча отримані результати й для струменів низького тиску, і ці результати їм співвідносні.

Використовуючи засоби математичного процесора Mathcad, і для спрощення запису прийнявши $l/d_0 \cdot Re = D$, для (4.6) і (4.7) одержуємо, зробивши заміни

$$P(D) := \begin{vmatrix} 1.45\left(10^6 D^{-1}\right)^{0.2} & \text{if } D < 12\cdot 10^7 \\ 194\left(10^6 D^{-1}\right)^{1.22} & \text{otherwise} \end{vmatrix},$$

$$B := const;\ F(D) := \frac{d}{dD}P(D),\ J(D) := F\left(5\cdot 10^8\right)\cdot D + B;$$

$$D := 10^7, 10.1\cdot 10^7 .. 100\cdot 10^7;\ R(D) := P(D) - J(D);$$

$$D := 5\cdot 10^8,\ B := P(D) - F(D)\cdot D.$$

Якщо абстрагуватися від несуттєвих у нашому випадку деталей, можна помітити подібність графіків, представлених (на рис. 1.10) і на (рис. 5.3, а), що дає можливість стверджувати про принципову математичну подібність процесів, що відбуваються в різних ділянках руху водяного потоку, хоча повного фізичного пояснення такому явищу немає.

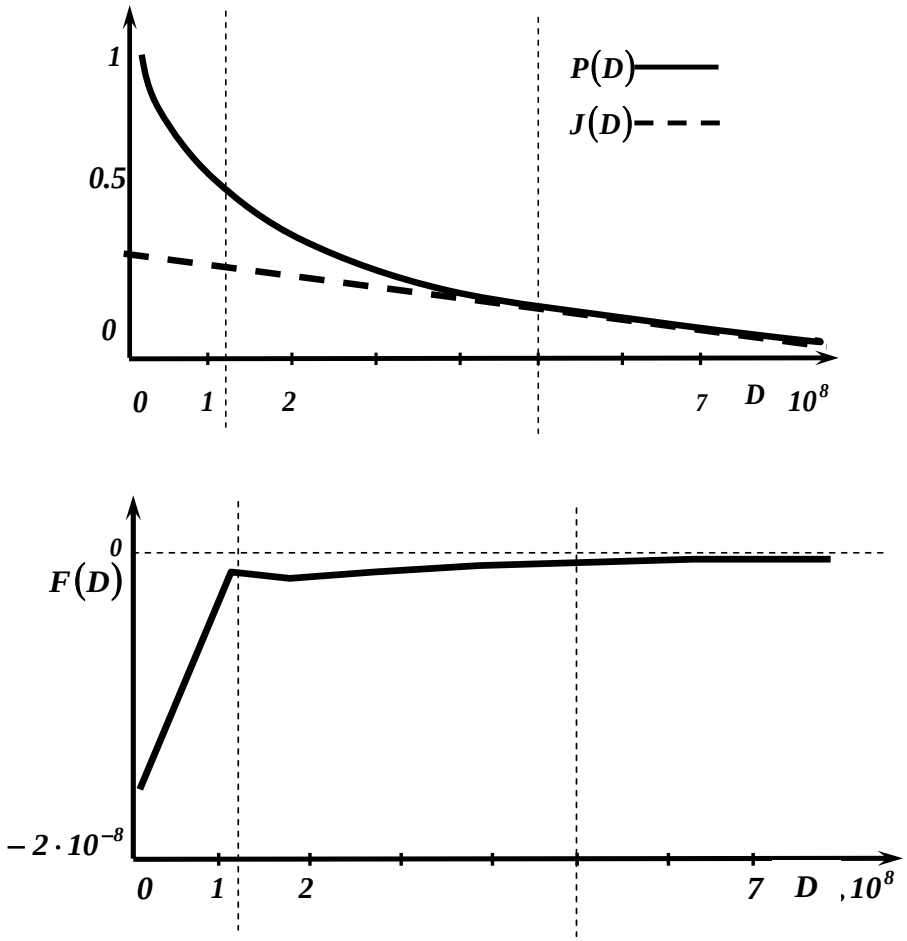


Рис. 5.3 – Графіки узагальненої залежності $p_{\text{сер}}/p_0$ від $l/d_0 \cdot Re$ у безрозмірних координатах і інтенсивності зміни цієї ж залежності

Формально функція $P(D)$ (рис. 5.3) може бути замінена сумою двох функцій: $J(D)$ і деякою додатковою $\mathcal{J}(D)$. Оскільки $J(D)$ є функція, графік якої пряма, до неї з якогось моменту асимптотично наближається деяка додаткова функція $\mathcal{J}(D)$ й враховуючи, що за межами початкової ділянки функція $P(D)$ фактично може бути описана як пряма, можна припустити, що основний вплив на характер руху струменя відразу після насадки складає зазначена функція $\mathcal{J}(D)$. Розрахункові результати вказують, що

$$J(D) = kD + b,$$

$$k = -2.533 \cdot 10^{-10}\,, b = 0.231\,.$$

Аналогічним способом нескладно одержати подібні залежності не тільки для безрозмірних середніх динамічних тисків водяних струменів від безрозмірного параметра $^{l}/_{d_0} \cdot Re$, але й для залежності діаметра струменя від відстані до насадки, для залежності безрозмірної довжини початкової ділянки струменя від тиску рідини перед насадкою або від числа Рейнольдса тощо. Усі зазначені дії можна здійснити, використовуючи дослідні й розрахункові дані [197, 296] .

Здійснивши аналіз потоків рідин у каналах і струменів у повітряному середовищі, можна розглядати початкову ділянку компактної частини струменя за аналогією з досить добре дослідженою моделлю нестабілізованої течії в стволі або насадці [234]. Таким чином, провівши ряд досліджень, можна визначити яким повинен бути тиск для одержання струменів з потрібними параметрами для проведення пожежогасіння і для руйнування конструкцій, очищення завалів тощо. Фактично досліджено безрозмірну закономірність падіння тиску струменя на виході з насадки та встановлено узагальнену залежність відносного тиску J(D) від її конструктивних характеристик, що має вигляд $\mathrm{J(D)} = 2{,}533 \cdot 10^{-10} \cdot \mathrm{D} + 0{,}231.$

5.2. Гідродинамічна початкова ділянка компактної частини струменя на виході з насадки для струменів з некруглим поперечним перерізом

Розглянемо процес одержання пласкої струминної течії, який за певних умов переходить у плівкову течію по вертикальних охолоджуваних поверхнях. Така течія є високоефективним засобом теплообмінних процесів, вкрай важливих для забезпечення пожежної безпеки певних технічних засобів і технологічних процесів. Слід враховувати, що передача тепла, як правило, відбувається від зони високої до низької температури, й зазвичай теплообмін відбувається всіма трьома способами – конвекцією, теплопровідністю і випромінюванням.

Прикладом може бути випадок, коли необхідно робити рівномірне охолодження великих площ вертикальних поверхонь зовнішніх стінок ємностей з горючими речовинами. Важливе зауваження: якщо розташувати зрошувачі послідовно вздовж трубопроводу живлення, то для забезпечення рівномірності витрат різних зрошувачів потрібно розв’язати задачу дискретного відбору рідини.

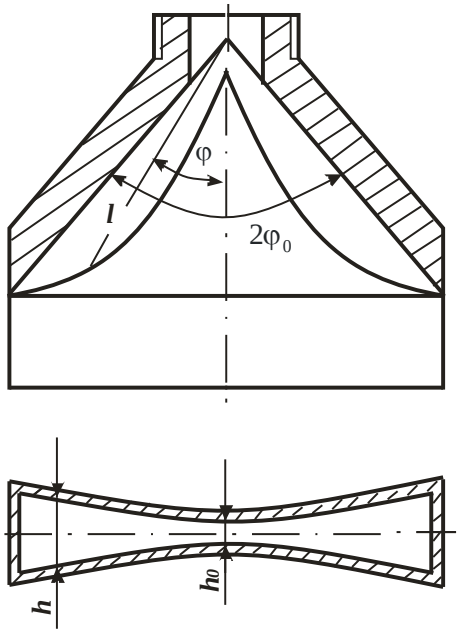


Рис. 5.4 – Схема плоскощілинної насадки

h – висота ділянки розподільного каналу, φ – кут розкриття

Подальші дослідження полягають у доборі або створенні таких засобів, за допомогою яких можна було б сформувати тонку рідинну плівку, здатну брати участь у ефективних теплообмінних процесах, по суті, виконуючи функцію тепловідбору.

Варіантом конструкції плоскощілинної насадки (рис. 5.4), здатної сприяти розв'язанню вищезазначених задач, може бути насадка для створення радіальних водяних струменів (рис. 3.8). Після створення 3D–конструктивної моделі насадки у программному комплексі SolidWorks та її «прогонці» у спеціалізованому програмному комплексі Flowvision, зроблено висновок про можливість застосування обраної конструкції для формування плівкових течій. У випадку, коли за основу конструкції обиралася модель щілинної насадки, що дозволяє отримати струмені–екрани (рис. 3.4, а), а параметри щілини – 14×3 мм [261, 297, 298], було встановлено, що максимальна рівномірність витрат досягається при радіусі увігнення щілини 11,67 м (на краях щілина – 3 мм, по центру – 2,58 мм).

Визначення товщини плівки. Одним із варіантів зниження температури плоских вертикальних поверхонь є зрошення поверхні тонким рідинним шаром певної речовини. Схема течії в такому шарі може бути представлена, як вказано на рис. 5.5. Обравши систему координат $x0y$ (x – вертикальна координата) рівняння руху можуть бути представити у вигляді

$$(\vec{u}\nabla\vec{u})_x = g_x - \left[grad\frac{p}{\rho}\right]_x + \frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y}\ ;$$
$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0\ , \qquad (5.3)$$

де $\vec{u}(u_x, u_y)$ – вектор швидкості;

g_x – прискорення вільного падіння.

p – тиск;

τ – дотичне напруження;

τ_{xx} і τ_{xy} – складові тензора напружень.

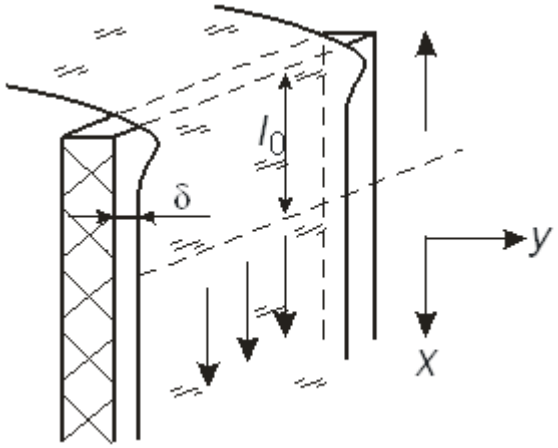


Рис. 5.5 – Схема плівкової течії по вертикальній гладкій поверхні (уточнення рис. 1.16)

Розв'язання рівнянь (5.3) дозволяє визначити дві основні характеристики плівкової течії: товщину стікаючої плівки δ й щільність (витрати) зрошення поверхні Q. Однак слід зазначити що формування плівкової течії здійснюється на гідродинамічній початковій ділянці l_0 й суттєво залежить від умови течії рідини у вхідній зоні (на рис. 5.5 вона представлена у вигляді переливу рідини через поверхню). У даній зоні на величину l_0 чинять суттєвий вплив сили інерції від конвективного прискорення $\vec{u}\nabla\vec{u}$. У зв'язку з тим, що для плину рідини в плівці, на вільній поверхні можуть істотний вплив мають сили поверхневого натягу, для ньютонівської рідини рівняння (5.3) можна записати

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x\frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y\frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\tau}{\rho}\frac{\partial^3\delta(x)}{\partial x^3} + g_x + \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2}. \qquad (5.4)$$

Окрім того, можна записати [299-301], що залежність між товщиною стікаючої рідини δ й швидкістю u_x може бути подана

$$\frac{\partial\delta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}\left(\int u_x dy\right).$$

При стабілізованому плині плівки на вертикальній гладкій поверхні маємо

$$u_x = \left(\frac{\nu y}{\rho g}\right)\left(\delta - \frac{y}{2}\right), \qquad (5.5)$$

якщо припустити, що сили поверхневого натягу практично відсутні, ν – кінематична в’язкість.

Припускаючи, що зміна товщини плівки δ на початковій ділянці незначна (перше наближення) для складової швидкості u_x в зоні $0 \le x \le l_0$ можна одержати з рівняння $u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} = g_x + \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2}$ наступний результат

$$
\begin{aligned}
u_x = &\left[C_0 y - a_x \frac{y^2}{2}\right] + (x+\varepsilon)^{-1} C_1 y + \\
&+(x+\varepsilon)^{-2}\left[\frac{a_x C_1}{40} y^5 - \frac{C_0 C_1}{12} y^4 + C_2 y\right] + \\
&+(x+\varepsilon)^{-3}\left[\frac{a_x C_2}{20} y^5 - \left(C_1{}^2 + 2C_0 C_2\right)\frac{y^4}{12} + C_3 y\right] + \\
&+(x+\varepsilon)^{-4}\left[\frac{3a_x C_3}{40} y^5 - \left(C_0 C_3 + \frac{C_1 C_2}{4}\right) y^4\right] + \\
&+(x+\varepsilon)^{-5}\left[-\left(C_2{}^2 + \frac{C_1 C_3}{3}\right) y^4\right] + (x+\varepsilon)^{-6}\left[\left(\frac{C_2 C_3{}^5}{12}\right) y^4\right],
\end{aligned}
\tag{5.6}
$$

де ε, $C_1, C_{2,}\, C_3$ – постійні, що визначаються із граничних умов.

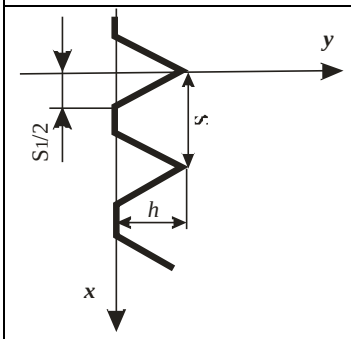
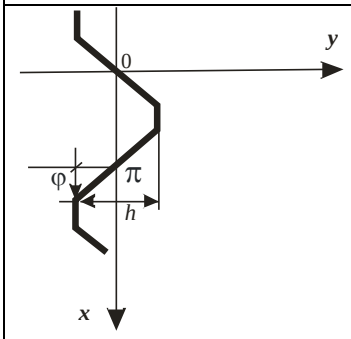
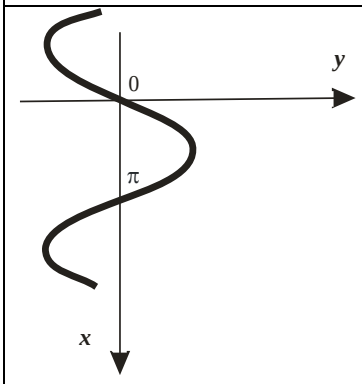
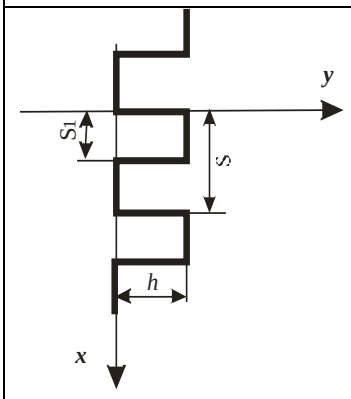
На підставі аналізу даних про $u_x(x,y)$ можна одержати інформацію про товщину плівки й щільність зрошення. Слід зазначити, що при течії уздовж профільованої поверхні й умові $\delta(x) \neq 0$ бажано використовувати систему рівнянь (5.4).

Особливості розрахунку геометричних параметрів насадки. Метод розрахунку й профілювання каналів плоскощілинних голівок (рис. 3.4) пропонується визначати рекомендаціями [255] із врахуванням властивостей рідин, для яких вони створюються. Функція $f(x)$, що задає профіль поверхні, може бути однією з наведених у табл. 5.1.

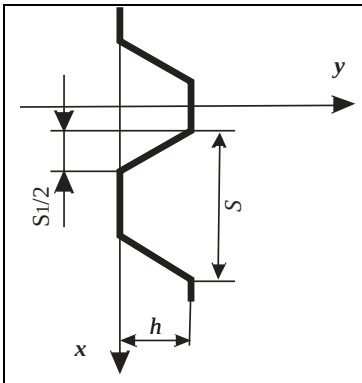
Таким чином, запропонована методика проектування щілинної насадки пожежного ствола рівного опору, що забезпечує одержання плаского гідравлічного струменя й розглянуті питання переходу струминної течії в плівкову, надані рекомендації, що дозволяють інтенсифікувати процеси теплообміну між поверхнею й рідиною.

Таблиця 5.1

Функція $f(x)$, що задає профіль поверхні

Форма профільованої поверхні	Функція $f(x)$ $x=t$ (час)
	Ряд Фур'є $f(x)=\frac{a_c}{2}+\sum_{n=1}^{k}(a_n\cos ns+b_n\sin ns)$, де $a_n=h\frac{S_1}{S}\left(\frac{\sin\pi x}{\pi x}\right)^2\left(\frac{nS_1}{2S}\right), a_0=const, b_n=0$.
	$f(x)=\frac{4}{\pi}\frac{h}{2\varphi}\left(\sin x+\frac{1}{3^2}\sin 3\varphi\cdot\sin 3x+\frac{1}{5^2}\sin 5\varphi\cdot\sin 5x+\frac{1}{7^2}\sin 7\varphi\cdot\sin 7x+...\right)$
	$f(x)=a_0+a_1\sin\frac{2\pi x}{\lambda}$, де a_c й $a_1=const$.
	Ряд Фур'є $f(x)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{k}(a_n\cos nS+b_n\sin nS)$, де $a_n=2h\frac{S_1}{S}\left(\frac{Sin\pi x}{\pi x}\right)\left(\frac{nS_1}{S}\right); b_n=0$, $a_0=const$.

Продовження таблиці 5.1

	Ряд Фур'є $f(x)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{k}(a_n\cos nS+b_n\sin nS)$, де $a_n=h\frac{S_1+S_2}{S}\left(\frac{\sin\pi x}{\pi x}\right)\left[\frac{n(S_1-S_2)}{2S}\right]\left[\frac{n(S_1+S_2)}{2S}\right]$, $b_n=0$, $a_0=const.$

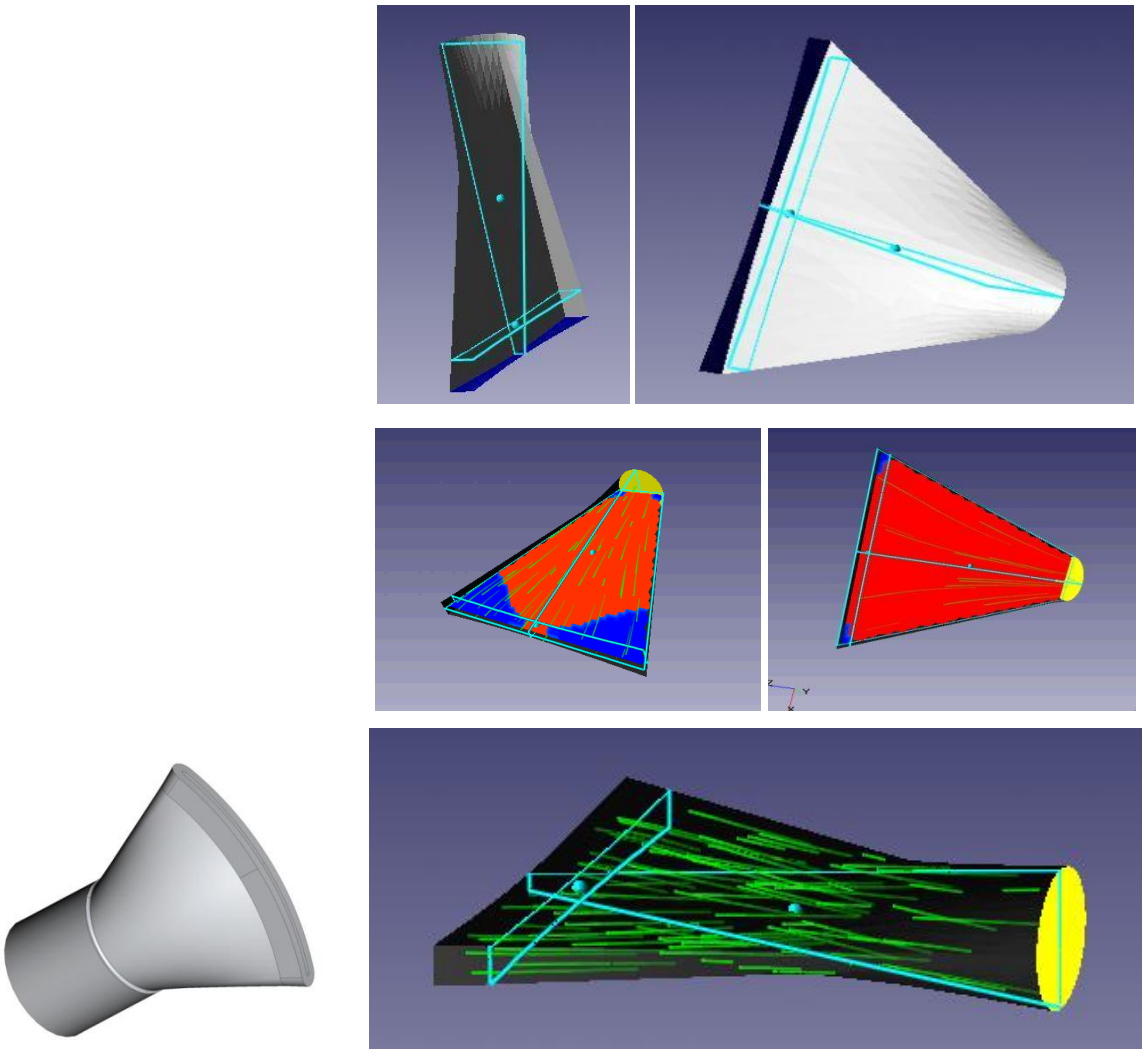
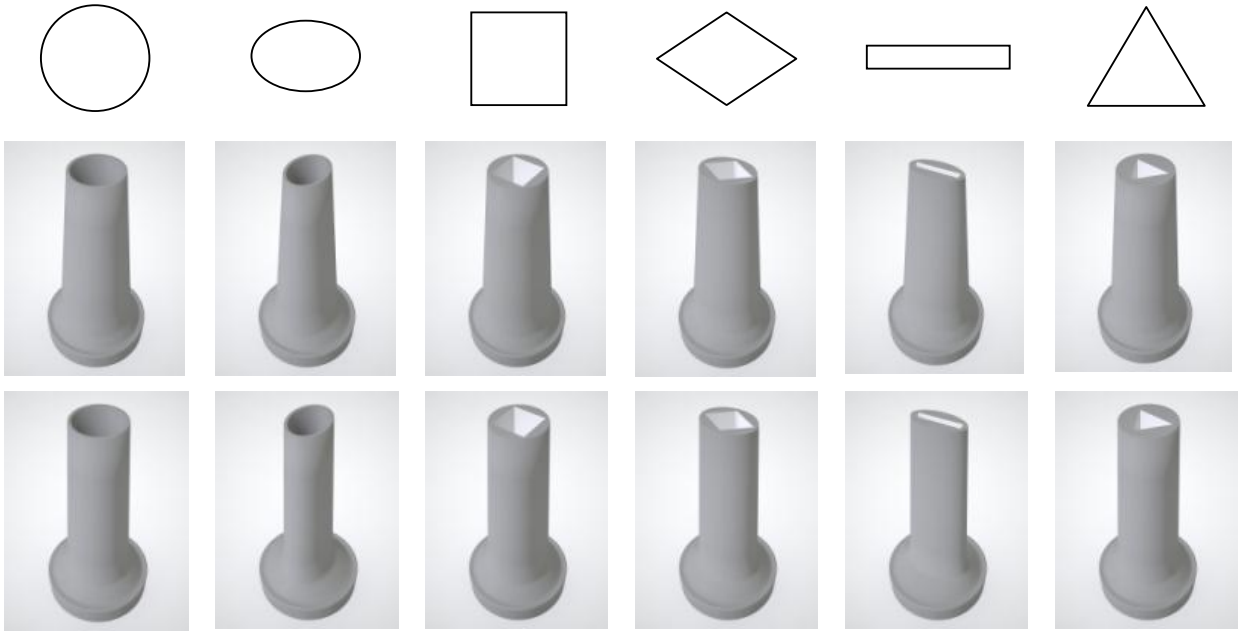


Рис. 5.6 – Використана в Flowvision модель плоскощілинної насадки

Створена комп'ютерна модель щілинної насадки пожежного ствола була опрацьована у спеціалізованому програмному комплексі (рис. 5.6) Flowvision

(для чисельного моделювання стаціонарних і нестаціонарних плинів рідини й газу). Експерименти зі створення й «прогонки» моделі насадки в зазначеному комплексі показали правильність наведених вище розрахунків.



а) б) в) г) д) е)

Рис. 5.7 – Основні типи досліджуваних насадок (за формою вихідного отвору а – кругла; б – овальна; в – квадратна; г – ромбова; д – щілинна; е – трикутна (середній ряд – конусність 5°, нижній - 0°.

Досліджувані типи насадок на пожежний ствол подані на рис. 5.7. Дослідження проводилися з конусністю струминоформувального каналу 0°, 5°, 13°.

5.3. Стратифіковані та змішувані течії

5.3.1. Аналіз течії двошарового струменя

У пульсуючих системах стратифікація потоку за швидкістю або густиною забезпечує можливість керування імпульсом струменя та сприяє зменшенню ексергійних втрат, пов’язаних із турбулентним перемішуванням, що в цілому приводить до підвищення енергетичної ефективності подачі води. Наведемо з деяким наближенням короткий аналіз двошарового потоку, припускаючи про

його рівнотовщинність за умови незмінності співвідношення товщин прошарків. Відповідно до роботи [84] рівняння руху, що описує течію у рідинному струмені (рис. 5.8, 5.9) має вигляд

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} = -\frac{1}{p}\frac{\partial p}{\partial r} + u\left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial z}(ru_r)\right)\right),$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} = -\frac{1}{p}\frac{\partial p}{\partial r} + u\left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u_z}{\partial r}\right)\right),$$

а рівняння нерозривності

$$\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(ru_r) = 0\,.$$

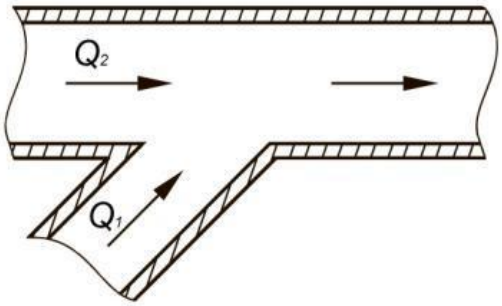


Рис. 5.8 – Представлення руху двошарового струменя

У деяких випадках важливо визначати умови відриву крапель від поверхні струменя. Разом з тим, для пласких двошарових струменів, у припущенні що їх поверхня гладка, як у струменя після виходу з насадки типу «риб'ячого хвоста», задачу про рух рідини можна звести до вигляду, представленого на рис. 5.9.

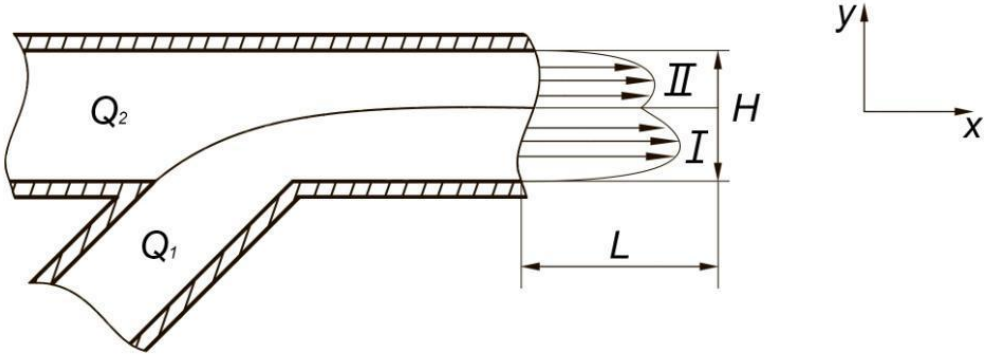


Рис. 5.9 – Рух рідини з епюрами розподілу швидкостей на гідродинамічній початковій ділянці двошарового потоку

Особливість для картини, представленої на рис. 5.9, полягає в тому, що величина h вважається незмінною упродовж ділянки l.

У такому випадку для І-го прошарку маємо

$$\rho\left(\frac{\partial {u_x}^2}{\partial x}+\frac{\partial\left(u_x u_y\right)}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}.$$

Граничні умови будуть $u_x = u_0$ при $y = 0$.

Для другого прошарку маємо

$$\rho\left(\frac{\partial {\tilde{\tilde{u}}_x}^2}{\partial x}+\frac{\partial\left(\tilde{\tilde{u}}_x \tilde{\tilde{u}}_y\right)}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y},$$

а знак $\approx$ над символом швидкості указує на належність другому прошарку.

Значення витрат Q_1 та Q_2, розподіли швидкостей $u(x,y)$ й наближені рішення для розрахунку параметрів плоского гладкого двошарового струменя можна знайти відповідно до [84]. Таким чином, можна визначити особливості розподілу швидкостей на виході із плоскощілинної насадки. Якщо задати розподіл швидкостей для І-го прошарку у вигляді $u(x,y) = a(x)y + b(x)y$, а для ІІ-го прошарку відповідно $\tilde{\tilde{u}}(x,y) = \tilde{\tilde{a}}(x)(H-y) + \tilde{\tilde{b}}(x)(H-y)^2$, то відповідно до [84], знаючи величини $\rho, \tilde{\tilde{\rho}}, \mu, \tilde{\tilde{\mu}}, Q_1, Q_2, H,\ \delta|_{x=x_0}$, можна обчислити $\delta(x), p(x), u(x,y),\ \tilde{\tilde{u}}(x,y), \tau(x,y), \tilde{\tilde{\tau}}(x,y)$.

Випадки незмішуваних двошарових потоків [302] зазвичай можуть спостерігатися лише на початкових гідродинамічних ділянках, більш частими є випадки змішуваності течій.

5.3.2. Змішувані течії

Прикладом отримання змішуваних течій може бути застосування повітряно-пінного ствола. Розробкою даного базового функціонального елемента технічних засобів генерування водяних вогнегасних струменів, що може бути використаний у системі генерування вогнегасних речовин, займалися

П. В. Макаревський В. Д. Перепєчаєв, В. Ю. Береза. Ефективність системи генерування вогнегасних речовин безпосередньо залежить від ефективності зазначеного ствола, яка визначається його технічними характеристиками (дальністю пінного струменя, тиском рідини на виході ствола, коефіцієнтом ежекції піноутворювача тощо) та особливостями його застосування в тому чи іншому випадках. На озброєнні пожежно-рятувальних підрозділів ОРС ЦЗ України знаходяться стволи СППЕ–2, СППЕ–4, СППЕ–8, основними недоліками яких слід назвати: невелику дальність польоту повітряно-пінного струменя; великий опір потоку; відсутність можливості зміни кратності піни; відсутність можливості регулювання кількості піноутворювача (ПУ), який додається до води; відсутність пристроїв-розпилювачів, які дозволили б збільшити поверхню піноутворення в каналі ствола та знизити вихроутворення.

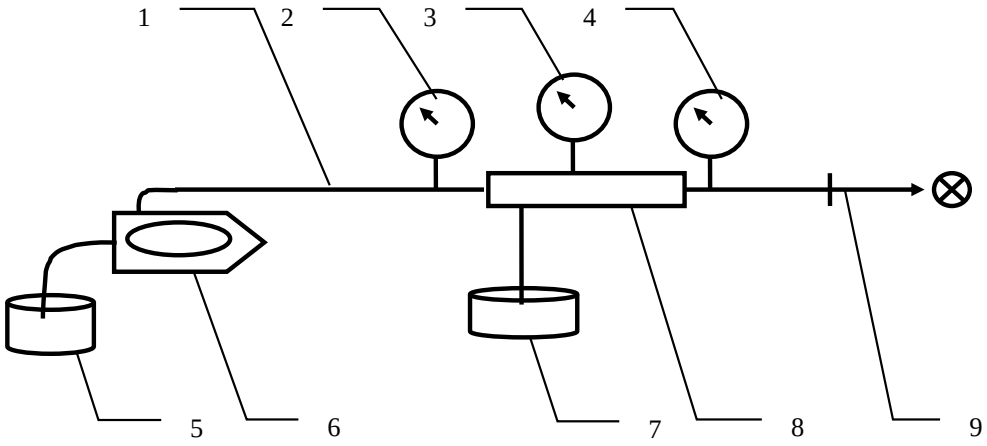
Створення нових конструкцій стволів могло б сприяти зменшенню впливу небезпечних чинників пожежі та економічних збитків від пожеж [303, 304]. Після проведення розрахунків основних параметрів стволів СППЕ–2, СППЕ–4, СППЕ–8 були встановлені причини їх невисокої ефективності та вибрані напрямки вдосконалення конструктивних елементів ствола. Була розроблена методика дослідження гідравлічних параметрів струминних систем та створена лабораторна установка для перевірки проведених розрахунків.

Досягнення підвищених показників ефективності роботи ствола, зокрема зростання його коефіцієнта корисної дії, передбачалося забезпечити за рахунок збільшення дальності подачі струменя, зменшення витрат розчину піноутворювача під час дозування, а також усунення впливу коливань робочого тиску на точність формування концентрації піноутворювача.

Реалізація поставленої мети стала можливою завдяки комплексу конструктивних удосконалень. Зокрема, традиційні діафрагми з отворами були замінені на конічні насадки з оптимізованою геометрією, що супроводжувалося зміною конфігурації вакуумної камери та поперечних перерізів насадок. Додатково знижено гідравлічний опір потоку розчину з ежектованим повітрям

шляхом організації підсмоктування повітря безпосередньо в канал ствола вздовж його осі, у напрямку руху повітряно-механічної піни.

Окрім того, у конструкцію було введено заспокоювач потоку, конічний розпилювач, автоматичний і ручний регулятори-дозатори витрати піноутворювача з конічним клапанним механізмом, а також ручний регулятор кількості підсмоктуваного повітря. Сукупність зазначених рішень забезпечила досягнення заданих експлуатаційних показників і підвищення ефективності роботи ствола в умовах пожежогасіння.



1. З’єднувальний водяний трубопровід
2. Манометр на вході
3. Вакуумметр
4. Манометр на виході
5. Емність з водою
6. Пожежний автомобіль
7. Емність з піноутворювачем
8. Експериментальний елемент струминної установки
9. Пінна насадка

Рис. 5.10 – Схема експериментальної установки дослідження параметрів повітряно-пінного ствола

Експериментальна установка дослідження параметрів повітряно-пінного ствола випробувана у Черкаському інституті пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (рис. 5.10). Результати дослідження з порівняльними характеристиками стосовно існуючих повітряно-пінних стволів наведені в табл. 5.2.

Залежності $\bar{q} = f(p_1)$, $\bar{h} = f(p_1)$, $\bar{\eta} = f(p_1)$, експериментального ствола СППЕ–4 на основі проведених досліджень подані на рис. 5.11. Прийнятий коефіцієнт ежекції $\bar{q}$*= 0,079* для розрахунків, виявився більшим $\bar{q}$ *= 0,067* на 15,2 % внаслідок занижених ежекційних витрат ствола [305, 306].

Таблиця 5.2

Аналіз параметрів ствола СППЕ–4 (ТУ У 14317031.003-95) та експериментального ствола СППЕ–4 за результатами досліджень

Параметри	Середнє арифметичне 10 розмірів ствола експериментального СППЕ-4	Середнє арифметичне 10 розмірів ствола СППЕ-4 ТУ У 14317031,003-95	Відносне значення ± по відношенню до ствола СППЕ-4
Робочий тиск, p_1, кПа	550	550	0
Ежекційний напір, H_E, м	9,68	5,89	+ 36,2
Вакуумметричне розрідження, P_E , кПа	77,1	36,6	+ 52,5
Коефіцієнт ежекції, $\bar{q} = {Q_E}/{Q_1}$	0,0753	0,0327	+ 56,6
Дозування ПУ, *C*, %	5,93	2,68	+ 54,8
ККД , η	0,156	0,105	+ 32,7

Втрати потужності в насосі складаються з декількох складових, а саме: гідравлічних, механічних і об'ємних втрат. Ккд ствола у режимному діапазоні робочих тисків p_1*=0,4–0,6* МПа лежить у межах *0,16–0,23*, що суттєво перевищує параметри високонапірних насосів, для яких η *= 0,10–0,11*.

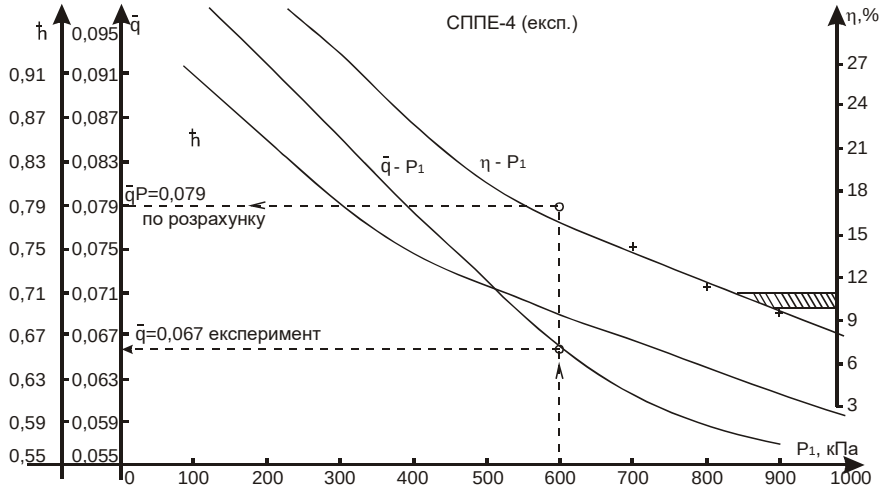


Рис. 5.11 – Графічні залежності $\bar{q} = f(p_1)$, $\bar{h} = f(p_1)$, $\bar{\eta} = f(p_1)$ експериментального ствола СППЕ–4

Графічні залежності робочої концентрації піноутворювача (С, %) у розчині від робочого тиску перед стволом p_1 для експериментального та існуючого варіантів стволів подані на рис. 5.12 за результатами експериментальних досліджень. З аналізу даних показник С, % для існуючого варіанта ствола в 2,22 рази нижче, ніж потрібно за нормативними показниками (або на 55 %). Результати експерименту показують, що для експериментального ствола на режимному тиску $p_1 = 600$ кПа, робоча концентрація піноутворювача нижча розрахункової на 13,3%.

Якісне проектування ежекційного повітряно-пінного ствола, що був взятий як приклад, дає змогу в цілому підвищити якість проектування і ефективність майбутньої експлуатації протипожежної техніки.

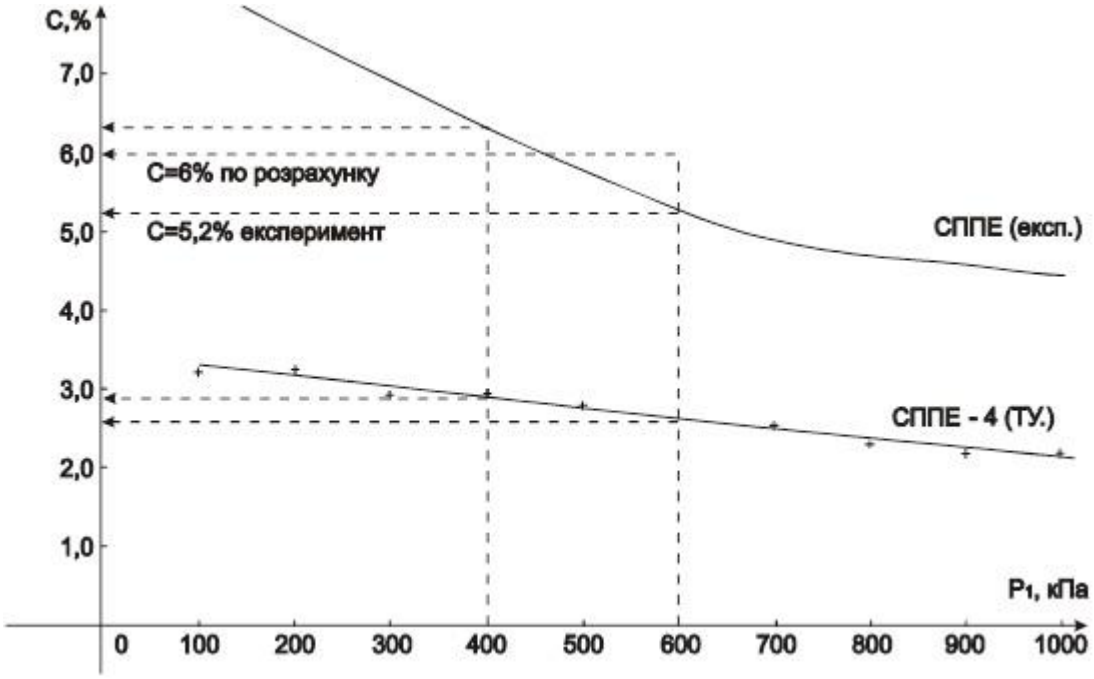


Рис. 5.12 – Графічні залежності робочої концентрації (С, %) піноутворювача у розчині від робочого тиску p_1 перед стволом для експериментального та існуючого варіантів стволів

Питанням розробки піногенераторів з моменту реалізації ідей кінця XIX століття А. Г. Лорана щодо застосування легких рідини із зменшеною плинністю для вирішення задач пожежогасіння були присвячені роботи багатьох вітчизняних і зарубіжних вчених. Ще у 1930 році Л. М. Розенфельд вперше

розробив методику отримання повітряно-механічної піни. З того часу її застосування набуло широкого поширення у різних галузях промисловості, а також у багатьох випадках пожежогасіння. Відповідно, було розроблено чималу кількість варіантів піноутворювачів та, відповідно, методик їх розрахунку.

На практиці застосовуються повітряно-механічні піни низької, середньої й іноді високої кратності, а нинішні тенденції щодо вдосконалення пінного пожежогасіння охоплюють наступні напрямки: створення нових сучасних піноутворювачів або окремих компонентів-добавок до існуючих піноутворювачів, що підвищують їх якість; вдосконалення конструкцій піногенераторів; вдосконалення тактичних прийомів гасіння пожеж із застосуванням піни [307].

В основному пожежно-рятувальні підрозділи ОРС ЦЗ України мають на озброєнні генератори піни середньої кратності та стволи для подачі піни низької кратності. Кратність $K_{\text{п}}$ визначається відношенням об'єму розчину до об'єму піни, що генерується. Далі йдеться лише про генератори піни середньої кратності, для яких кратність піни $K_{\text{п}}$=21…200.

Окремим типом пристроїв для отримання піни, у яких на відміну від повітряно-пінних стволів використовується спосіб вспінення на сітках є пристрої, що отримали назву піногенераторів (ГПС–200, ГПС–600, ГПС–2000 тощо) [308]. У них водяний розчин піноутворювача через відцентровий розпилювач подається на пакет сіток, створюючи в корпусі розрідження, забезпечуючи підсмоктування повітря через задню частину корпуса генератора. На сітках водяний розчин піноутворювача інтенсивно перемішується з повітрям, утворюючи на виході з генератора повітряно-механічну піну.

ГПС–200, що бувобраний у якості прототипа, складається з касети сіток, ременя, корпуса, до корпуса за допомогою чотирьох гвинтів кріпиться корпус розпилювача та з'єднувальна головка (рис. 5.13). Касета є кільцем, обтягнутим по торцевій площині металевою сіткою з розміром чарунки (зазвичай квадратної форми) 0,8–1,25 мм. В корпусі пінний потік формує струмінь піни та збільшує дальність її подачі.

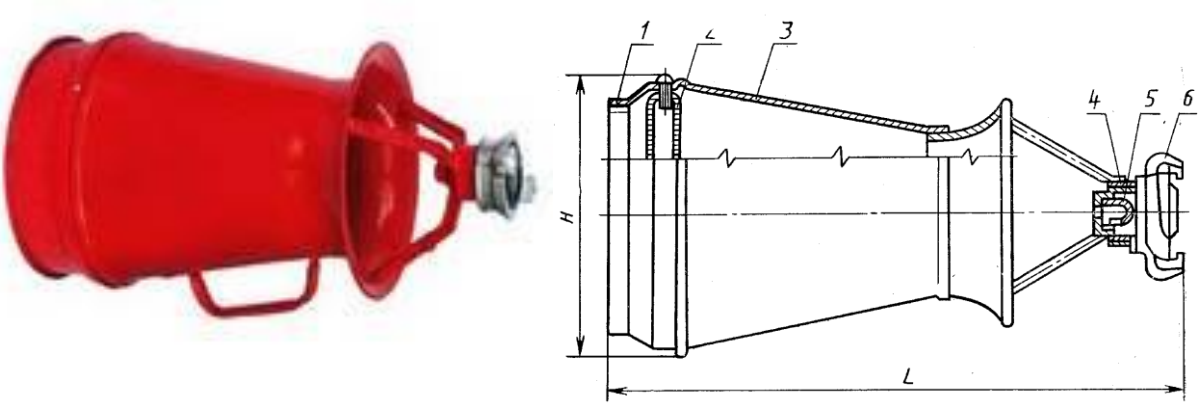


Рис. 5.13 – Піногенератор середньої кратності типу ГПС
1 – насадка; 2 – касета сіток; 3 – корпус генератора; 4 – корпус розпилювача;
5 – розпилювач; 6 – сполучна головка ГМ–50 (L – основний габаритний розмір)



Рис. 5.14 – Піногенератор середньої кратності ГПС–200

У Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України під керівництвом професора О. М. Мирошника було розроблено декілька варіантів піногенераторів «Академія» [307]. За результатами теоретичних розрахунків, у яких враховувалися особливості руху газорідинної суміші та процесу піноутворення, були створені й випробувані дослідні зразки (рис. 5.15, 5.16). Отримані результати дали змогу частково підтвердити висунуті припущення щодо можливості внесення змін до конструкцій піногенераторів, найбільш застосовуваних у практиці пожежогасіння, а також окреслити напрями їх подальшого вдосконалення.

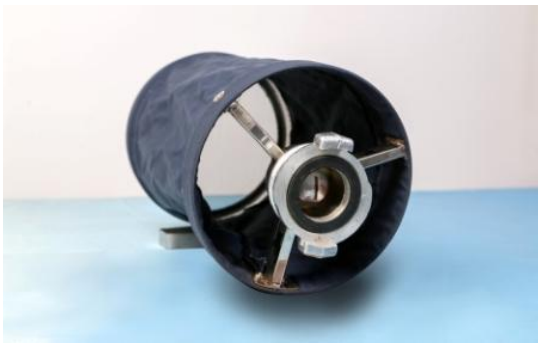


Рис. 5.15 – Піногенератор компактний «Академія–1к»

З метою перевірки існуючих теоретичних положень в області формування пін, а також для підвищення точності вимірів основних досліджуваних параметрів розроблюваного пристрою був застосований раніше розроблений у Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля стенд дослідження водяних струменів [310].

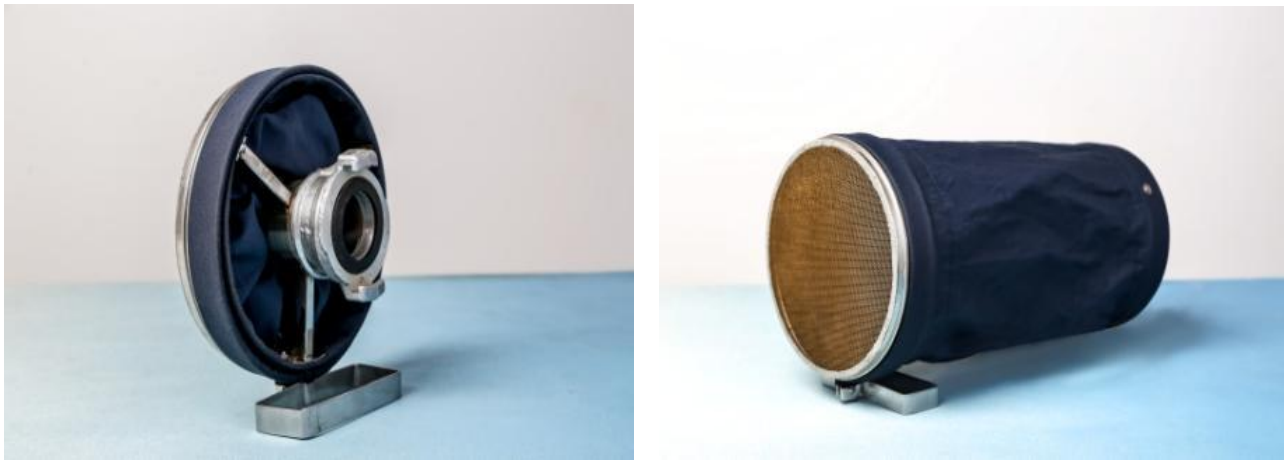
Таблиця 5.3

Показники піногенераторів ГПС-200/600 [309]

Показник	ГПС-200	ГПС-600
Витрати піни, л/с	200	600
Витрати 4-6 % розчину піноутворювача, л/с	1,6…2,0	4,8…6,0
Тиск перед приладом, МПа	0,4…0,6	0,4…0,6
Дальність подачі піни, м, не менше	10	10
Висота подачі піни, м, не менше	3	5
Кратність піни	70…130	70…130
Габаритні розміри, мм довжина діаметр	 485, Ø 230	 610, Ø 355
Маса, кг, не більше	2,40	4,45

Практичні експерименти з використанням стенду підтвердили традиційні уявлення про процес формування пін як із допомогою піногенераторів типу ГПС, так і з застосуванням піногенератора «Академія–1к». Здійснивши вибір числа і умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для вирішення поставленої задачі з необхідною точністю, була проведена процедура

планування експерименту для мінімізації загального числа дослідів без зниження достовірності отримуваних результатів. При експериментальному дослідженні мінімальна кількість вимірювань забезпечила стійке середнє значення вимірюваної величини (кратності піни та витрати рідини), що задовольняла заданому ступеню точності й забезпечила отримання найбільш об'єктивних результатів при мінімальних витратах часу і засобів. Останнє було особливо важливим, зважаючи на відносно високу вартість піноутворювачів, що застосовувалися під час проведення експериментів.



а *б*

Рис. 5.16. – Піногенератор «Академія–1к» у складеному (а) та розкладеному (б) станах

Важливо, що зменшення розмірів піногенератора для спрощення його транспортування до місця застосування не вплинуло на його здатність виконувати основну функцію – генерувати пінні потоки, а розгортання зі складеного до робочого стану не потребувало особливих зусиль та суттєвих додаткових витрат часу. Попередні теоретичні розрахунки й успішні результати випробувань конструкцій піногенератора, дозволили отримати охоронний документ, який засвідчує авторство на винахід [311].

Під час проведення експериментів особлива увага зверталася на дослідження питань, пов’язаних із жорсткістю корпусу розроблюваного пристрою у розкладеному стані (рис. 5.16, б) та впливу типу матеріалу стінки піногенератора та його конусності (рис. 5.17) на параметри отриманої піни. Для

серії проведених експериментів не було виявлено суттєвої відмінності параметрів пін, що були генеровані пристроями ГПС–200 та «Академія–1к».

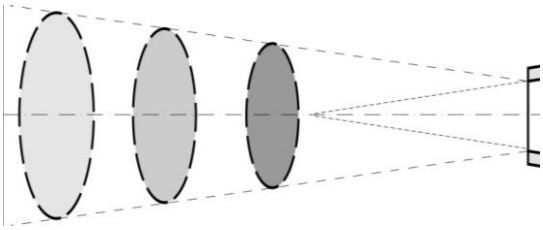


Рис. 5.17 – Розширення потоку у генераторі

Отримані таблиці залежностей параметрів піни від початкових умов, якими у даному випадку були тиск на виході рукавної лінії (0,4–0,6 МПа) та витрати розчину піноутворювача (1,8 л/с), зроблені припущення про якісні закономірності процесу піногенерування. Проведені експерименти із використанням стенда генерування водяних струменів дали змогу стверджувати про перспективність застосування розроблюваних компактних генераторів піни середньої кратності. Серед перспективних варіантів слід назвати моделі із застосуванням кілець та/або пружин, що забезпечуватимуть міцність їх корпусу у робочому стані, а також затосування конструкцій із різними формами вхідних та вихідних зон (рис. 3.1) піногенераторів.

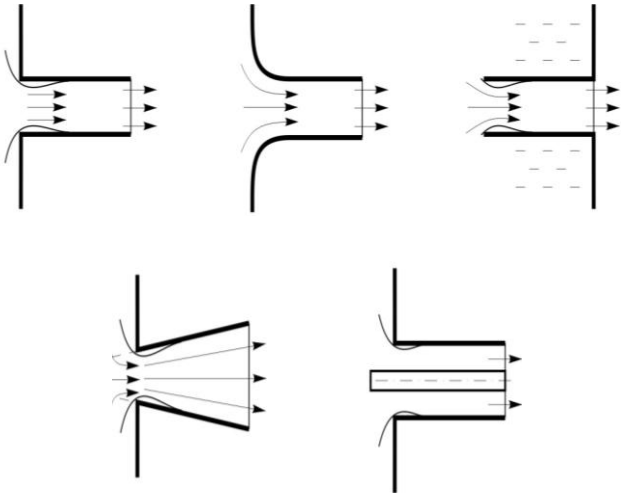


Рис. 5.18 – Форма вхідних та вихідних зон досліджуваних конструкцій піногенераторів

У табл. 5.4 надана порівняльна оцінка характеристик типового

піногенератора та розробленого пристрою.

Таблиця 5.4

Порівняльна таблиця характеристик піногенераторів ГПС–200 та «Академія–1к»

Показник	ГПС-200	«Академія -1к»
Витрати піни, л/с	200	200
Витрати 6 % розчину піноутворювача, л/с	2,0	2,0
Тиск перед приладом, МПа	0,6	0,6
Дальність подачі піни, м, не менше	10	не визначалася
Висота подачі піни, м, не менше	3	не визначалася
Кратність піни	70–130	80–90
Габаритні розміри, у розкладеному стані, мм довжина діаметр	 485, Ø 230	 485, Ø 230
Габаритні розміри, у складеному стані мм довжина діаметр	 - -	 152, Ø 230
Маса, кг, не більше	2,40	1,68

Для випадків застосування двох і більше генераторів піни слід проводити зіставлення гідравлічних характеристик потоків в'язких і аномально-в'язких рідин в гідравлічних системах із транзитними витратами з подібними результатами за умови сталості витрати.

5.4. Врахування чинників впливу на гідродинаміку потоку рідини в струминоформувальних каналах пожежних стволів та насадок

Слід зазначити, що типаж пожежних стволів, як основного елемента пожежно-рятувального обладнання не такий вже великий. Більшість пожежно-рятувальних частин мають у наявності усього кілька типів пожежних стволів. Це пояснюється тим, що в більшості випадків рятувальних операцій одним з визначальних факторів якості «спрацьовування» спеціальних служб, є їхня оперативність. У таких умовах кількість різного обладнання повинна бути мінімальною, проте достатньою. Це накладає відповідні вимоги на універсальність зазначеного обладнання. Тому, зокрема, найчастіше одні й ті ж

самі пожежні стволи використовуються для локалізації й ліквідації всіляких типів пожеж.

Разом з тим, ефективність гасіння різних пожеж вимагає використання різних технологій. Зрозуміло, що, як і в нашому випадку, одне й те ж обладнання не зможе давати однаково якісні результати гасіння при різних типах пожеж. Приміром, скажемо, що іноді потрібно подати великий компактний струмінь на велику відстань, а іноді потрібно спробувати згасити вогнище загоряння склянкою води, перетвореної в туман. У таких суперечливих умовах доводиться знаходити компроміс між універсальністю пожежних стволів і їх можливістю найефективніше гасити кожну конкретну пожежу. Саме тому слід враховувати різні чинники, що впливають на гідродинаміку потоку рідини в струминоформувальних каналах стволів та насадок, для найкращого використання тих чи інших їх особливостей.

Вплив аномалії в'язкості. Аномалія в’язкості рідини у пожежних стволах та насадках впливає на характер руху струменя, змінюючи профіль швидкості, пригнічуючи або посилюючи турбулентність, впливаючи на втрати енергії та імпульсу, а також змінюючи форму і дальність струменя, що в цілому визначає його стабільність та ефективність подачі вогнегасної речовини.

Одним із найважливіших факторів впливу на характер руху рідини у стволах та насадках є в’язкість рідини. Використання терміну «аномалія» обмежується випадками, коли в’язкість суттєво відрізняється від її «звичайного» значення, при чому як у бік збільшення, так і зменшення. В'язкість вважають більшою, коли взаємодія внутрішньомолекулярних силових полів, що перешкоджають відносному рухові двох шарів рідини більша. Зростання чи зменшення в’язкості речовини може бути спричинене, наприклад, зміною температури рідини, зміною концентрації (речовини у розчині), утворенням просторових легкоруйнівних структур вздовж потоку тощо.

Динамічна (абсолютна) в'язкість рідини описує протидію зсуву сусідніх шарів, які рухаються у паралельних напрямках. Коефіцієнт μ називають динамічним коефіцієнтом в’язкості або абсолютною в'язкістю. Кінематична

в'язкість $\nu = {}^{\mu}/_{\rho}$ відображає властивість рідини чинити опір переміщенню однієї частини відносно іншої, але враховує їхню масу.

Для деяких технологічних процесів (рис. 1.5), зокрема пожежогасіння, виникає необхідність досліджень струминних течій неньютонівських рідин. У таких випадках зазвичай йдеться про високомолекулярні структури, оскільки для потреб пожежно-рятувальних підрозділів ОРС ЦЗ України застосовують так звані піноутворювачі, а саме – змочувальні розчини піноутворювачів (використовують замість води з метою підвищення ефективності гасіння неполярних горючих матеріалів). Аномалія в'язкості у таких випадках пояснюється наявністю структурної в'язкості у подібних системах. Структурна в'язкість – це додаткова в'язкість, обумовлена додатковим опором течії з боку внутрішніх надмолекулярних просторових структур – сіток, ниток, великих крапель емульсій. В'язкість таких систем не залишається постійною при збільшенні напруження зсуву, а різко падає, поки не досягає деякої сталої величини.

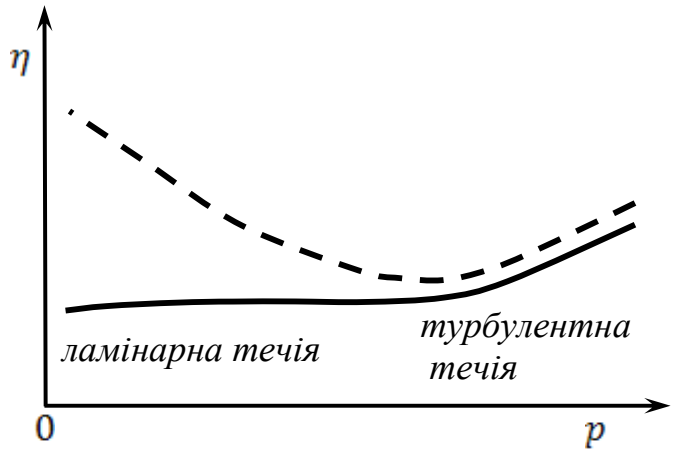


Рис. 5.19 – Залежність в'язкості η розчинів низькомолекулярних речовин ньютонівських рідин (суцільна лінія) і розчинів високомолекулярних структур (пунктир) від напруження зсуву

Високомолекулярні піноутворювачі дають найбільш стійкі піни, причому тривалість життя зростає зі збільшенням концентрації піноутворювача. Гасіння пожеж повітряно-механічною піною, що утворюється завдяки застосуванню

змочувальних розчинів піноутворювачів, відбувається за рахунок ізолювання нею поверхні палаючих речовин від окислювача, її охолодження і частково за рахунок розведення газового горючого середовища водяною парою, що виділяється з піни. Тільки дуже розбавлені розчини піноутворювачів можна вважати такими, що описуються законами Ньютона і Пуазейля. У деяких випадках закономірності формування струменя аномально-в'язких рідин подібні ньютонівським [312]. Однак, є приклади їх суттєвих відмінностей. Як відомо [259], реологічні середовища можна розділити на декілька груп:

- ньютонівські, підпорядковуються закону Ньютона $\tau = k(\dot{\gamma})^n$, ньютонівські реологічні властивості яких залежать від градієнта швидкості $\dot{\gamma}$, наприклад, такі, що відповідають закону Оствальда-де Віля $\tau = k(\dot{\gamma})^n$, де n – індекс течії;

- рідини з реологічними характеристиками, що залежать від часу (наприклад, тиксотропні, і реонектичні середовища);

- в'язкопружні рідини (наприклад, лінійно-в'язко-пружне середовище типу тіла Максвелла $\tau + t_0 {d\tau}/{dt} = \mu\dot{\gamma}$, де t_0 – параметр, що має розмірність часу, що й одержав назву часу релаксації.

У багатьох випадках плин таких рідин є досить складним процесом і супроводжується рядом ефектів. Наприклад, у деяких випадках ефект розширення струменя є дещо схожим на «розбухання» струменя, що характерне для в'язкопружних рідин (ефект Вайссенберга) та структурної турбулентності. Ефект «розбухання» струменів характерний для в'язкопружних рідин, що формуються насадками. Сутність даного ефекту полягає в тому, що діаметр струменя на виході відрізняється від діаметра вихідного перерізу насадки убік його збільшення. Часто цей процес характеризують як високоеластичне відновлення струменя. Оскільки на цей ефект уперше звернув увагу Барус, у літературі його часто називають Барус-ефектом.

Можливе й інше пояснення цього явища. Наприклад, можна припускати, що «розбухання» струменя пов'язане з перерозподілом швидкостей у потоці (від

параболічної до прямокутного в струмені). Інша точка зору на цей процес пояснює розширення струменя хаотичністю в розташуванні довголанцюгових молекул, які орієнтовані по потоці в каналі (пояснення представлені Спенсером і Делоном). Ще одне пояснення – так званий «ефекті пам'яті (властивості реагувати в процесі течії на ті умови, які передували цій течії) в'язкопружної рідини, що протікає через насадку. У таких випадках розбухання характеризується відношенням $\frac{Д}{Д_0} = \frac{\text{діаметр струменя}}{\text{діаметр насадки}}$, залежить від величини $\frac{Z}{Д} = \frac{\text{довжина краплі}}{\text{діаметр струменя}}$. За довжину краплі обирається її максимальний розмір.

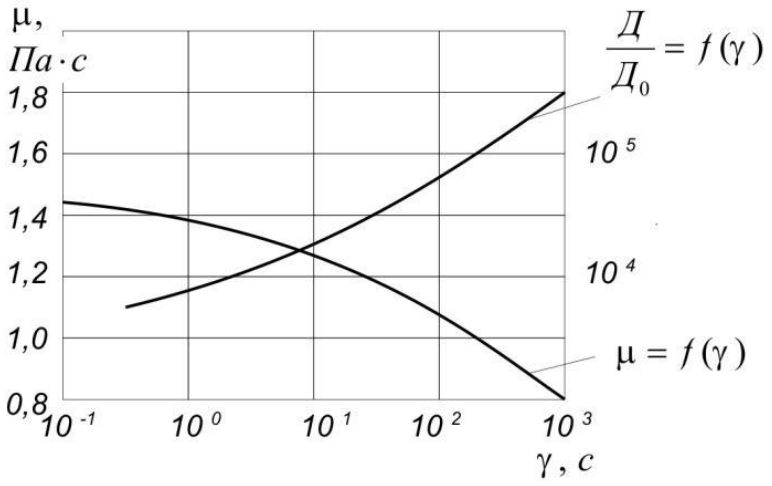


Рис. 5.20 – Залежність відношення $Д/Д_0$ й в'язкості μ від градієнта швидкості

Як показали експериментальні дані, зі збільшенням цього відношення «розбухання» вихідного струменя зменшується. У теж час даний процес можна розглядати як релаксаційний, що показує експонентну залежність від часу проходження через канал розглянутого середовища. Досліди показали [313], що відношення $Д/Д_0$ змінюється для деяких рідин, що формуються вузькими каналами від 1,2 при низьких швидкостях зсуву γ до 0,87 при високих значеннях γ, тобто можна сказати, що $Д/Д_0 = f(\gamma)$. На рис. 5.20 показана залежність відношення $Д/Д_0$ і в'язкості від градієнта швидкості $\dot{\gamma}$ [236, 313]. Зазначимо, що

зменшення в'язкості супроводжується збільшенням $Д/Д_0$ струменя. Все вищезазначене є характерним для початкової гідродинамічної ділянки зазначених типів струменів.

Вплив динамічного тиску. Для потреб пожежно-рятувальних підрозділів ОРС ЦЗ України окрім струменів низького й середнього тисків застосовуються струмені високого тиску. Зазначимо, що використання терміну «високий» відносно тиску є умовним й застосовним лише з окремими уточненнями. Так для технічних систем пожежогасіння високим тиском слід називати значення більші за 4 МПа, хоча для більшості випадків, не пов'язаних із застосуванням засобів для попередження, локалізації та ліквідації надзвичайних ситуацій, такі значення тисків відносять до середніх.

Водяні струмені високого тиску мають практичне застосування, наприклад, для руйнування перепон (типу COBRA–system для формування тонких отворів крізь стіни та подачі високодисперсних вогнегасних середовищ), різання матеріалів, очищення поверхонь тощо. При цьому, перед усім «робочою» є суцільна частина струменя. Вплив тиску на характеристики струменя можна оцінити відношенням довжини основної, зазвичай суцільної, частини струменя до діаметра насадки. Саме на цій частині струменя рух можна вважати квазінеперервним і для його опису застосовувати закони механіки суцільного середовища.

Якщо припустити, що динамічний тиск середовища в якому-небудь перерізі ділянки Z_1 (рис. 2.14) у схемі структури вільного незатопленого турбулентного струменя) дорівнює p_m, то скориставшись даними [314, 315] можна переконатися, що він є функцією від середньої швидкості струменя на початковій ділянці u_0, діаметра насадки d_0, відстані від насадки Z, густини рідини ρ , в'язкості – μ і поверхневого натягу σ. Застосувавши π–теорему можна з'ясувати, що основними критеріями подоби в цьому випадку будуть критерій Рейнольдса й критерій Вебера. Тиск p_m за таких умов буде

$$p_m = p_0 f\left(\frac{l}{d_0}, \frac{u_0 d_0 \rho}{\mu}\right),$$

де $p_0 = {(\rho {u_0}^2)}/{\mu}$ – динамічний тиск струменя на виході з насадки.

Авторами роботи [296, 315] досліджувалися зміни гідродинамічного тиску струменя високого тиску для гідромоніторів різних типів. Довжина гідродинамічної початкової ділянки становила $Z_n = (40 \dots 61) d_0$. У загальному випадку, довжину ділянки Z_n слід визначати

$$Z_n = const\ d_0 \cdot Re,$$

де постійна $const$ зазвичай визначається експериментально й залежить від цілого ряду факторів (реологічних особливостей рідини, її температури, конструкції й форми насадки тощо). У тому випадку, коли рідина має пружні властивості, величина Z_n залежить також і від числа Вайссенберга [259], тобто

$$Z_n = C_1 d_0 Re + C_2 d_0 Wi\ ,$$

де C_1 й C_2 – постійні величини.

Відповідно до даних, наведених у роботі [296], для визначення довжини початкової ділянки пропонується залежність

$$Z_{\text{пд}} = (A - BRe) d_0,$$

де A й B – константи.

Вплив пульсацій тиску. Окрім вищеописаних генераторів пульсацій джерелом пульсацій можуть бути пожежні насоси, що застосовуються для відбирання рідкої вогнегасної речовини з ємкості, водоймища або водопостачальної мережі та подавання її для гасіння пожежі. Важливо, що пульсації тиску чи швидкості, спричинені дією насоса, можуть спостерігатися у потоці рідини за декілька метрів від джерела пульсацій. Враховувати такі пульсації потрібно, оскільки вони є однією із причин нестабілізованості потоку рідини. Шестеренні насоси набули широкого поширення в якості джерел гідравлічної енергії. Це обумовлено рядом їх переваг в порівнянні з іншими типами об'ємних насосів. Однак їм властиві недоліки суттєвих пульсацій на виході насоса і створення замкнених об’ємів. Результати експериментального

дослідження шестерневого насоса, які показали створення кавітаційних бульбашок в замкненому об’ємі при роботі насоса. Внаслідок змін об’єму замкненої камери відбуваються процеси стиснення та розрідження рідини. Коли тиск у рідині падає нижче рівня насиченої пари, виникає кавітація. Окрім цього, обертання шестерень створює вихровий рух рідини, унаслідок чого формуються вихори, у центрах яких спостерігається зниження тиску, тобто вони можуть виступати потенційними зародками кавітаційних явищ.

Застосування високошвидкісної відеофіксації дало змогу детально проаналізувати процес зародження та розвитку кавітаційних явищ у замкненому об’ємі, а також дослідити динаміку деформації кавітаційних бульбашок і каверн, що формуються у таких умовах [316].

Вимірювання миттєвого тиску в лініях нагнітання і всмоктування показали наявність пульсацій. Дослідження були проведені на моделі шестерневого насоса з зовнішнім зачепленням, в якому кришка виконана з прозорого матеріалу для можливості візуальних спостережень. Пульсація тиску викликається пульсаціями витрати, амплітуда яких може бути визначена із залежності

$$A_{\text{пульс}} = \frac{\pi^2}{z^2}\varepsilon\omega^2 {r_0}^2 b\,,$$

де b – ширина шестерні, r_0 – радіус основного кола шестерні, ε – коефіцієнт перекриття, z і ω – число зубів і кутова швидкість ведучої шестерні. Частота пульсацій прямопропорційна частоті обертання валу насоса і кількості його робочих камер.

Використання нових знань про процеси, що відбуваються при експлуатації насосів, дають можливість поліпшити енергетичні характеристики насосів та протипожежної техніки загалом. Відзначимо, що в деяких випадках, наприклад при роботі гідравлічної системи пожежного автомобіля, зазначені пульсації можуть сприяти нестаціонарності потоків рідини та впливати на появу додаткових збурень у струменях та їх поверхні, що в кінцевому підсумку сприяє розпаду останніх.

Вплив магнітного поля. Переважна більшість рідин не мають вільних носіїв заряду, тому вони є діелектриками. Однак, вода чи розчини солей у ній є електролітами, у яких частина нейтральних молекул дисоціює, утворюючи негативно й позитивно заряджені йони. Як відомо [317], на формування потоків, що володіють електропровідними властивостями, може впливати магнітне поле. Насамперед, це виявляється в ослабленні вихоровості потоку. Якщо струмінь буде перебувати в однорідному поперечному магнітному полі, то виникаючі сили $\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$ ($\vec{B}$ – вектор щільності магнітного поля; $\vec{j}$ – вектор щільності струму) будуть сприяти вирівнюванню поля швидкостей. Як показано в роботі [247], «магнітні сили являють собою сили дальнодії: кожен прошарок рідини обмінюється кількістю руху з усіма іншими прошарками – це набагато ефективніший процес в'язкого або турбулентного обміну у звичайних струменях і вихрових слідах».

Вибравши за геометричний масштаб діаметр насадки d, можна відзначити, що при малих значеннях магнітного числа Рейнольдса Re_m ($Re_m = {ud}/{\lambda}$, де λ – коефіцієнт магнітної дифузії), суттєвий вплив магнітних сил на потік буде у випадку ${\rho u}/{\beta B_y^2} \approx d$ тобто, коли $S_m = {\beta B_y^2 d}/{\rho u}$, де S_m – коефіцієнт магнітної сили; β – електропровідність; індекс y вказує на нормаль до напрямку осі каналу. Таким чином, коефіцієнт магнітної сили відображає ступінь впливу на потік магнітного поля у порівнянні із силами інерції.

Врахування такого чинника впливу на гідродинаміку потоку рідини в струминоформувальних каналах насадок як магнітне поле може сприяти ослабленню вихоровості потоку, а також забезпечувати призупинення і, навіть, за деяких умов перекриття-зупинку потоку. У деяких випадках можливо, що вплив чинника магнітного поля може бути використано для розробки конструкцій та механізмів, які потенційно унеможливлювали б ураження пожежника електричним струмом за рахунок часткового або повного перекриття

потоку рідини, проте це залишається предметом подальших досліджень і не є гарантованим ефектом.

Вплив особливостей внутрішної поверхні струмино-формувального каналу. Однією з найважливіших характеристик пожежного ствола, що впливає на параметри сформованого струменя, є шорсткість його внутрішньої поверхні [318]. Для більшості пожеж якість обробки внутрішньої поверхні ствола не відіграє вирішальної ролі при формуванні того або іншого виду струменя. Проте, коли мова йде про такі випадки, як створення рівномірного туману або подачі струменя на максимальну відстань, не можна нехтувати такою характеристикою, як якість покриття робочого каналу ствола.

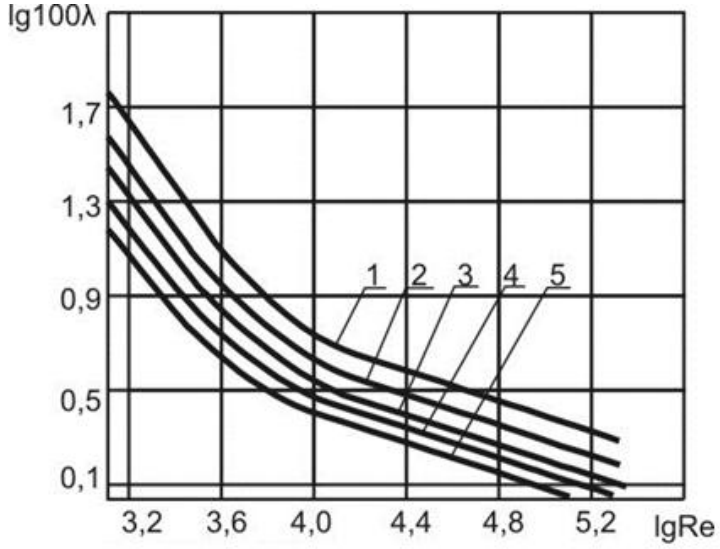


Рис. 5.21 – Залежність зміни коефіцієнта тертя при використанні кремнійорганічного покриття різних типів $\lambda = f(Re)$:
1 – труба без покриття; 2 – труба із КНН–130; 3 – труба із КНН–128;
4 – труба із КНН–127; 5 – труба із КНН–126.

Дослідження, проведені [275, 276, 319] показали, що подібні покриття можуть реалізувати як захисні властивості, так і змінювати шорсткість поверхні труби, сприяти зниженню гідравлічних опорів [320, 321]. Стосовно пожежних стволів інтерес можуть становити кремнійорганічні покриття, розроблені й досліджені в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», а також епоксидні покриття. На

рис. 5.21 (рис. 3.15, а) представлена залежність, що характеризує зміну коефіцієнта тертя при використанні кремнійорганічного покриття різних типів (КНН–130, 128, 127, 126), а на рис. 5.22 – з епоксидним покриттям.

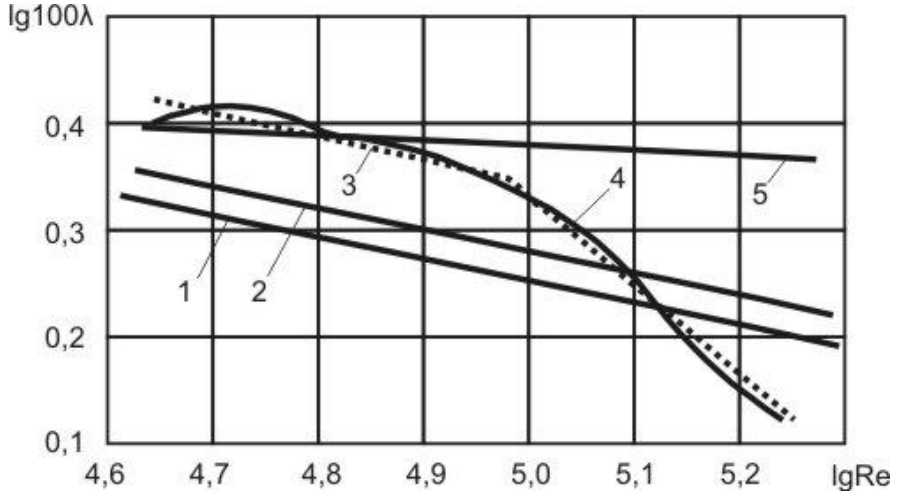


Рис. 5.22 – Залежність $\lg 100\lambda = f(\lg Re)$

1 – для гладких труб; 2 – для поліетиленових труб; $d = 52{,}3$ *мм*; 3, 4 – для сталевих (газових) труб із внутрішнім епоксидним покриттям (3 – лінійна, 4 – статична апроксимація), $d = 52{,}1$ *мм*; 5 – для нових сталевих труб без стиків, $d = 53$ *мм*.

Використовуючи дані із рис. 5.21, 5.22, втрати напору в каналах з покриттям менші приблизно в 2,5 рази, а для кремнійорганічних – в 3,0…3,3 рази аніж у сталевих трубах. Це можна пояснити рядом факторів, у тому числі й істотним зниженням адгезії на границі рідина–покриття, що призводить до ковзання потоку рідини уздовж стінок труби [318]. Враховуючи особливість поверхні покриття, що характеризує її змочуваність, і припускаючи можливість ковзання або прослизання уздовж цієї поверхні при розрахунку коефіцієнтів гідравлічного тертя, необхідно вводити відповідний коригувальний коефіцієнт. Так, наприклад, у проведених дослідах з використанням епоксидних покриттів при числах $Re > 1{,}38 \cdot 10^5$ на поверхні покриття спостерігалося ковзання ламінарного підпрошарку, що приводить до зменшення гідравлічного опору, і отже, підвищення витрати рідини при незмінних перепадах тиску. Аналогічне явище спостерігається й при використанні кремнійорганічних покриттів.

Висновок розрахункової формули для визначення коефіцієнта λ можна зробити відповідно до класичної методики, наведеної в роботі [322].

У випадку, коли на стінці ствола, що має покриття, проявляється ковзання або прослизання, максимальна швидкість зсуву має місце не поблизу стінки, а напруження зсуву перевищує напруження сили тертя на стінки ствола. Таким чином, наявність ковзання спричиняє втрати, які пов'язані функціональною залежністю з величиною швидкості ковзання $U_{\text{ковз}}$ й тим самим вносять нелінійність у криву залежності $\Delta p = f(l)$, де l – довжина ствола.

Одним з можливих методів дослідження даного процесу є метод, запропонований Руссо й Арнасом [323, 324], де вводиться додаткова фіктивна поверхня радіуса $R_{\text{сер}}$, уздовж якої рідина рухається без ковзання, а швидкість рідини на дійсній поверхні дорівнює $U_{\text{ст}}$ (рис. 5.23) [318].

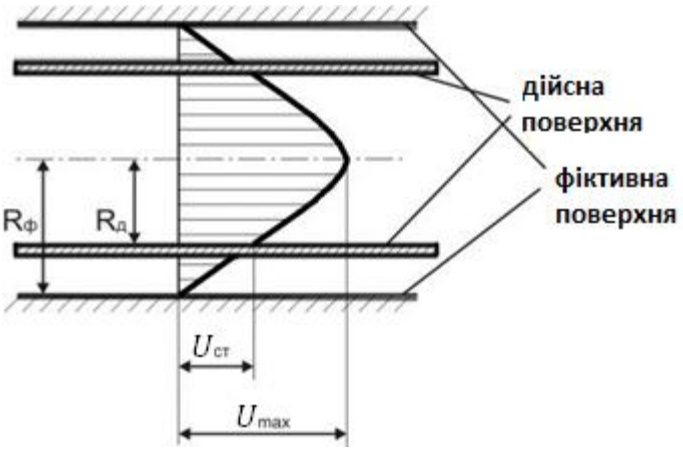


Рис. 5.23 – Розрахункова схема для дослідження течії методом Руссо й Арнаса

Керуючись даною схемою, не становить труднощів визначити залежність $\Delta p = f(Q)$ як функцію величини $U_{\text{ст}}$.

Слід також зазначити, що альтернативним способом визначення залежності $\Delta p = f(Q)$ може бути використання даних, наданих у роботах [324].

Однак необхідно відзначити, що покриття поверхонь не завжди призводить до того, що одержувана поверхня стає ідеально гладкою – у такому випадку коефіцієнт гідравлічного тертя може бути представлений у вигляді суми трьох складових: коефіцієнта гідравлічного тертя гладкої труби; додаткових

коригувальних коефіцієнтів, пов'язаних з наявністю шорсткості; коефіцієнта, що враховує адгезій ні властивості поверхні.

Для автоматичних установок водяного пожежогасіння забезпечення необхідних витрат водної вогнегасної речовини ускладнене втратами енергії за рахунок нестабілізованого руху рідини у магістральній частині трубопроводу. Запропоновано враховувати дії сил інерції від конвективного прискорення, застосовуючи спеціальні добавки до водної вогнегасної речовини. Встановлено, що введення 0,010–0,054% поверхнево-активних речовин, дозволяє збільшити витрати рідини на 9–24% не змінюючи при цьому режими й параметри роботи системи. Для досліджуваної експериментальної схеми максимальне зростання витрати (11,5 %) зафіксоване при введенні 0,021% піноутворювача.

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

Вплив на гідравлічний опір конструктивних особливостей ствола. Ефект зниження гідравлічного опору, як і при наявності покриття, можна спостерігати у випадку, коли ствол має насадку, яка обертається навколо своєї осі (рис. 5.24). [318, 326].

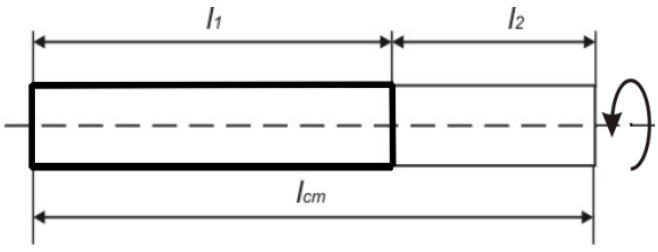


Рис. 5.24 – Ствол довжиною $l_{ст}$ з нерухомою l_1 і обертовою l_2 частинами

Коефіцієнт витрати насадки пожежного ствола має максимум, який зі збільшенням числа Re зникає, і при $Re \geq 10^5$ його значення стабілізується в межах 0,97–0,98 (§3.1.1) [87]. Проведені досліди в діапазоні чисел Рейнольдса $2{,}5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 1{,}0 \cdot 10^5$ при частоті обертів $10^2 \leq n \leq 5 \cdot 10^2$ об/хв, дозволили отримати результати, представлені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5.

Експериментальні значення $\lambda_{\text{досл}}$

n, об/хв	Re	ε	$\lambda_{\text{досл}}$	$\lambda_{\text{за Блазіусом}}$	$\lambda_{\text{досл}}\varepsilon$
204	87000	0,65	0,024	0,018	0,016
204	42250	1,18	0,0183	0,0217	0,0216
350	87500	1,07	0,014	0,0186	0,015
350	45250	2,64	0,0122	0,0217	0,025
455	42500	2,63	0,0091	0,024	0,0239
455	30250	3,9	0,0054	0,0244	0,021

Таким чином, для випадку обертової насадки (якщо поверхня гідравлічно гладка) маємо

$$\lambda = \frac{0{,}3164}{\varepsilon Re^{1/4}},$$

де $\varepsilon = f(n)$, що підтверджує істотне зменшення коефіцієнта λ при обертанні насадки.

5.5. Врахування основних закономірностей розпорошення струменя й умов дроблення крапель

Розглянувши фактори впливу на гідродинаміку потоку рідини в струминоформувальних каналах стволів та насадок, зазначимо, що можливість формування найбільш ефективних струменів безпосередньо в місці їх використання може бути реалізована у випадку найбільш повного з'ясування суті процесів, що відбуваються зі струменями після їхнього вильоту зі ствола або формувальної насадки [327].

Спрощене представлення струменя може бути подане трьохелементною системою (рис. 2.6), що складається з компактної, роздробленої й розпиленої (іноді використовують термін «розпорошеної») ділянок.

Відзначимо, однак, що чіткого поділу на три зазначені ділянки зробити неможливо й у нашому випадку немає необхідності. Більш важливим моментом для наших досліджень є здійснення аналізу тих умов, при яких на поверхні струменя утворюються вихори, відбуваються розриви потоку, формуються й відриваються краплі.

Скористаємося підходом до опису фізичних процесів первинного розпилення рідинних струменів, сформульованого В. Г. Лєвічем.

Модель В. Г. Лєвіча заснована на принципі оборотності в гідравліці. Суть моделі полягає в тому, що передбачається, що рідина в струмені залишається нерухомою, а рухається повітря. Таким чином, взаємодія повітря й поверхні струменя дозволяє відривати краплі [84].

Оскільки струмінь рухається в газовому середовищі, в'язкість якого суттєво нижча аніж у вогнегасної рідини струменя, то з деяким наближенням в'язкість газу можна не враховувати. Шорсткість (нерівність), що утворюється на поверхні рідини у будь-який спосіб, прагне збільшиться. Чим більша швидкість відносного руху, тем сильніше проявляється цей ефект. Якщо амплітуда шорсткості на поверхні струменя буде зростати, то це буде сприяти підвищенню умов відриву крапель від поверхні.

Для оцінки зазначених процесів розглянемо хвилеутворення на поверхні струменя [327]. Якщо струмінь «нерухливий», а рухається повітря уздовж осі $0z$ зі швидкістю $u^{\text{п}}$ (п – повітря), швидкість витікання із сопла складає u_0, а в'язкістю повітря знехтувати, то рівняння безперервності набуде вигляду

$$\Delta\varphi^{\text{п}} = \frac{\partial^2\varphi^{\text{п}}}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2\varphi^{\text{п}}}{\partial\theta^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial\varphi^{\text{п}}}{\partial r}\right) = 0\,, \qquad (5.7)$$

де (r, θ, z) – циліндрична система координат; φ – потенційна енергія.

Граничні умови $u_z^{\text{п}} \to u^{\text{п}}$ й $u_r^{\text{п}} \to 0$ при $r \to \infty$.

На поверхні струменя маємо, що $u_r^{\text{п}} \to u_r$ й $u_z^{\text{п}} \to u_z$ при $r = a$ (радіус струменя) [84].

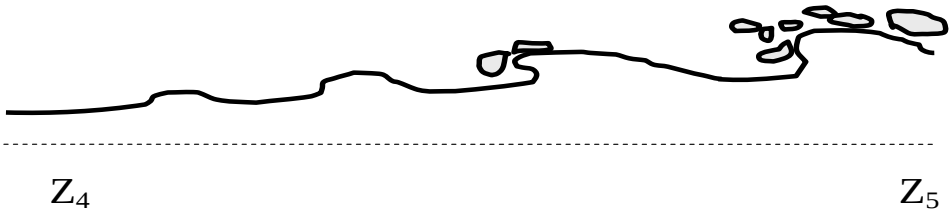


Рис. 5.25 – Фрагмент структури вільного незатопленого турбулентного струменя в частині її дроблення

На поверхні рідини повинна виконуватися умова щодо нормальних напружень

$$p_{zz} = p_\sigma + p^{\text{п}}\,;\;\; p_{rz} = 0\,,$$

де p_σ – поверхневий натяг.

Для випадку, коли на поверхні струменя симетричні хвилі відповідно до [84], маємо

$$\varphi^{\text{п}} = -\,u^{\text{п}} \cdot z + \varphi(r,\theta) \cdot exp(ikz + \alpha t)\,, \qquad (5.8)$$

де k й α – деякі константи.

Якщо підставити (5.7) у рівняння (5.8), то отримаємо

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial \varphi}{\partial r}\right) - k^2\varphi = 0\,.$$

Розвязавши рівняння, маємо

$$\varphi(r) = L \cdot K_0(kr)\,,$$

де $K_0(kr) = \frac{i\pi}{2} I_0^{(1)}(ikr) \cdot exp\left(\frac{i\pi n}{2}\right)$ – тобто Бесселева функція уявного аргументу 2-го роду (функція Макдональда), вона прямує до нуля на нескінченності.

Отже для φ маємо

$$\varphi^{\text{п}} = -\,u^{\text{п}} \cdot z + bK_0(kr) \cdot exp(ikz + \alpha t)\,.$$

Звідси знаходимо розподіл швидкостей (b – амплітуда)

$$u_r^{\text{п}} = -\frac{\partial \varphi}{\partial r} = -\,bkK_0'(kr) \cdot exp(ikz + \alpha t)\,, \qquad (5.9)$$

$$u_z^{\text{п}} = -\frac{\partial \varphi}{\partial r} = u^{\text{п}} - ibK_0(kr) \cdot exp(ikz + \alpha t).$$

Амплітуда хвиль на поверхні струменя ξ_0 й швидкість газу на нескінченності u_0 (дорівнює швидкості вильоту струменя із сопла) пов'язані зі швидкістю $u^{\text{п}}$ співвідношенням

$$u_0 = u^{\text{п}} ln \frac{a}{\xi_0},$$

де a – діаметр струменя.

Відомо, що $p_\sigma = \sigma \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$, тоді $p_{zz} = p_\sigma + p^{\text{п}}$.

Визначення величини поверхневого натягу p_σ [84] при різних значеннях довжини хвилі й швидкості u_0 дозволяє проаналізувати процес початку дроблення струменя [327].

Параметр α (комплексна частота) суттєво залежить від хвильового числа k

$$k = k_{max} = \frac{2}{3} \frac{\rho^{\text{п}} (u^{\text{п}})^2}{\sigma}, \tag{5.10}$$

$$\alpha_{max} = 0{,}4 \frac{(u^{\text{п}})^3}{\sigma} \sqrt{\frac{(\rho^{\text{п}})^3}{\rho}}, \tag{5.11}$$

За час t

$$t = \frac{1}{\alpha_{max}} \approx 2{,}6 \frac{\sigma}{(u^{\text{п}})^3} \sqrt{\frac{\rho}{(\rho^{\text{п}})^3}}, \tag{5.12}$$

амплітуда хвилі збільшується в e раз.

Зростання амплітуди хвилі приводить до руйнування вільної поверхні рідини.

Якщо хвилі короткі, руйнуванню поверхні струменя відповідає відрив крапель, розмір яких за порядком величини обумовлюється довжиною нестійкої хвилі

$$z = \frac{1}{k_{max}} \cdot \frac{\sigma}{\rho^{\text{п}} (u^{\text{п}})^2}, \tag{5.13}$$

Поряд із краплями, розмір яких визначається

$$k = k_{max} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\rho^{\text{п}} (u^{\text{п}})^2}{\sigma}, \qquad (5.14)$$

виникають краплі інших розмірів, хвильове число яких задовольняє нерівність

$$k \leq \frac{\rho^{\text{п}} (u^{\text{п}})^2}{\sigma}.$$

Енергія, передана поверхні рідини повітряним потоком, що рухається зі швидкістю $u^{\text{п}}$ за час T, становить [327]

$$E = \rho^{\text{п}} \left(u^{\text{п}} - \frac{\omega}{k}\right)^2 \omega {k_0}^2 ST,$$

де $\left(u^{\text{п}} - \frac{\omega}{k}\right)$ – відносна швидкість газу; $\frac{\omega}{k}$ – швидкість поширення хвиль із частотою ω; S– поверхня рідини (поверхня струменя).

Енергія, затрачувана на утворення крапель об'ємом $\frac{4\pi}{3} {z_0}^3$

$$E_{\text{крап}} = \sigma 4\pi {z_0}^2 N = \sigma 4\pi {z_0}^2 \frac{V}{\frac{4\pi}{3} {z_0}^3} \approx \sigma \frac{V}{L_0}.$$

Дисипована енергія складає

$$E_{\text{дис}} = \rho u \omega^2 k_0 ST.$$

З балансу енергії визначаємо час T

$$T \approx t \frac{a}{z_0} \approx \sqrt{\frac{\rho}{\rho^{\text{п}}}} \cdot \frac{a}{u^{\text{п}}}.$$

У цьому випадку довжина суцільної частини струменя може бути обчислена [84]

$$z_{\text{суц}} \approx T u^{\text{п}} \approx \sqrt{\frac{\rho}{\rho^{\text{п}}}} \cdot a \approx 30a.$$

Критерії, які можна використовувати для різних довжин струменів. При наявності зовнішніх сил, а саме, сили тяжіння, відцентрової сили, інерції, задача є багатопараметричною і визначається наступними безрозмірними критеріями [328]

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu};\ Bo = \frac{\rho_2 g d^2}{\sigma};\ We = \frac{\rho u^2 d}{\sigma};\ \frac{\rho_1}{\rho_2};\ \frac{\mu_1}{\mu_2}, \qquad (5.15)$$

де представлені критерії Рейнольдса, Бонда, Вебера, відношення густин і відношення в’язкості газу й рідини.

У цих критеріях прийняті наступні позначення: u – швидкість суцільного середовища (газу); ρ_1, ρ_2 – відповідно густина (щільність) газу й рідини; μ_1, μ_2 – динамічна в'язкість, відповідно газу й рідини; d – діаметр крапель; g – прискорення вільного падіння; σ – коефіцієнт поверхневого натягу.

Висновки до розділу 5

1. Запропоновано для вогнегасних струменів з круглим поперечним перерізом розглядати початкову ділянку компактної частини струменя за аналогією з моделлю нестабілізованої течії в стволі або насадці.

2. Запропонований спосіб розрахунку геометричних параметрів плоскощілинних насадок та надані рекомендації щодо визначення товщини отримуваних за їх допомогою завіс.

3. Встановлено, що втрати напору в каналах установок водяного пожежогасіння з внутрішнім епоксидним покриттям менші приблизно в 2,5 рази, а для кремнійорганічних – в 3,0–3,3 рази аніж у сталевих трубах, що можна пояснити рядом факторів, у тому числі й істотним зниженням адгезії на границі рідина–покриття, яке призводить до ковзання потоку рідини уздовж стінок трубопроводів.

4. Для установок водяного пожежогасіння забезпечення необхідних витрат водної вогнегасної речовини ускладнене втратами енергії за рахунок нестабілізованого руху рідини у магістральній частині трубопроводу. Запропоновано враховувати дії сил інерції від конвективного прискорення, застосовуючи спеціальні добавки до водної вогнегасної речовини для збільшення продуктивності усієї системи автоматичного водяного пожежогасіння та рівномірності витрат зрошувачів. Встановлено, що введення 0,010–0,054% поверхнево-активних речовин, дозволяє збільшити витрати рідини на 9–24% не змінюючи при цьому режими й параметри роботи системи. Для

досліджуваної експериментальної схеми максимальне зростання витрати (11,5 %) зафіксоване при введенні 0,021% піноутворювача.

5. Запропоновано аналізувати процес початку дроблення струменя відповідно до моделі В. Г. Лєвіча, при цьому характеристикою струменя може бути довжина його суцільної частини прямопропорційна кореню відношення густин вогнегасної речовини й повітря й складає близько 30 значень діаметрів вихідного отвору. Досліджено безрозмірну закономірність падіння тиску струменя на виході з насадки та встановлено узагальнену залежність відносного тиску *J(D)* від її конструктивних характеристик, що має вигляд $J(D) = -2{,}533 \cdot 10^{-10} \cdot D + 0{,}231$.

6. При наявності зовнішніх сил, а саме, сили тяжіння, відцентрової сили, інерції визначено критерії, які можна використовувати для різних довжин струменів. Окрім чисел Рейнольдса, Бонда і Вебера, запропоновано застосовувати безрозмірні критерії відношення густин $\rho_{\text{пов}}/\rho_{\text{р}}$ і відношення в'язкості газу й рідини $\mu_{\text{пов}}/\mu_{\text{р}}$.

7. Розглянуті приклади застосування змішуваних течій на прикладі повітряно-пінного ствола та піногенератора нової конструкції «Академія–1к».

РОЗДІЛ 6
ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНОЇ СИСТЕМИ ФОРМУВАННЯ РІДИННИХ ВОГНЕГАСНИХ СТРУМЕНІВ

6.1. Розробка стенда для проведення гідродинамічних випробувань та дослідження вогнегасних струменів. Цілі й задачі фізичного моделювання гідравлічної системи формування струменів

Фізичне моделювання покликане в нашому випадку підтвердити або спростувати отримані теоретичні результати щодо гідравлічної системи формування струменів. Моделювання здійснювалося на установках, які зберігали природу явищ при фізичній подобі. При проведенні фізичного моделювання на створених установках між процесами в об'єкті-оригіналі (системі пожежогасіння) і в моделі виконувались співвідношення подібності, що випливали зі схожості фізичних явищ і режимів роботи реального об'єкта і лабораторних установок. Установки створювалися й експлуатувалися в НУЦЗ України упродовж останніх 17 років за участі автора цієї роботи. Загалом, взявши до розгляду тільки кількісну оцінку, слід сказати, що було проведено більше двох з половиною тисяч експериментів, деякі з яких були швидкоплинними і нескладними, а деякі вимагали суттєвих фінансових, матеріальних, часових витрат. В окремих випадках проведення досліджень та фіксування результатів вимагало одночасної участі більше десяти експериментаторів.

Оскільки система формування струменів для проведення пожежогасіння має ряд суттєвих особливостей, стояло завдання при створенні лабораторних установок забезпечити їх майбутнє функціонування максимально, на скільки це можливо, наближеним до реальних умов, в яких функціонує подібне пожежне обладнання. Також, було враховано вимогу відображати результати у вигляді, зручному, як для їх аналізу, так і для їх зберігання і передачі електронно-технічними засобами. При створенні лабораторних установок, важливим

моментом виявилося створення окремого модуля, головним завданням якого було забезпечення збору експериментальних даних та їх обробки сучасними засобами обчислювальної техніки. 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 її функціонування при постійному зніманні вихідних даних експериментів. Таким чином, суттєво спростилася задача знаходження оптимальних режимів роботи установок (за різними критеріями). Виведення результатів проведення експериментів у зручному графічному вигляді дало можливість оперативно вносити зміни в ході проведення експериментів, досягаючи при цьому оптимізації тих чи інших параметрів.

Вищевикладене добре узгоджувалося з одним із найважливіших завдань системного аналізу – мінімізацією або максимізацією цільової функції.

Проектування складних систем, зокрема створення та експлуатація дослідних установок, передбачає комплексне вирішення низки завдань. До них належать формування моделей функціонування системи та її елементів управління, розробка моделей оцінки ефективності роботи, а також визначення структурних характеристик системи, які істотно впливають на якість керування (оцінка чутливості системи). Крім того, необхідно визначати оптимальні значення цих структурних параметрів відповідно до заданих критеріїв якості керування та інших додаткових показників ефективності.

Функцією F системи $\sum$ називаємо таке її функціонування, що визначається скінченим числом правил (алгоритмом), на підставі яких може бути здійснено фізичну реалізацію системи $\sum$, і які здатні виконувати дану дію.

За таких умов сукупність (набір s) функцій $F_s(s = 1,2, \dots, N)$, де N – кількість функцій, що властиві деякій системі $\sum_k$, визначатиме її цільове призначення.

Ціллю функціонування системи $\sum_k$ є деяка композиція функцій $K_k\{F_s\}$, що формується, як правило, у вигляді зовнішнього доповнення за межами системи. Система здатна виконувати дану дію, або комплекс дій, якщо на множині F

(сукупності функцій F_s) може існувати композиція $K_k\{F_s\}$. Однією із вагомих ознак системи керування є ієрархічна структура зв'язків між загальним критерієм для усієї системи в цілому і частинними локальними критеріями, що формуються для окремих підсистем різних рівнів ієрархії.

У роботі [329] запропоновано у випадку виникнення необхідності та існування можливості керування процесами в області програмування усього життєвого циклу ОНТ використовувати систему вкладених технологій (рис. 6.1).

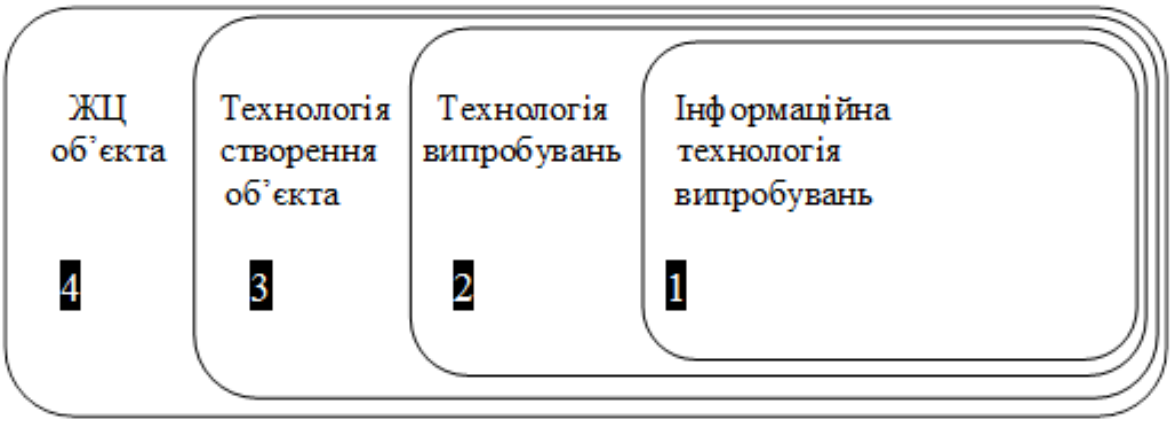


Рис. 6.1 – Система вкладених технологій

Відповідно до теорії системного проектування об'єктів нової техніки наведена схема може бути більш деталізована у залежності від вибраного рівня розгляду її окремих частин.

Відповідно до принципів створення моделі складної системи, яка може бути побудована на основі динамічної моделі Калмана [330] та орієнтована на опис процесу функціонування системи із можливістю агрегації елементів у підсистеми і декомпозиції підсистем на елементи, позначаємо: $E = \{e_i, i \in I_e\}$ – множина елементів; $H = \{h_i, i \in I_p\}$ – множина властивостей елементів.

Для процесу формування струменів маємо ряд вхідних змінних $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ і ряд вихідних $y_1, y_2, y_3, \dots, y_m$.

Цільова функція, що зазвичай має багато аргументів $F = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, формується штучно на основі рівнянь, що описують об'єкт оптимізації.

Для знаходження оптимального значення цільової функції окремі вихідні характеристики необхідно максимізувати (дальність, дисперсність, витрати рідини), інші – мінімізувати (енергетичні витрати). Положення оптимуму для різних вихідних змінних зазвичай не збігається, тому при складанні цільової функції слід шукати деяке компромісне рішення.

Таким чином, вектор вхідних змінних $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ є вектором керованих (варійованих) параметрів, а $F(X)$ – цільова функція; X_{admis} – допустима область; X_{exist} – простір, в якому визначена цільова функція; $\varphi_k(X)$ й $\varphi_r(X)$ – функції-обмеження. Формулюємо задачу: знайти екстремум цільової функції $F(X)$ в межах області X_{admis}, обмеженої в просторі X_{exist} нерівностями $\varphi_k(X) \geq 0$ та рівностями $\varphi_r(X) = 0$.

Цільову функцію формуємо виходячи з наявних уявлень про якість проектованого об'єкта – її значення повинне зменшуватися з поліпшенням якості, ($extr - min$). Тобто для випадку ексергетичної оптимізації системи генерування водяних струменів $F_{extr} = F_{min}$.

У якості цілі вбачаємо такий стан системи, який досягнуто в результаті дії зворотного зв’язку, зазначене відтворено представленою системною моделлю (рис. 6.2). Відповідно до системної моделі процес ціледосягнення по суті є процесом реалізації плану (процесом прийняття рішень під час реалізації плану).

Наведена системна модель є конструктивною основою для постановки та рішення у вигляді системної оптимізації задач ціледосягнення та цілепокладання як динамічного процесу прийняття рішень. Створення такої моделі є необхідною умовою при системному проектуванні та організації процесу прийняття рішення про розв’язуваність загальної задачі системного проектування системи генерування вогнегасних струменів, що на ранніх етапах життєвого циклу дає змогу визначити принципову можливість та доцільність проведення усього комплексу робіт проектування.

Задача цілепокладання. Базуючись на системі цілей {G}, потрібно визначити систему задач {S} та, відповідно, систему алгоритмів {A} і систему підрозділів {T} для забезпечення виконання системи цілей {G}.

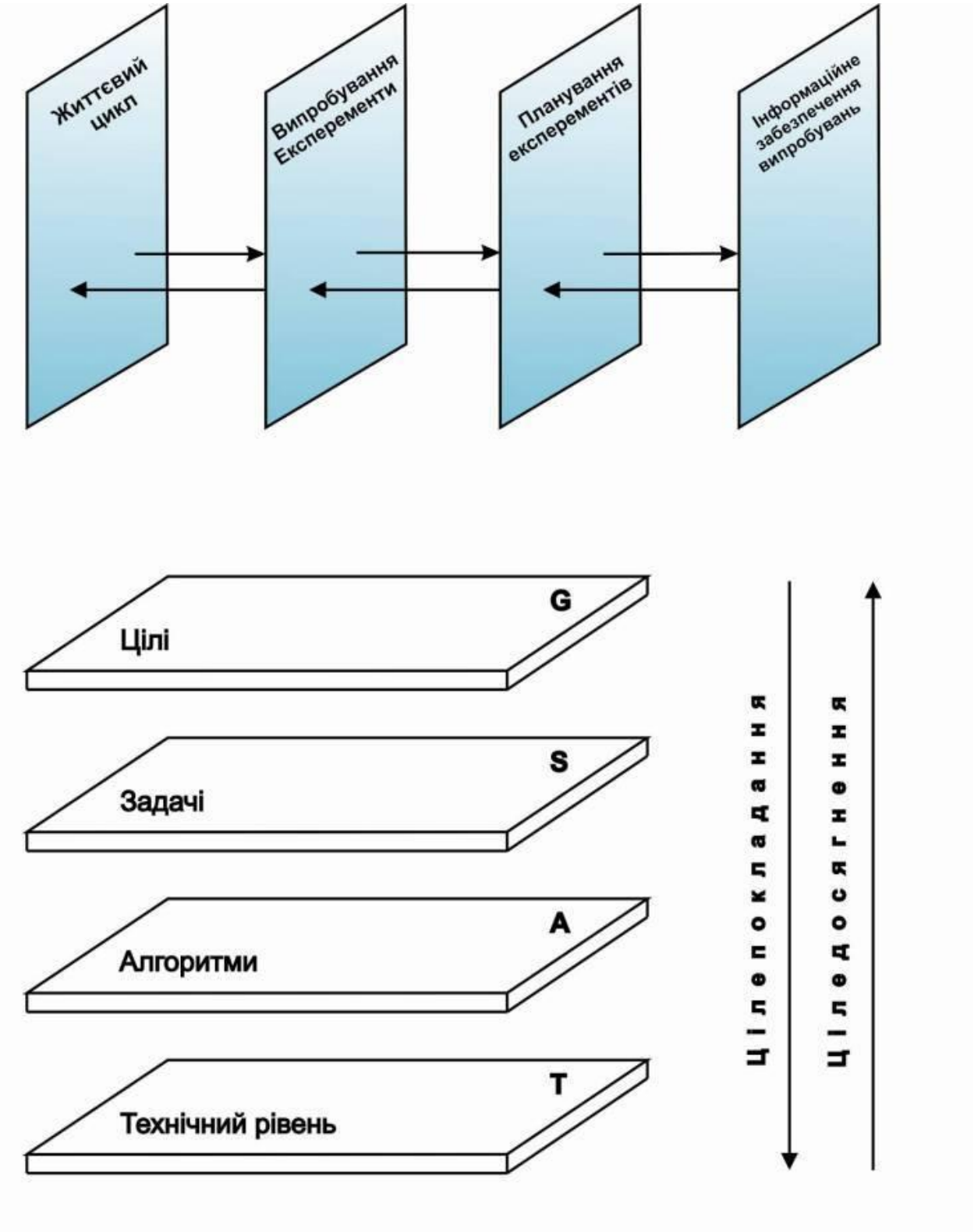


Рис. 6.2 – Системна модель об’єкта проектування

Задача цілеdосягнення. При відомих {G}, {S}, {A}, {T} потрібно визначити модель керуючої частини підсистеми {T}, що забезпечувала б досягнення цілей із {G}.

6.2. Методи аналізу гідравлічних струменів

Формування гідравлічного струменя є складним фізико-технічним процесом, який безпосередньо залежить від типу струминоформувальної системи, принципів її функціонування, конструктивних особливостей елементів її системи, речовини струменя, місця й особливостей застосування струменів. Здійснення детального аналізу гідравлічних струменів має виходити за рамки аналізу процесів, що відбуваються у кінцевому елементі системи струминоформування, – пожежного ствола, насадки чи у розгалужених трубопроводах систем водяного пожежогасіння, оскільки певний вплив на характеристики струменя чинять генератори тиску, пульсатори, комунікації підведення речовини до ствола, середовище, в яке спрямовується струмінь тощо. Таким чином, аналіз гідравлічних струменів є складним процесом, що потребує використання великої кількості самих різних методів аналізу усієї системи загалом та окремих елементів струминоформування зокрема. Вкажемо деякі з підходів, що дозволяють його здійснити.

Як показано на рис. 4.6, дослідження гідравлічних систем доцільно проводити з трьох взаємопов’язаних позицій. Функціональний підхід дозволяє оцінити ті властивості системи, якими вона володіє в конкретний момент часу. Морфологічний підхід надає можливість сформувати цілісне уявлення про систему, акцентуючи увагу на її структурі як сукупності елементів і взаємозв’язків між ними. Інформаційна позиція дає змогу визначити, як структура та функціональні параметри системи залежать від обсягу та якості внутрішньої й зовнішньої інформації [292].

Область досліджень у галузі цивільного захисту населення завжди є в числі пріоритетних державних напрямків високоцивілізованих країн. Суттєвою

підмогою має бути аналіз існуючих та створення нових перспективних систем пожежогасіння в цілому та їх елементів зокрема. Системи струминоформування для потреб пожежогасіння можна віднести до засобів, призначених для технічної реалізації перспективних систем у галузі цивільного захисту населення.

Енергетичний (ентальпійний) і ексергетичний аналізи є методиками, заснованими на визначенні енергії або ексергії потоків в досліджуваній системі, а також побудові енергетичного або ексергетичного балансу об'єктів, що поєднуються цими потоками. Дані інструменти являють собою маловитратні методології, що дозволяють отримати суттєву користь з моніторингу технологічних процесів, до яких також відноситься й пожежогасіння (рис. 1.4-1.6). Вони також дозволяють виявити ділянки процесу (наприклад, струминоформування), де є потенціал енергозбереження. Інформація, отримана за допомогою таких методів, може бути використана в якості вихідних даних для інших інструментів аналізу і представлення даних. Також енергія «зекономлена» в результаті аналізу та коригування технічних систем може бути направлена всередину самої системи, що досліджується (наприклад, для збільшення дальності подачі струменя). Таким чином, ексергійний метод може бути ефективним інструментом системного підходу до створення об’єктів нової техніки, або ж аналізу вже існуючої, з метою досягнення максимальної ефективності усієї системи, досягнення оптимального значення цільової функції.

У даному сенсі пропонується застосувати перспективний метод ексергійного дослідження технічних систем струминної техніки [292, 370].

В ексергійному методі аналізу враховується кількість і якість потоків енергії, аналізується виключно та частина енергоресурсів (потік роботи, маса робочих тіл, теплота тощо), яка є працездатною [331]. Ексергетичний метод був сформований в 60-х роках минулого століття в роботах І. Шаргута і Р. Петели, П. Грассмана, З. Ранта, а згодом у роботах В. М. Бродянского, В. С. Степанова, І. Л. Лейтеса. Ексергетичний метод володіє великими можливостями, в його рамках можна проводити: оцінку термодинамічної ефективності різних технологічних процесів; виявлення ступеня незворотності розглянутих технологічних процесів;

виявлення та кількісне визначення втрат, які взагалі не виявляються при ентальпійному аналізі, втрат від незворотності процесів горіння, теплообміну, змішування, дроселювання; розробку рекомендацій термодинамічного вдосконалення процесів [331].

Випаровуючись, вода як вогнегасна речовина теоретично здатна забезпечувати охолодження (за рахунок питомої теплоти пароутворення) на рівні 2,26 МВт/л. Проте в реальних умовах пожежогасіння досягнення такої ефективності потребує значно більшої кількості води [332], оскільки повне використання потенційної охолоджуючої здатності можливе лише за умови її повного випаровування безпосередньо у вогнищі пожежі. Наближення до так званого «сухого» пожежогасіння відбувається за рахунок збільшення частки води, яка реально бере участь у відборі тепла від осередку горіння.

Це зауваження має ключове значення при дослідженні та ефективному застосуванні струминних потоків. Для створення оптимальної системи гасіння необхідно спроектувати схему (рис. 4.23), яка дозволяє передавати енергію від двигуна пожежного автомобіля до моменту остаточного розпилення струменя, забезпечуючи мінімальні втрати початкової енергії та максимальну ефективність процесу гасіння.

Стосовно вітчизняної протипожежної та аварійно-рятувальної техніки, можна стверджувати, що у більшості випадків мова йде про тиск $P = 0{,}22 - 4{,}0$ МПа, об'ємні витрати рідини $Q = \frac{V}{t} = 0{,}1 - 100$ л/с (V – об'єм рідини через живий переріз потоку), та швидкість струменя на вильоті із формувального пристрою $u = 10 - 400$ м/с.

Енергетична ефективність технічної системи визначається тим, наскільки повно в ній використовується вся енергія, тобто наскільки низькими є її втрати для досягнення поставлених перед системою технологічних завдань. Основу такої оптимізації становить ексергійний метод, що дозволяє виразити через ексергію, тобто в однакових одиницях, енергетичну цінність потоків енергії і речовини і врахувати не тільки їх кількісно, але і якісно. Таким чином, можна

вважати ексергійний метод в числі базових серед існуючих методів аналізу гідравлічних вогнегасних струменів.

Як було зазначено у розділі 4, з огляду конструкцій протипожежної техніки та елементів їх струминоформування, серед базових складових гідравлічних схем є генератори тиску і системи їх керування, пристрої забезпечення створення пульсацій потоків, гідравлічна підвідна система і пожежний ствол рис. 6.3. (уточнення принципової схеми системи формування струминних потоків у пожежній автоцистерні, рис. 4.23.). Кожен із блоків рис. 6.3. вносить свій вклад у процес струминоформування, тому аналізу має піддаватись кожен із них, не слід забувати про зв'язки між елементами, що також впливають на функціонування системи загалом.

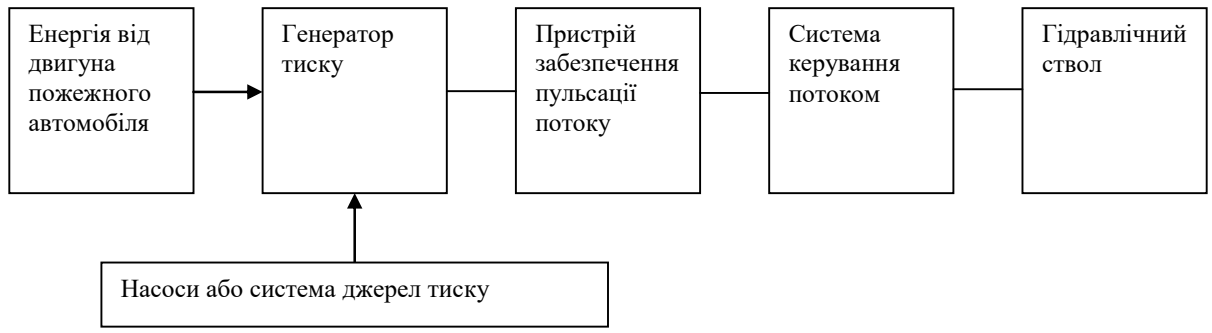


Рис. 6.3 – Принципова схема системи формування струминних потоків

Серед експериментальних методів дослідження течій, найбільш ефективними є методи візуалізації течії [333-335], які дозволяють отримати в ряді випадків досить якісну картину течії. Такі методи можуть бути оптичними і неоптичними. Серед неоптичних методів можна виділити: бульбашковий, димовий, фарбування, запилювання, ниток, масляної плівки, іскровий. Дослідження Д. В. Клатера показали, що в деяких випадках досить ефективним є бульбашковий метод візуалізації, при якому у воду вводиться електроліт, наприклад сульфат натрію до 15 г/л, для підвищення інтенсивності утворення бульбашок.

Таким чином, існує чимала кількість експериментальних методів аналізу зазначених систем, які різняться точністю, достовірністю результатів, затратною

частиною тощо, тому результат дослідження системи вцілому буде безпосередньо і значною мірою залежати від того, наскільки вдало у подальшому будуть обрані методи аналізу.

Ще одним є метод з використанням флюоресцентної масляної плівки (плівка спостерігається у темряві при ультрафіолетовому освітленні). Окремий ряд цікавих методів наведено у роботах [333, 334].

Заслуговує уваги Шлірен-метод (метод Теплера) [336], який дає можливість робити безпосередньо видимими місця з незначними оптичними неоднорідностями середовища, у яких світлові промені зазнають також незначні відхилення; ці відхилення променів можна перетворити у зміни їх яскравості або кольору. Метод полягає у тому, що відхилення світла затримується на кромці потоку, розміщеної перед екраном або фотоплівкою. Завдяки цьому зображення розглянутої області течії стає темнішим. Одними з перших цей метод використовували А. Р. Медокс і Р. Б. Біндер.

Оцінка ефективності функціонування системи може здійснюватися як для всієї системи в цілому, так і бути оцінкою ефективності ряду підсистем, що складають дану систему. Але при цьому необхідно враховувати можливість того, що оптимальність кожної з підсистем по своєму параметру оптимізації не виключає можливість системи вийти за межі її живучості в цілому. Це означає, що спроба добитися оптимуму з урахуванням деякого локального або проміжного параметра оптимізації може виявитися неефективною або навіть призвести до серйозної помилки.

6.3. Методики проведення лабораторних і натурних експериментів та їх планування. Обробка експериментальних даних і визначення критерію оптимальності

Згідно з результатами фізичного моделювання течії струменя, у якості техніко-економічного параметра оптимізації, що дозволяє здійснювати регулювання процесу гідравлічного руйнування, приймаємо енергію струменя E.

У нашому випадку параметр оптимізації E – це кількісна ознака, по якій оптимізується процес, його область визначення є безперервною й обмеженою знизу.

Відзначимо, що виконується умова, пов'язана з кількісною природою параметра оптимізації, коли заданому набору значень факторів повинне відповідати тільки одне значення параметра оптимізації.

Надалі, у міру накопичення інформації й залежно від результатів експерименту, параметром оптимізації може бути, наприклад, дальність генерування водяного струменя (за крайніми краплями).

Вимога універсальності відносно параметра оптимізації, як здатність всебічно охарактеризувати об'єкт, повністю підходить до енергії струменя E.

Планування експерименту проводилося відповідно до методик, описаних у роботах [230, 337].

Скориставшись кореляційним аналізом для зменшення числа вихідних параметрів, тобто для обґрунтованого зменшення числа дослідів і розмірності факторного простору, визначаємо основні фактори, що справляють вплив на величину E: вхідний тиск – p_0, МПа; вихідний діаметр ствола-насадки – d_0, м і витрата рідини – Q, л/с. Відзначимо, що всі обрані фактори мають кількісну, а не якісну оцінки.

Крім того, вони є керованими, це значить, що обране потрібне значення фактора можна підтримувати постійним протягом усього досліду. Оскільки точність вимірів факторів повинна бути як можна високою, необхідно це врахувати при створенні експериментальної установки й безпосередньо при проведенні дослідів. На завершення аргументування вибору параметрів відзначимо, що вони сумісні, тобто немає такої комбінації їх значень (у рамках припустимих), яка була б нездійсненною з позиції дослідів.

При виборі інтервалу варіювання враховуємо число рівнів варіювання факторів в області експерименту, оскільки від їхнього числа залежать і об'єм експерименту, і ефективність оптимізації. Мінімальне число рівнів на першій

стадії роботи приймемо 2, як верхній і нижній рівні, позначувані в кодованих координатах через +1 та –1.

Здійснимо повний факторний експеримент, у якому реалізуємо всі можливі комбінації рівнів факторів.

Оскільки в загальному вигляді залежність числа дослідів від числа рівнів факторів має вигляд

$$N = lk\ ,$$

де N – число дослідів; l – число рівнів факторів; k– число факторів,

маємо $N = 2^3 = 8$.

Рівні факторів і інтервали їх варіювання вибираємо на підставі апріорних відомостей і зводимо в табл. 6.1.

Таблиця 6.1.

Рівні й інтервали варіювання факторів

Найменування рівня	$\widetilde{x}_1$ – витрата рідини – Q, л/с	$\widetilde{x}_2$ –вихідний діаметр насадки d_0, м	$\widetilde{x}_3$ –вхідний тиск у системі p_0, МПа
Основний рівень – 0	3,7	0,013	0,4
Інтервал варіювання J_j	0,5	0,001	0,1
Верхній рівень +1	4,2	0,014	0,5
Нижній рівень –1	3,2	0,012	0,3

Умови проведення експерименту запишемо у вигляді таблиці – матриці планування експерименту (табл. 6.2).

x_1, x_2, x_3 – кодовані значення фактора визначаються за допомогою перетворення, яке характеризує зв'язок між кодованим значенням фактора x_i й натуральним значенням фактора $\tilde{x}_{i0}$

Таблиця 6.2.

Матриця планування

Номер досліду	Матриця планування								Робоча матриця			Результати паралельних експериментів y_{iu}	Середнє, $\overline{y_u}$
	x0	x1	x2	x3	x1x2	x1x3	x2x3	x1 x2 x3	Витрати рідини, л/с	Діаметр насадки, мм	Статичний тиск, МПа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	+	+	+	–	+	–	–	–	4,2	14	0,3	1492 1422 1574 1440 1542	1494
2	+	–	+	–	–	+	–	+	3,2	14	0,3	1091 1002 1190 1074 1113	1094
3	+	+	–	–	–	–	+	+	4,2	12	0,3	1241 1201 1314 1127 1202	1217
4	+	–	–	–	+	+	+	–	3,2	12	0,3	854 885 843 914 824	864
5	+	+	+	+	+	+	+	+	4,2	14	0,5	1650 1711 1699 1580 1770	1682
6	+	–	+	+	–	–	+	–	3,2	14	0,5	1405 1251 1345 1210 1291	1301
7	+	+	–	+	–	+	–	–	4,2	12	0,5	1299 1290 1440 1220 1401	1350
8	+	–	–	+	+	–	–	+	3,2	12	0,5	908 866 1040 908 998	948

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}}{J_j}$$

де $\tilde{x}_{i0}$ – натуральне значення основного рівня, J_j – інтервал варіювання,

i – номер фактора.

Середньоквадратичне відхилення помилки повторних (паралельних) дослідів визначаємо

$$S_i^2 = \frac{\sum_1^n \left(y_j - \bar{y}\right)^2}{n-1}$$

Таблиця 6.3.

Матриця середньоквадратичних відхилень помилки повторних дослідів

№ досліду	1	2	3	4	5	6	7	8
S_i^2	3676	4613	4642	1271	5076	1109	4451	4502
S_i	61	68	68	36	71	33	67	67

Використовуючи критерій Стьюдента

$$\frac{y - \bar{y}}{S} \geq t \text{ або } t_{\text{розр}} \geq t_{\text{табл}},$$

де t – критерій Стьюдента (при довірчій імовірності 0,95 для п'яти повторних дослідів становить 2,78).

У нашому випадку для п'ятого досліду $\bar{y} = 1682$, $\bar{y} = 1520 \ldots 1830$.

Тоді $\frac{y-\bar{y}}{S} \geq t$ або $t_{\text{розр}} \geq t_{\text{табл}}$ не виконується, оскільки

$$t_{\text{розр1}} = \left(\frac{1620 - 1520}{112}\right) = 1{,}44, \qquad t_{\text{розр2}} = \left(\frac{1830 - 1682}{112}\right) = 1{,}32.$$

Таким чином, результати повторних дослідів можемо вважати непомилковими.

Дисперсію відтворюваності розраховуємо за формулою

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{\sum_1^N \sum_1^n \left(y_j - \bar{y}\right)^2}{N(n-1)} = \frac{\sum_1^N S_i^2}{N}.$$

Одержуємо $S_{\{y\}}^2 = 4886$.

Перевірку однорідності дисперсій можна виконувати за критеріями Фішера й Кохрена.

За критерієм Фішера

$$F_{\text{розр}} = \frac{S_{max}^2}{S_{min}^2} = \frac{S_5^2}{S_6^2} = \frac{12576}{1109} = 11{,}34$$

при числах ступенів свободи $f_5 = f_6 = n - 1 = 4$.

Перевірка за критерієм Кохрена

$$G = \frac{S_{max}^2}{\sum_1^N S_i^2} = \frac{5076}{29340} = 0{,}173$$

Табличне значення критерія $G_{\text{табл}} = 0{,}396$, тобто дисперсії однорідні, оскільки виконана умова $G < G_{\text{табл}}$.

Рівняння математичної моделі з урахуванням парних взаємодій має вигляд

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 . \qquad (6.1)$$

Коефіцієнти регресії в нашому випадку (при повному факторному експерименті) визначаємо із виразів

$$b_0 = \frac{\sum_1^N \bar{y}_u}{N} , \qquad b_i = \frac{\sum_1^N x_{iu}\hat{y}_u}{N} ,$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_1^N x_{iu}\, x_{ji}\hat{y}_u}{N} \ (i \neq j), \qquad b_{ijk} = \frac{\sum_1^N x_{iu}\, x_{ji}x_{ku}\, \hat{y}_u}{N} \ (i \neq j \neq k),$$

$b_0 = 1244;\ b_1 = 192;\ b_2 = 192;\ b_3 = 76{,}5; b_{12} = 3{,}25;\ b_{13} = 3{,}75;\ b_{23} = 22{,}25; b_{123} = -66.$

З урахуванням значення дисперсії відновлюваності $S_{\{y\}}^2 = 3668$ з довірчою ймовірністю $a = 0{,}95$ знаходимо границі довірчих інтервалів для коефіцієнтів регресії

$$\Delta b_i = \pm\frac{tS_{\{y\}}}{\sqrt{N}} = \pm\frac{2{,}78 \cdot 0.416}{\sqrt{8}} = \pm 0{,}408 ,$$

$$\Delta b_i = \pm\frac{tS_{\{y\}}}{\sqrt{N}} = \pm\frac{2{,}78 \cdot 3668}{\sqrt{8}} = \pm 59{,}53 .$$

Порівнюючи значення коефіцієнтів регресії із границями довірчих інтервалів, відзначимо незначимість коефіцієнтів b_{12} і b_{13}. Таким чином, табл. 6.2. перепишемо у вигляді табл. 6.4.

Таблиця 6.4.

Уточнена матриця планування

№ досліду	Матриця планування						Робоча матриця			Результати паралельних експериментів y_{iu}	Середнє, $\overline{y_u}$
	x0	x1	x2	x3	x2x3	x1 x2 x3	Витрати рідини, л/с	Діаметр насадки, мм	Статичний тиск, МПа		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+	+	+	–	–	–	4,2	14	0,3	1492 1422 1574 1440 1542	1494
2	+	–	+	–	–	+	3,2	14	0,3	1091 1002 1190 1074 1113	1094
3	+	+	–	–	+	+	4,2	12	0,3	1241 1201 1314 1127 1202	1217
4	+	–	–	–	+	–	3,2	12	0,3	854 885 843 914 824	864
5	+	+	+	+	+	+	4,2	14	0,5	1650 1711 1699 1580 1770	1682
6	+	–	+	+	+	–	3,2	14	0,5	1405 1251 1345 1210 1291	1301

7	+	+	–	+	–	–	4,2	12	0,5	1299 1290 1440 1220 1401	1350
8	+	–	–	+	–	+	3,2	12	0,5	908 866 1040 908 998	948

а рівняння математичної моделі (6.1) набуде вигляду

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \ , \quad (6.2)$$

$$\hat{y} = 1244 + 192x_1 + 149x_2 + 77x_3 + 22x_2x_3 + 66x_1x_2x_3 \ . \quad (6.3)$$

Перевіряємо адекватність отриманого рівняння. Обчислюємо теоретичні значення параметра оптимізації $\hat{y}$, величину помилки $\Delta y = \bar{y} - \hat{y}$ й складаємо табл. 6.5.

Таблиця 6.5.

Теоретичні значення параметра оптимізації

№ досліду	1	2	3	4	5	6	7	8
$\hat{y}$	1552	1036	1166	914	1618	1366	1408	892
Δy	–58	58	51	–50	64	–65	–58	56
Δy^2	3364	3364	2601	2500	4096	4225	3364	3136

Розрахуємо дисперсію адекватності

$$S^2_{\text{ад}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \Delta y_i^2}{f},$$

де $f = N - (k+1)$ - число ступенів свободи,

$$S^2_{\text{ад}} = \frac{26650}{(8-(3+1))} = 6653 \, .$$

Адекватність математичної моделі визначаємо за критерієм Фішера

$$F_{\text{розр}} = \frac{S^2_{\text{ад}}}{S^2_{\{y\}}} = \frac{6653}{3668} = 1{,}81 \, ,$$

$F_{\text{табл}} = 6{,}4.$

Модель можемо вважати адекватною, оскільки $F_{\text{розр}} \leq F_{\text{табл}}$.

У кінцевому вигляді лінійна модель параметра оптимізації має вигляд (6.3). Виходячи, з фізичного смислу коефіцієнтів регресії можна зробити висновок про ступінь впливу факторів на параметр оптимізації. Чим більше чисельна величина коефіцієнта, тим більше вплив він виявляє на параметр оптимізації. Такими в нашій моделі є коефіцієнт $b_1 = 192,$ що відповідає фактору x_1 витрати рідини, і коефіцієнт $b_2 = 149,$ що відповідає фактору x_2 діаметра вихідного отвору насадки. Тобто, виходячи з фізичного змісту коефіцієнтів регресії у кодованій моделі, їх величини характеризують ступінь впливу відповідних факторів на параметр оптимізації. Це свідчить, що зміна витрати рідини є більш ефективним важелем керування енергією струменя порівняно зі зміною діаметра насадки.

Усі отримані висновки щодо ступеня впливу факторів на параметр оптимізації є коректними лише для кодованої регресійної моделі, оскільки саме в такому вигляді коефіцієнти регресії безпосередньо відображають відносну чутливість параметра оптимізації до зміни факторів у нормованому масштабі. При цьому інтерпретація впливу факторів є обґрунтованою лише за умови обов’язкової перевірки статистичної значущості коефіцієнтів регресії, оскільки до аналізу впливу можуть включатися тільки ті коефіцієнти, які достовірно відрізняються від нуля в межах довірчих інтервалів.

6.4. Фізичне моделювання гідравлічних вогнегасних струменів

6.4.1. Експериментальний стенд для дослідження гідравлічних вогнегасних струменів

Питання інтенсифікації виробництва, що характеризують сучасну світову економіку, тісно пов'язані із забезпеченням різних видів безпеки. У рамках

роботи, насамперед розглядається пожежна безпека. Створення експериментального стенда з дослідження вільних гідравлічних струменів стало результатом вивчення проблемних питань в галузі генерування водяних потоків, які в першу чергу цікавлять фахівців в області проведення пожежно-рятувальних робіт [278, 295, 338].

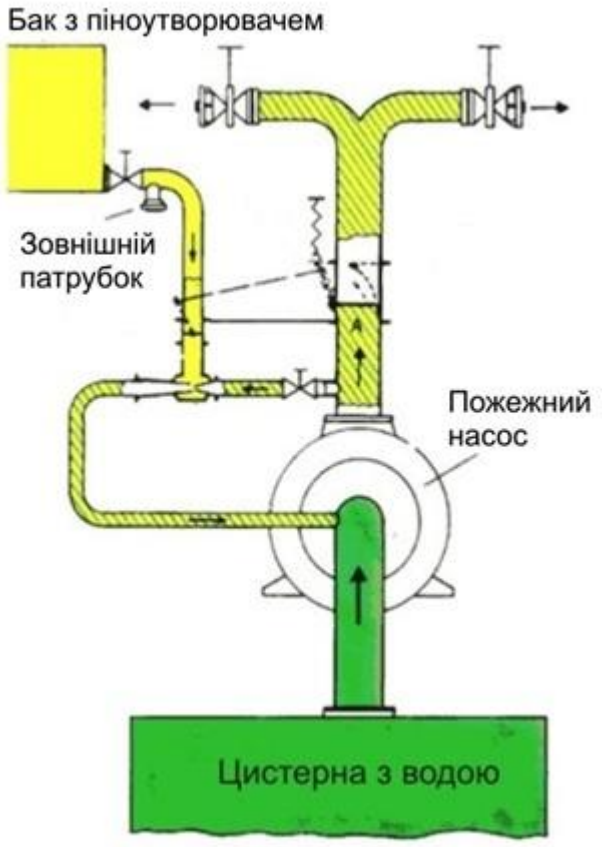


Рис. 6.4 – Схема водопінних комунікацій пожежного автомобіля [22].

Незалежно від типу базового шасі, всі пожежні автоцистерни оснащуються насосними установками, цистернами та баками для зберігання вогнегасних речовин, трубопровідною арматурою, а також системами забору води та подачі піноутворювача. Усі ці елементи з’єднані між собою трубопроводами, які формують водопінні комунікації. Наведена схема (рис. 6.4) надає загальне уявлення про принципи формування пожежних струменів та організацію водопінних комунікацій у конструкції пожежного автомобіля. З високоякісних матеріалів виготовлені основні вузли: ємність для води, пінобак. Автоцистерни

укомплектовані лафетними стволами з ручним, дистанційним або гідро- та електрокеруванням [22].

Усе вищевказане було враховане під час розробки й створення в Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України (нині НУЦЗ України) експериментального стенда з дослідження вільних гідравлічних струменів.

Для досліджуваного типу водяних струменів схему плину можна подати у нижченаведений спосіб (рис. 6.5). Це уточнення структури вільного незатопленого турбулентного струменя (рис. 2.14) та узагальненої картини розпаду незатопленого струменя (рис. 2.6).

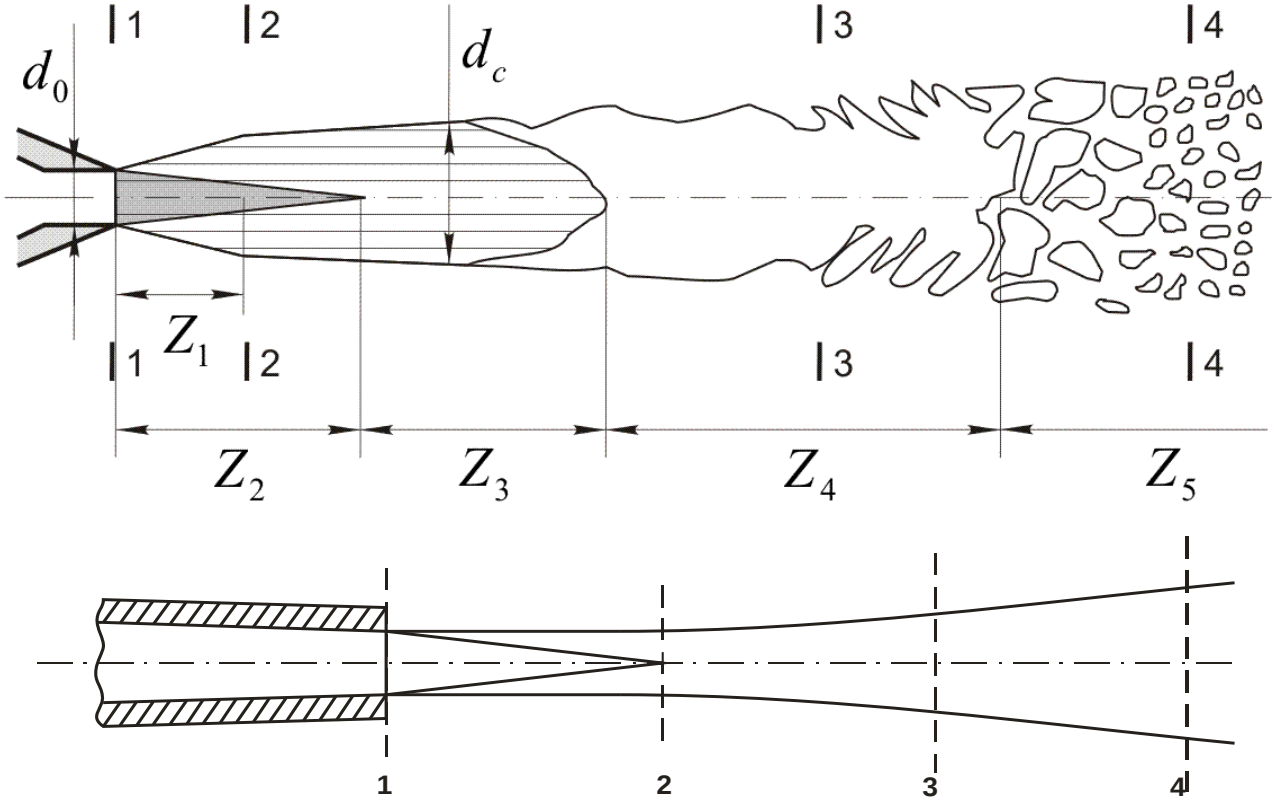


Рис. 6.5 – Схема структури вільного незатопленого турбулентного струменя

За особливостями і характером плину такий струмінь може бути представлено п'ятьома ділянками Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5. Ділянка Z_1 – ядро конусоподібної форми; Z_2 – початкова ділянка з безвихровим плином рідини; Z_3 – основна ділянка струменя (за межами перерізу 2–2 статичний тиск у струмені стає рівним атмосферному, на ділянці Z_3 усе ще зберігається висока щільність і

компактність); на ділянці Z_4 струмінь втрачає свою стійкість і має нерегулярності у формуванні поверхні. Нарешті, на ділянці Z_5 спостерігається розпад струменя. Якщо припустити, що динамічний тиск середовища в якому-небудь перерізі ділянки Z_1 дорівнює p_m, тоді експериментально можна переконатися, що він є функцією від середньої швидкості струменя на початковій ділянці u_0, діаметра насадки d_0, відстані від насадки z, густини рідини ρ, в'язкості – μ і поверхневого натягу σ. На підставі π–теореми можна з'ясувати, що основними критеріями подібності в цьому випадку будуть критерій Рейнольдса й критерій Вебера. Тиск p_m у цих умовах буде складати

$$p_m = p_0 \cdot f\left(\frac{l}{d_0}, \frac{u_0 d_0 \rho}{\mu}\right),$$

Де $p_0 = \frac{\rho {u_0}^2}{\mu}$ – динамічний тиск струменя на виході з насадки.

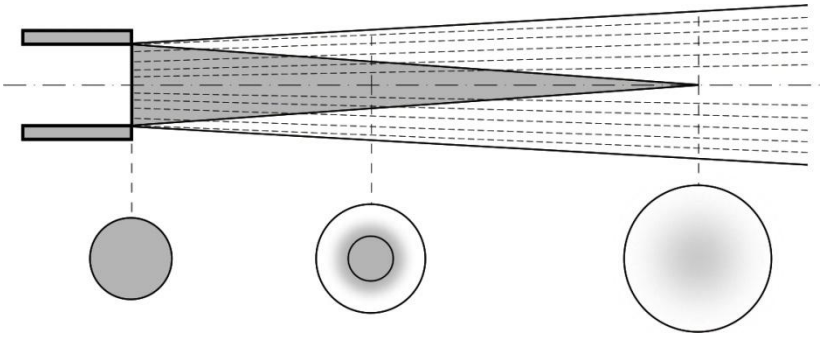


Рис. 6.6 – Подання ідеальної картини області розпилу струменя

Оскільки струмінь має циліндричну форму з радіусом R і початкову швидкість виходу рідини зі ствола u_0, необхідно враховувати, що навколишнє середовище може виступати джерелом початкових збурень, таких як турбулентність або вібрації ствола. У таких умовах основними характеристиками процесу руйнування струменя є довжина його компактної частини та розмір утворених крапель. Довжина суцільного (неподільного) фрагмента струменя позначається величиною z. Оскільки задача симетрична відносно осі струменя, рівняння руху рідини в ньому можна записати

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu}{\rho} \cdot \left[\frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(r u_2)\right)\right],$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\cdot\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu}{\rho}\cdot\left[\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial u_z}{\partial r}\right)\right],$$

де u_2 й u_z - складові вектора швидкості в циліндричній системі координат.

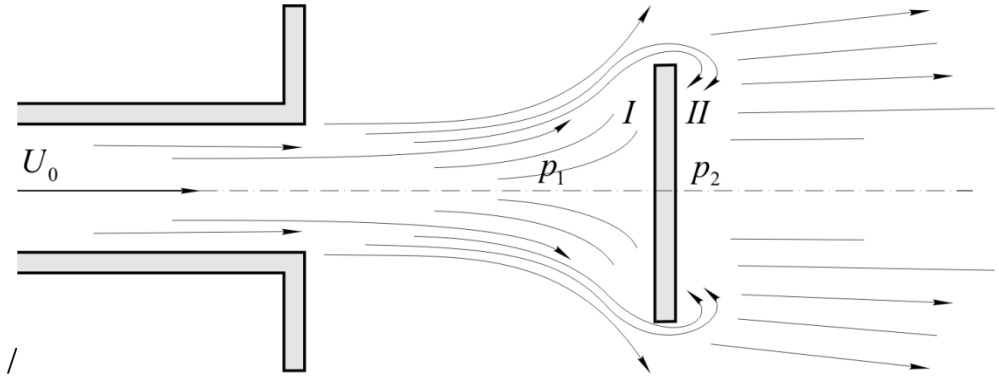
Таким чином, експериментальні дослідження розпилу струменя, досить добре можуть бути описані з використанням досліджень В. Г. Лєвіча [84].

За основу під час проєктування експериментального стенда було взято схему водопінних комунікацій пожежного автомобіля, подану на рис. 6.4. Такий підхід дозволив максимально наблизити умови досліджень до реальної роботи пожежної техніки. Теоретичні напрацювання в цій сфері виконувалися протягом тривалого часу, переважно в межах наукової школи під керівництвом професора О. М. Яхна. Результати цих досліджень неодноразово обговорювалися на міжнародних конференціях і були опубліковані у профільних наукових виданнях [325].

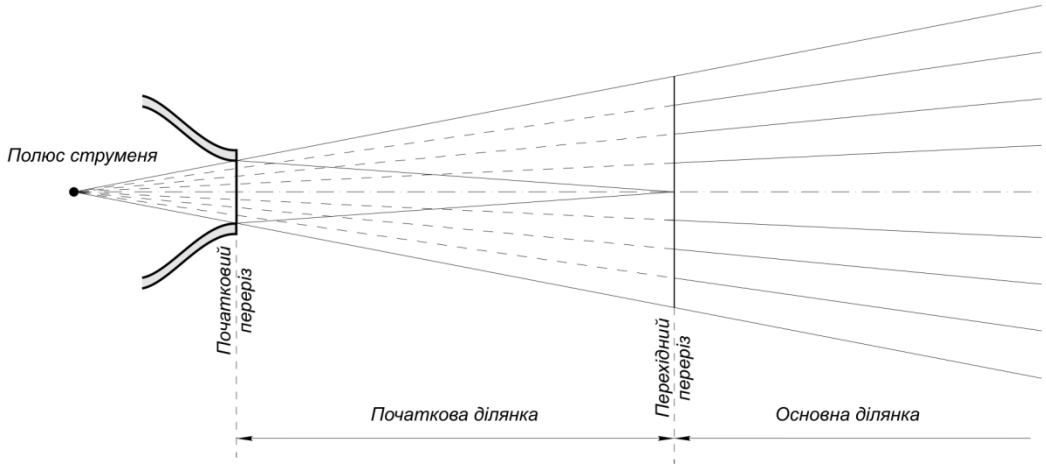
У ході проведених робіт увага зосереджувалася на питаннях формування імпульсних режимів течії в гідравлічних системах та особливостях розвитку пульсацій рідини в циліндричних насадках. Окремо вивчалися властивості водних розчинів із поверхнево-активними речовинами, які застосовуються під час гасіння пожеж, з урахуванням їх реологічної поведінки. Також досліджувався розподіл локальної кінетичної енергії пульсуючого потоку в каналах і проводився аналіз наявних конструкцій генераторів пульсацій, що використовуються для створення нестаціонарних потоків.

Крім того, розглядалися зміни швидкості та тиску вздовж початкової ділянки формування компактної частини струменя, а також умови витікання рідини з насадок. Значну увагу приділено аналізу руху пожежних струменів після виходу з насадок і особливостям формування пульсуючих потоків в'язких рідин у циліндричних каналах.

Особливий інтерес для вивчення складає гідродинамічна початкова ділянка струменя, оскільки в деяких випадках її довжина може вказувати да довжину усього струменя. Подамо дані, щодо можливих методів її дослідження (табл. 6.6) [339], не змінюючи позначень, які застосовує проф. Яхно О. М.



а)



б)

Рис. 6.7 – Приклад використання стенда

а) для вивчення обтікання перешкоди (диска) потоком рідини та ударної сили струменя. [22], I, II – різні зони тисків *p*; б) ізотахи вільного струменя, розраховані за місцевими осьовими швидкостями.

Розбіжність у значеннях коефіцієнтів у формулі з визначення довжини гідродинамічної початкової ділянки можна пояснити відмінністю припущень прийнятих авторами, реологічними особливостями робочих рідин та умовами змочування поверхні каналу тощо.

Таблиця 6.6.

Параметри потоку на гідродинамічній початковій ділянці

Автор	Метод розв'язання рівнянь	Досліджувана рідина	Визначення довжини початкової ділянки	Динамічні та кінематичні характеристики потоку
Буссінеск	Лінеаризація	Ньютонівська	*0,240 Re·R*	$u_x = \frac{\mu}{\rho}\left\{2 - \left[1 - \frac{r^2}{R^2}\right] - 8{,}2^{\frac{16}{Re \cdot R}} \cdot \varphi\left[\frac{r^2}{R^2}\right]\right\}$
Тарг	Лінеаризація	Ньютонівська	*0,125 Re·R*	$\frac{2\Delta p}{\rho u_{\text{сер}}^2} = \frac{8 \cdot Z_n}{Re \cdot R} + \frac{1}{3} - 4\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{\beta_k^2} \cdot e^{-\frac{\beta_k^2 \cdot Z}{Re \cdot R}}$
Лангхаар	Лінеаризація	Ньютонівська	*0,115 Re·R*	$\frac{2\Delta p}{\rho u_{\text{сер}}^2} = \frac{64 l_{\text{н}}}{Re \cdot D} + 1{,}28$
Гольдштейн	Лінеаризація	Ньютонівська	*0,0575 Re·D*	$\Delta p = \frac{3}{2}\rho u_{\text{сер}}^2$
Коллінз	Лінеаризація	Неньютонівська	*0,122 Re·R*	$\Delta p = 0{,}5\rho u_{x\text{сер}}^2 \frac{2^{n+1}\left(\frac{1+3n}{n}\right)^n}{Re}\frac{l_{\text{н}}}{R}\ldots$
Шиллер	Інтегральний	Неньютонівська	*0,0575 Re·R*	$\frac{2\Delta p}{\rho u_{\text{сер}}^2} = \left(2\left(\frac{u}{u_{\text{сер}}} - 1\right) + \left(\frac{u}{u_{\text{сер}}} - 1\right)^2\right)$

Для досягнення мети вивчення факторів, що впливають на характеристики струменя, була сконструйована установка (стенд) генерування водяних струменів, схема якої подана на рис. 6.8 [340], а основні характеристики у табл. 6.7.

Експериментальний стенд призначений для дослідження процесів формування та подавання вогнегасних речовин, а також для відпрацювання конструктивних рішень окремих елементів пожежно-рятувальної техніки. Стенд складається з декількох модулів, кожний з яких є самостійною розробкою творчого колективу співробітників НУЦЗ України. Роботи з проектування й створення стенда доводилося виконувати на стикові декількох предметних областей, поєднуючи знання з гідромеханіки, пожежної безпеки, машинобудування та вимірювальної техніки, і при цьому використовувати досвід як вітчизняних фахівців [341], так і дослідників Китайської Народної

Республіки [342], Республіки Польщі [343, 344], Королівства Швеції [345], Французької Республіки [346], Республіки Болгарії [347, 348].

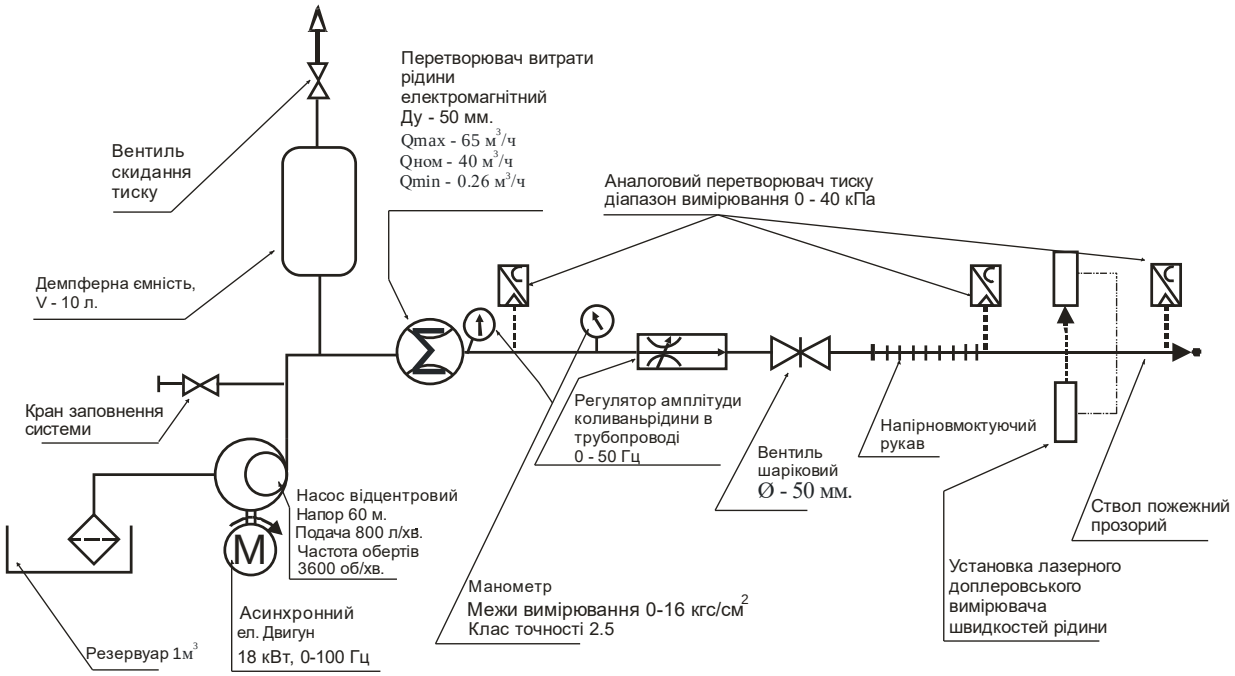


Рис. 6.8 – Гідравлічна схема експериментального стенду генерування водяних потоків

Таблиця 6.7.

Технічні характеристики блоків стенда

Силовий блок	
перетворювач частоти струму, Гц	0…100
електродвигун асинхронний:	
потужність, кВт	16
частота обертання вала, об/хв.	0…6000
частота мережі, Гц	50
напруга мережі, Вт	380
ступінь захисту струмовведення IP55	клас ізоляції F
водяний насосний блок низького тиску:	
продуктивність, л/с	13,3
тиск, МПа	1,0
Ккд	0,8
Блок позиціонування ствола	
діапазон зміни кута, град	0 … 90
рекомендована висота установки ствола, м	0,8

Дослідницьке завдання з використанням стенда-установки полягало в експериментальному визначенні довжини водяного струменя залежно від цілого ряду факторів. Насамперед, досліджувався вплив геометричних особливостей пожежних стволів, насадок, тиску, витрати й кута подачі рідини, зовнішніх факторів.



Рис. 6.9 – Генеруючий блок експериментального стенда з дослідження вільних гідравлічних струменів

Аналіз результатів експериментів показав, що традиційні методи розрахунку основних характеристик водяного (пожежного) струменя потребують уточнення [288, 349]. Більшість існуючих схем враховує тільки загальні початкові умови і не завжди адекватно відображає реальні ситуації, коли використовується водяний потік.

Водночас для загального уявлення про застосування протипожежної та аварійно-рятувальної техніки наведені в [21, 213, 288] дані цілком достатні.

Окрему увагу приділено вивченню умов, за яких відриваються краплі від водяного струменя. Щоб керувати струменем ефективно, потрібно, щоб рідина доставлялася у потрібній кількості, із заданим ступенем подрібнення та на потрібну відстань для кожного конкретного випадку пожежі.

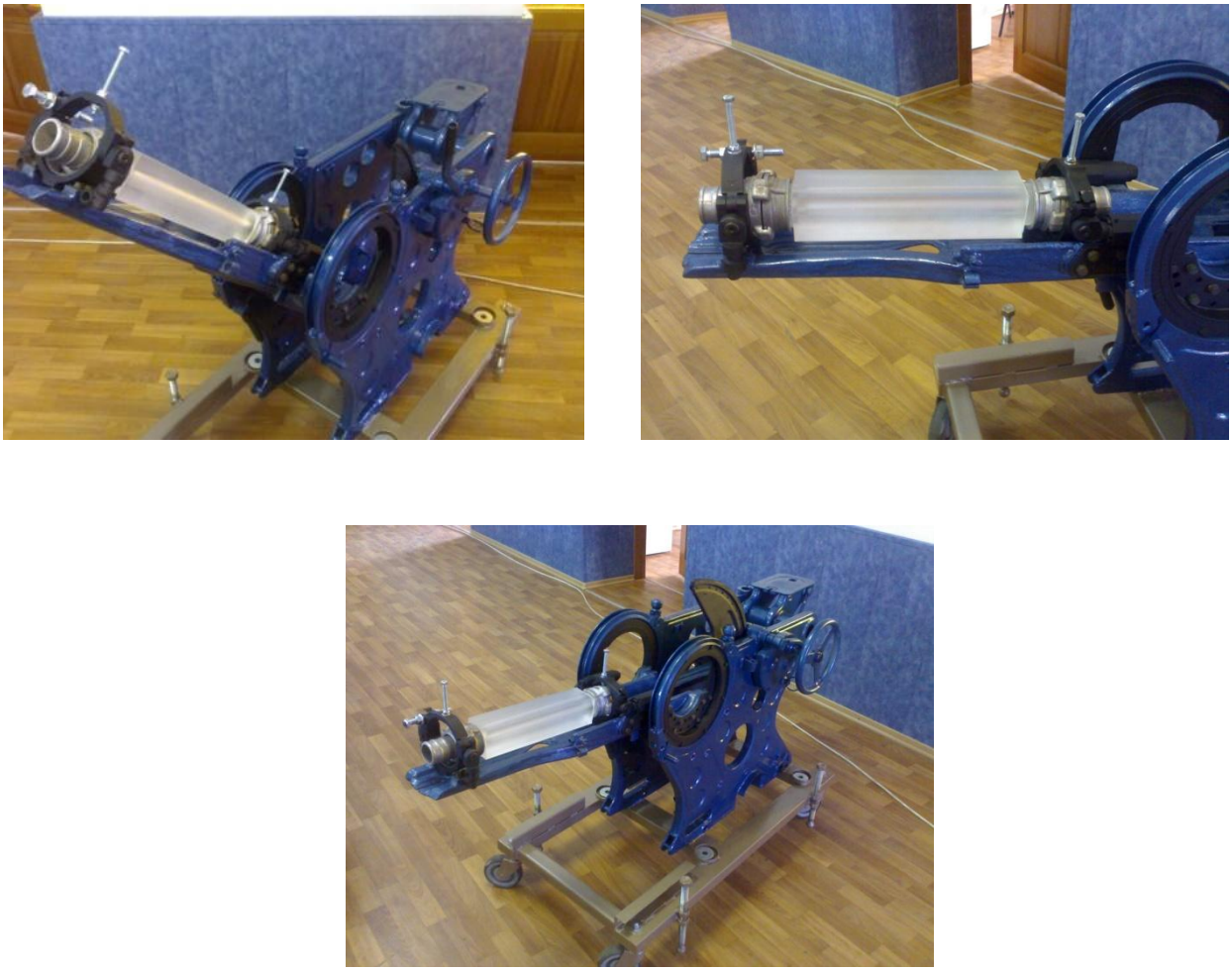


Рис. 6.8 – Формувальний блок експериментального стенда з дослідження вільних гідравлічних струменів

В результаті проведеного аналізу рідинних струменів у повітряному середовищі було встановлено, що сила F, окрім низки інших факторів, (які в остаточному підсумку не виявляють істотного впливу на характер руху рідини, принаймні з позицій даного підходу), залежить від швидкості струменя на виході з насадки u_0 діаметром d_0, густини (щільності) повітря $\rho_{\text{пов}}$ й густини рідини $\rho_{\text{р}}$, динамічної в'язкості рідини μ й прискорення g [350]. Застосування

отриманих безрозмірних параметрів-комплексів $\frac{k{u_0}^n}{\rho {d_0}^{n+1}}$ та $\frac{\dot{\gamma}\cdot d_0}{v_0}$ дозволяє зробити висновок, що саме ці характеристики можуть слугувати основою для наближеного розв'язання задачі якісного керування поведінкою пожежного струменя, зокрема при переході від суцільного потоку до розпиленого стану. Вони дозволяють встановити взаємозв'язок між початковими параметрами струменя, властивостями рідини та умовами зовнішнього середовища, що визначають процес диспергування рідини.

Створення експериментального стенда для дослідження вільних гідравлічних струменів та його подальше використання стало природним продовженням теоретичних робіт, виконаних науковцями Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (проф. О. М. Яхна) та Габровського технічного університету (Республіка Болгарія, проф. Х. Славчева). Цей проєкт свідчить про значний науковий інтерес до проблем дослідження водяних вогнегасних струменів і підкреслює міжнародний характер співпраці у цій галузі.



Рис. 6.9 – Блок керування, фіксації даних та обробки інформації

Використання стенда допомогло перевірити коректність відомих існуючих розрахункових формул [288, 350], а головне, провести експерименти й отримати дані, які досить складно вивести суто теоретично, передусім внаслідок надзвичайно непростої комплексної фізико-математичної задачі дослідження гідравлічних струменів. Зазначимо, що дещо пізніше аніж у Черкаському інституті пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України подібний стенд був застосований колегами-науковцями Головної пожежної школи м. Варшава Республіки Польща [351] для дослідження процесів формування вогнегасних струменів деякими пожежними стволами та визначення рівномірності розпорошення струменів на краплини.

6.4.2. Стенд для дослідження параметрів повітряно-пінних стволів

Питанням піноутворення в трубі повітряно-пінного ствола (СПП) й досі приділяється значний науковий інтерес, проте можна стверджувати про велику кількість недостатньо вивчених особливостей процесу піноутворення. Малорозкритими залишаються теоретичні аспекти дослідження процесу змішування повітря з розчином ПУ в науковій, довідковій, а передусім у пожежно-технічній літературі. Подібна ситуація властива експериментальним дослідженням гідромеханічних властивостей стійких двофазних сумішей типу «розчин піноутворювача – повітря» при використанні СПП [352].

За часом стійкості (стабільності) піни можуть бути поділені на короткоживучі, наприклад флотаційні піни, довгоживучі, наприклад захисні, що використовуються для гасіння пожеж, а також безмежноживучі піни. Стійкість піни залежить від типу поверхнево-активних речовин, їх концентрації та способу піноутворення. Ці фактори визначають структуру і властивості плівкового каркасу піни. Від стійкості піни залежать процеси гасіння пожеж пінами. Піни за способом застосування можуть бути слабозмочувальні–флотаційні, нетеплопровідні і газонепроникні–ізолюючі.

Структурно розрізняють піни емульсійного типу та коміркового типу. Тип піни визначається швидкістю зменшення прошарків рідини, їх стійкістю, а також концентрацією пухирців. Зазначеним питанням необхідно було приділити увагу при проведенні експериментальних досліджень для встановлення залежності між основними показниками, що характеризують властивості піни відповідно до тиску піноутворювача в трубі ствола. Для розв'язання зазначеної задачі необхідно було провести експериментальне вивчення механізму піноутворення на одиничній комірці, в якості якої використовувалося скляне сопло.

Установка (схема та план використання були запропоновані Макаревським П. В. та Перепєчаєвим В. Д.) складається з приймального посуду (8), куди заливається розчин ПУ необхідної концентрації, перекриваючого крану (7), крапельниць (9) із скляною насадкою (4), що знаходяться в скляному балоні (2).

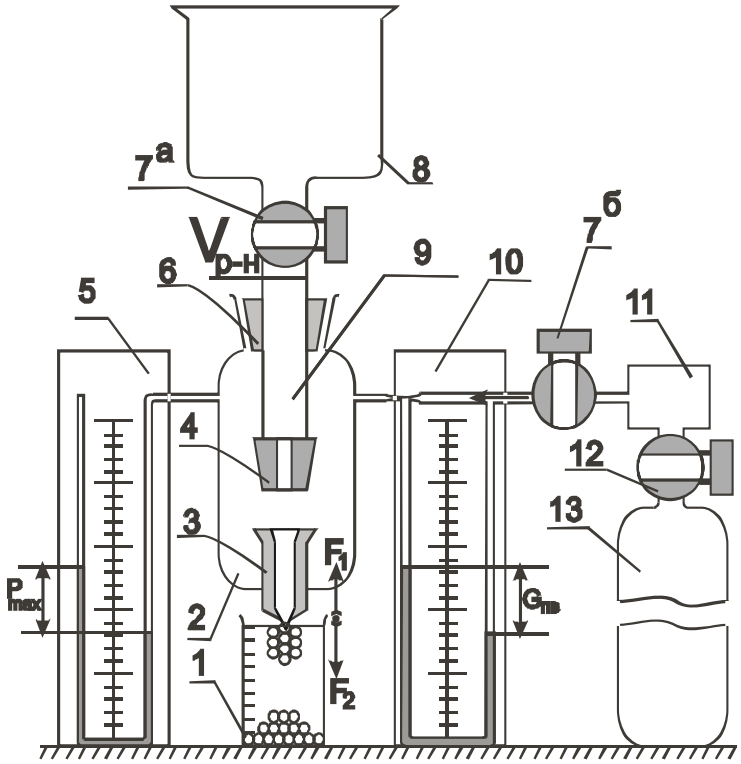


Рис. 6.10 – Схема лабораторної установки

Герметичність з'єднань крапельниць (9) з балоном скляним (2) досягається встановленням гумової пробки (6). Для вимірювання об'єму піни, що витікає через скляне сопло (3) використовується мірна колба (1). Для подачі повітря при проведенні досліджень використовується балон зі стиснутим повітрям (13) з

перекривним вентилем (12) і редуктором (11). Повітря від редуктора (11) в балон скляний (2) подається через перекриваючий кран (7). Вимірювання тиску, що утворюється в скляному балоні (2) здійснюється за допомогою манометра (5) з діапазоном вимірювань 0–200 мм вод. ст., а вимірювання витрат повітря, що надходить на піноутворення за допомогою реометра (10) з діапазоном вимірювань до 0–2 л/хв.

Принцип роботи лабораторної установки наступний [352]. В приймальний посуд (8) заливається розчин піноутворювача необхідної концентрації і за допомогою спеціального перекриваючого крану (7) встановлюють певну частоту подачі крапель через скляний насадок (4), яка в подальшому повинна підтримуватись постійною. Надходження розчину ПУ від перекриваючого крану (7) до скляного насадку (3) здійснюється по крапельниці (9). Якщо повітря з балону (13), через перекриваючий вентиль (12), редуктор (11) та перекриваючий кран (7) в балон скляний (2) не подається (реометр (10) показує подачу „0”, тиск в середині балону (2), що контролюється манометром (5), дорівнює „0”, то процесу піноутворення не буде.

В залежності від тиску повітря в балоні (2) процес піноутворення змінюється. Ці зміни фіксуються візуально. При проведенні досліджень спостерігається чотири режими піноутворення, перехід від одного режиму до іншого проходить при постійному збільшенні тиску в балоні (2), яке здійснюється за допомогою редуктора (11) збільшенням робочого тиску в його камерах, а також при зміні частоти падання крапель. Перший режим піноутворювача характеризується тим, що піна не утворюється і розчин витікає із сопла (3) у вигляді крапель при тиску в балоні (2) менше мінімально-допустимого. Розчин повітря в цьому випадку рівний нулю, або незначно перевищує якусь величину.

Якщо тиск в середині балону (2) перевищить мінімальне значення, розпочинається утворення пухирців, що характеризуються другим режимом піноутворення, при якому кратність піни, що отримується при заданих параметрах тиску, витрати, частоти падіння крапель буде мінімальною. При

подальшому підвищенні тиску в балоні (2) розпочинається третій режим піноутворення при якому значення кратності піни, що отримується відповідає своєму максимальному значенню. При такому режимі з одної краплі розчину утворюється група пухирців і даний режим розпилення займає достатньо великий діапазон тисків і витрат повітря при якому відбувається піноутворення. Четвертий режим піноутворення починається з деякого критичного тиску всередині балона (2). При цьому піноутворення припиняється. Відбувається переривання процесу змішування розчину з повітрям, плівки пухирців руйнуються і розчин витікає із сопла у вигляді дрібних крапель. Очевидно, що в стволах повітряно-пінних цей режим є небажаним, оскільки при розриві пухирців якість пінного струменю різко погіршується. Суцільність струменю порушується і піна буде виходити у вигляді окремих пластівців. Доцільно визначити загальні критерії, які б дозволили встановити оптимальні співвідношення між тиском, витратою повітря і кількістю крапель, що використовуються для піноутворення. До таких параметрів слід віднести: p_{max} – тиск при якому відбувається зрив піноутворення, p_{min} – тиск при якому розпочинається процес піноутворення, G_{max} – витрата повітря, що відповідає зупиненню піноутворення, G_{min}– витрата повітря, що відповідає початку піноутворення, δ – поверхневий натяг розчину піноутворювача, C – робоча концентрація розчину піноутворювача, $d_{\text{вн}}$ – внутрішній діаметр сопла (3), $d_{\text{зов}}$ – зовнішній діаметр сопла (3).

Розроблена методика проведення досліджень параметрів отримання стійких двофазних сумішей на запропонованій лабораторній установці дозволялила проводити визначення параметрів процесу змішування повітря з розчином. Загальна методика дослідження параметрів отримання стійких двофазних сумішей описана в [352].

Відповідно до EN 16712-3:2015 [353] кратність піни K перевіряють в зоні максимального її випадання із ствола за допомогою мірного бака ваговим методом [352]. Методика має суттєві недоліки, наприклад, необхідність зважування. Тому запропоновано визначати кратність піноутворення

безпосередньо в трубі ствола, що дозволяє визначити реальні технічні характеристики ствола, надавати оцінку різним типам стволів та відмовитись від методики визначення кратності піни зважувальним методом. Для визначення кількості повітря, що підсмоктується стволом за одиницю часу, та, як наслідок, для визначення кратності піноутворення в трубі ствола застосовувалася схема із використанням газового лічильника.

Запропонована лабораторна установка з вивчення параметрів процесу змішування повітря з розчином піноутворювача та із розробленою загальною методикою дослідження параметрів стійких двофазних сумішей була використана при проведені експериментальних досліджень з різними видами поверхнево-активних речовин для визначення їх оптимальних концентрацій. Було запропоновано ввести в практику розрахунку стволів визначення коефіцієнта якості пін $\bar{S}$ за результатами даних із проведених експериментів, що має сприяти визначенню оптимальних параметрів, які характеризують тактико-технічні характеристики стволів.

6.5. Особливості проведення експериментів із використанням експериментального стенда для дослідження гідравлічних вогнегасних струменів

6.5.1. Застосування експериментального стенда для дослідження гідравлічних вогнегасних струменів

Згідно з даними [22, 213, 288], експериментальні дослідження водяних струменів, що застосовуються для ліквідації надзвичайних ситуацій, є предметом численних наукових робіт. Більшість цих досліджень фокусується саме на струменях, які використовуються для гасіння пожеж. При цьому важливо розрізняти їх за основними характеристиками гідравлічного обладнання, що формує вогнегасні потоки.

Для найпоширеніших водяних струменів для пожежогасіння типовими робочими параметрами є: тиск на виході ствола від 0,2 до 1,0 МПа; витрата рідини 1–10 л/с; подрібнення потоку на краплі з діаметром від 20 до 10000 мкм. Слід зазначити, що термін «дисперсність» у цьому випадку не зовсім точний, адже зазвичай він позначає відношення площі поверхні частинок до їх об’єму або сумарної маси.

Практичне значення мають дослідження процесів формування водяних струменів, регулювання дальності подачі вогнегасної речовини, дроблення потоків та відбору тепла від вогнища. Це пояснюється відсутністю універсального обладнання, яке могло б швидко та ефективно створювати струмені з різною дальністю, ступенем розпилення та витратою рідини для різних умов пожеж, не знижуючи при цьому ефективності гасіння.

Проведені дослідження та отримані результати. Проектування і виготовлення лабораторної установки-стенда проводилося упродовж двох років і перші експерименти були здійснені у 2006 році. Протягом 2006–2020 років проводилися повноцінні експерименти на базі зазначеного стенда. У дослідженнях процесів формування водяних струменів, де використовувся унікальний дослідний стенд, брали участь працівники НУЦЗ України та НТУ України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» [310].

Були проведені експерименти щодо визначення 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, вплив малих концентрацій ПАВ на рух рідини в магістральній частині трубопроводу системи водяного пожежогасіння та у пожежних стволах тощо. У деяких випадках результати експериментів збігалися із відомими даними із літератури, у деяких – були отримані дещо інші результати. Наприклад, крива залежності дальності подачі води та деяких вогнегасних рідинних розчинів від кута нахилу ствола була більш опуклою, ніж прийнято вважати, окрім того, максимальна дальність

подачі водяного струменя спостерігалась при $\alpha \approx 30°$, що також не зовсім відповідає даним, наведеним у літературі даної тематики [22, 213, 288].

Пожежний ствол. Експериментальні дослідження показали, що традиційні методи розрахунку основних характеристик водяних струменів потребують перегляду та уточнення [213, 288]. Особливу увагу приділено умовам, за яких краплі відокремлюються від основного потоку під час перенесення рідини від пожежного ствола до зони горіння. Вивчення цього процесу проводилось на спеціальному стенді і дозволяє більш точно оцінювати поведінку струменя. Отримані результати мають важливе значення для підвищення ефективності керування водяним потоком у реальних умовах пожежогасіння.



Рис. 6.12 – Експериментальний пожежний ствол

Були проведені експерименти при різних кутах атаки (положення осі пожежного ствола до горизонту) і різних значеннях тиску на виході зі ствола [310]. Обробка статистичних даних показала, що краще всього (досить точно) функція залежності довжини подачі рідини від кута атаки може бути описана поліномом 4-ї степені наступного вигляду (рис. 6.13 а), а подальше ускладнення функції не сприяє суттєвому уточненню даної залежності

$$y(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 \ , \qquad (6.20)$$

де a_0 – висота установки насадки над горизонтальною поверхнею.

Зрозуміло, що

$$\frac{dx}{dy} = a_1 + 2a_2 x + 3a_3 x^2 + 4a_4 x^3 \ , \qquad (6.21)$$

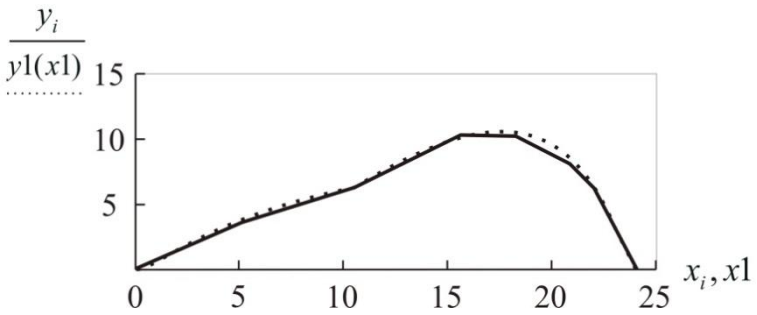
при $x = 0$ маємо $\frac{dx}{dy} = a_1 = f(\alpha_0)$,

де a_1 – кут атаки;

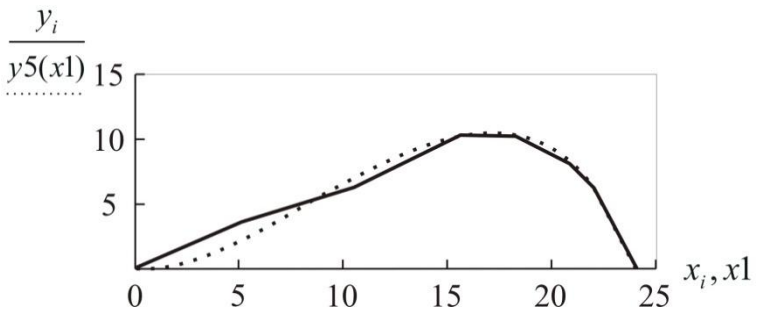
a_2, a_3 залежать від поточних кута положення струменя відносно горизонту a_1 та швидкості u_0.

$$y(x,t) = a_0 + a_1 x(t) + a_2 x^2(t) + a_3 x^3(t) + a_4 x^4(t) \ , \qquad (6.22)$$

де t – параметр часу.



а)



б)

Рис. 6.13 – Траєкторії струменів при двох різних функціях апроксимації

а) поліном 4-ї степені; б) одновимірна лінійна регресія загального типу

(отримані в процесорі MathCAD, x, y – дальність та висота струменя, i – номер заміру)

З аналізу складових швидкості u_x і u_y можна отримати аналітичний вираз для дальності струменя і максимальної висоти її підйому.

Дещо гірший результат маємо у випадку, коли графік отримуємо в результаті апроксимації експериментальних даних функцією типу (одновимірна лінійна регресія загального типу, рис. 6.13, б)

$$y(x) = k_1 x^2 + k_2 x^3 + k_3 exp(x). \qquad (6.23)$$

Було проведено випробування різних типів насадок. Метою експерименту було перевірити розрахункові моделі, що описують початкову ділянку водяного струменя, умови відриву крапель від основного потоку та процес формування водяної хмари у кінцевій зоні струменя.

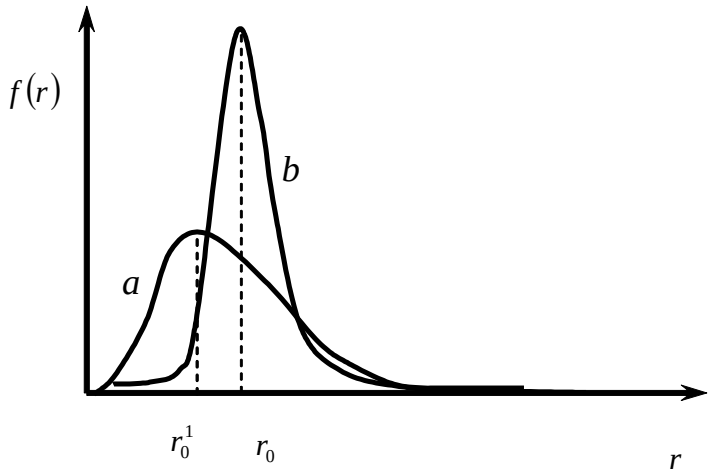


Рис. 6.14 – Варіанти розподілу радіусів краплин r в об'ємі струменя:
а) полідисперсний; b) монодисперсний

Експериментальні дослідження дозволили уточнити сучасні уявлення про довжину гідравлічних струменів низького тиску та отримати надійні емпіричні залежності для їх опису. Було проведено серію випробувань, спрямованих на визначення взаємозв'язку дальності подачі вогнегасного розчину з кутом нахилу ствола відносно горизонту, тиском на вході ствола, а також наявністю або відсутністю пульсатора тиску у гідравлічній схемі установки [310].

Аналіз умов розпилення струменя показав, що для практичних цілей може бути частково застосована теорія дроблення струменя, запропонована В. Г. Лєвічем [84].

Крім того, проведено ряд експериментів із різними типами насадок для формування водяних струменів. Базові варіанти насадок представлені на рис. 6.15. При цьому досліджувалася ефективність кожного типу насадки та оцінювалася їхня придатність для використання в різних умовах пожежі, що дозволяє оптимізувати вибір обладнання для конкретних сценаріїв гасіння.

Експериментально перевірено теоретичні результати, отримані при моделюванні руху водяних потоків у каналах пожежних стволів та насадок. Отримані результати для насадки «класичного» типу (перша позиція рис. 6.15) для п’яти базових перерізів (рис. 6.16) [235] .

Експериментальне вивчення процесу руху потоку в пожежному стволі чи насадці, для чого й був виготовлений унікальний прозорий конусний ствол (рис. 6.12), можуть базуватися на використанні доплерівського ефекту.

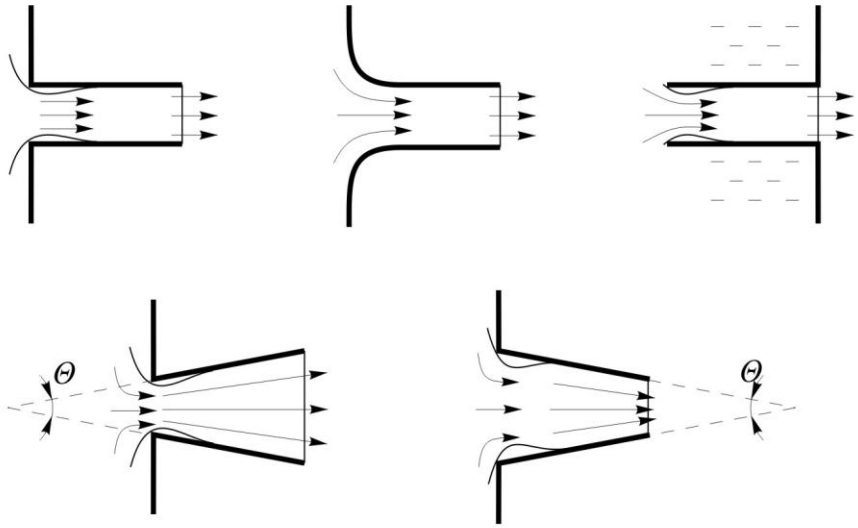


Рис. 6.15 – Схематичний вигляд різних типів базових насадок

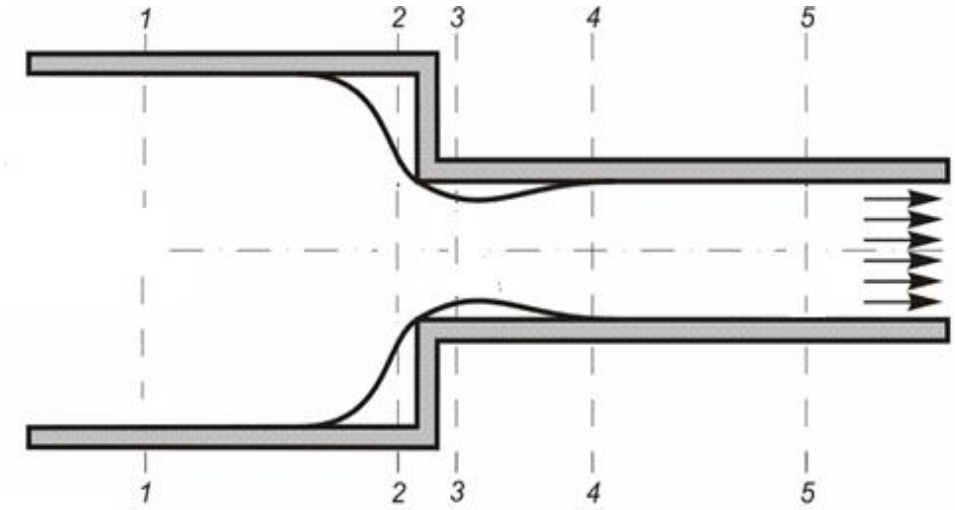


Рис. 6.16 – Обрані базові контрольні перерізи для проведення експериментів

6.5.2. Гідравлічні струмені низького тиску

Численні роботи в галузі дослідження струменів низького тиску мають суттєвий практичний аспект для найрізноманітніших галузей діяльності людини. У нашому випадку увага передусім приділяється питанням вивчення водяних вогнегасних струменів низького тиску, що застосовуються при пожежогасінні, але на жаль, отримані теоретичні результати не дають права стверджувати про серйозний прорив у розумінні процесів, що відбуваються при генеруванні водяних струменів та їх вплив на вогнище пожежі. Розрізнені теоретичні дослідження не завжди добре узгоджуються із практичними результатами. Складність питання можна коротко описати в такий спосіб. Істотне поліпшення якості гасіння можна було б досягти шляхом створення так званих «керованих струменів» [214, 342]. У свою чергу, ефективне управління водяним струменем може бути досягнуте після найглибшого вивчення процесів відриву краплі від струменя, подачі вогнегасної речовини у потрібній кількості, потрібної дисперсності й у необхідне в даний конкретний момент часу місце вогнища пожежі. Останнє твердження пояснюється тем фактом, що ефективним можна буде назвати пожежогасіння, при якому вдасться зрошувати-охолоджувати місце гасіння краплями рідини потрібного розміру при мінімальній витраті речовини, і максимальній варійованості дальності його подачі. Експерименти, описані надалі, були проведені після детального дослідження літературних джерел, присвяченим струменям вказаного типу. Слід зазначити, що теоретично питання вивчене детальніше, аніж практично. Авторові не вдалося знайти досить повного аналізу й опису процесів, що відбуваються зі струменями, використовуваними в пожежогасінні, дальності струменя, умов дроблення капель, керованості хмарою розпилу кінцевої фази струменя. У більшості випадків дослідження являють собою використання розрізнених даних про ті або інші параметри струменя, набори не пов'язаних між собою статистичних даних про акції пожежогасіння, або результати досліджень стосовно окремих конструкцій пожежних стволів тощо.

Проведені дослідження. Для розрахунку висоти вертикального струменя при довільній залежності сили опору від швидкості потоку в роботі професора В. П. Ольшанського [213] пропонується задавати не вираз втрати тиску, а сили опору рухові, як функцію швидкості потоку. Швидкість визначається розв'язанням диференціального рівняння Бернуллі. При цьому, для обчислення параметрів струменів, як то радіусів дії компактної й розпиленої частин струменя, пропонується використовувати складний ланцюжок взаємозалежних формул і таблиць. Ще більш складним є випадок для розрахунку струменів під кутом до горизонту, відмінним від 90°.

При аналізі потоку води з пожежного ствола основними характеристиками є діаметр струменя, дальність його подачі та фізичний вплив, який він чинить на перешкоди, горючі матеріали або конструктивні елементи, що обмежують простір горіння. Дальність польоту рідини визначають за траєкторією струменя. Зазвичай її обчислюють за законом вільного падіння, що одночасно дозволяє розрахувати швидкість руху потоку.

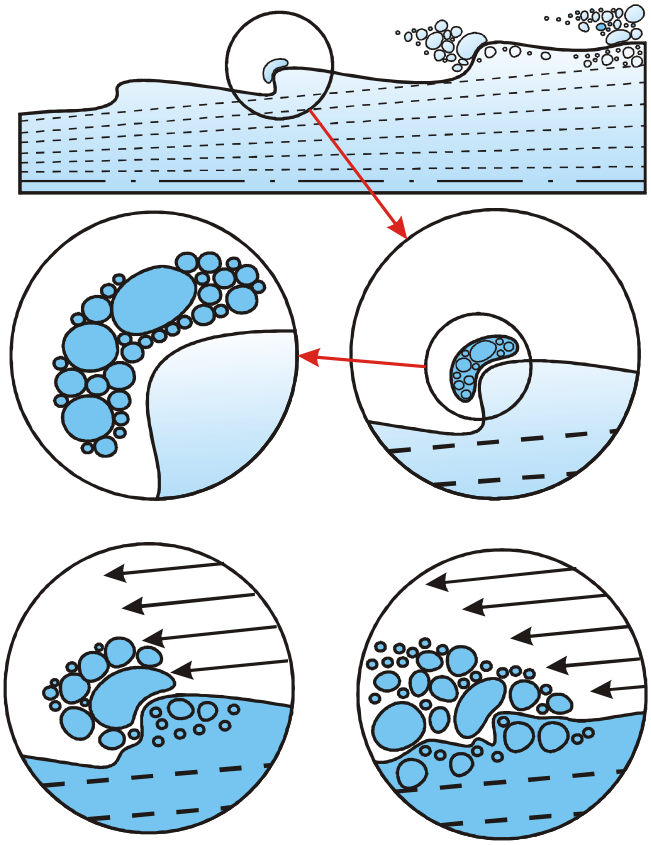


Рис. 6.17 – Подання процесу відриву крапель від компактної частини струменя

На основі цих параметрів проектується конструкція пожежного ствола або насадки. Її основна мета – звести до мінімуму енергетичні втрати та забезпечити максимальний коефіцієнт витрати рідини.

Експериментальні дослідження показали, що традиційні методи розрахунку основних характеристик водяного струменя потребують уточнення [84, 213, 288]. Зокрема, було встановлено точніші залежності дальності польоту струменя від кута його виходу щодо горизонту. Для ствола РС-50 при тиску на виході 0,6 МПа дальність змінювалася не більше ніж на 2,7 м у діапазоні нахилу від 17° до 65°.

При порівняно невеликих швидкостях руху компактна частина струменя залишається відносно великою. Подрібнення його на краплі відбувається переважно під дією капілярних сил. У такому випадку поверхнева енергія циліндричного струменя не буде мінімальною [362]. Після розпаду на окремі краплі енергія зменшується, оскільки форма рідини (краплин) наближається до оптимальної – з мінімальною поверхневою енергією і сферичною поверхнею.

Нинішній стан технічного оснащення підрозділів ОРС ЦЗ України характеризується надзвичайно низькими за критерієм ефективності обладнанням для гасіння пожеж. Ситуація ускладнюється динамікою зростання кількості надзвичайних ситуацій та їх масштабністю, що вказує на необхідність оснащення практичних підрозділів новою ефективною протипожежною технікою. Зазвичай у наукових джерелах йдеться про окремий випадок струменя, як про таку форму плину рідини, при якій рідина тече в навколишньому просторі, заповненому газом, що відрізняється від нього (струменя) параметрами. Відповідно до фізичних особливостей речовини струменя й зовнішнього середовища, розрізняються змішувані й незмішувані струмені. Поверхня незмішуваного струменя нестійка, й на деякій відстані від виходу ствола розпадається. Далекобійність такого струменя – відстань, на якій вона зберігається монолітною, залежить від фізичних властивостей її речовини й рівня початкових збурень у соплі. Для збільшення далекобійності пожежного

ствола його внутрішню поверхню профілюють і ретельно шліфують. Для зменшення далекобійності струменя, що виходить з форсунок, її турбулізують, закручують, а іноді попередньо змішують із газом. Існує багато підходів до керування струменем, відмінності насамперед залежать від того, який тиск досягається на виході сопла (ствола, насадки), яке значення витрати рідини забезпечується, але головним залишаються конструктивні особливості струминоформувального обладнання.

Для більшості проведених експериментів вогнегасною рідиною була вода, витрата складала до 5 л/с, тиск, як правило, не перевищував 1,0 МПа.

Основною формуючою ланкою ланцюга створення струменя є пожежний ствол, який у більшості випадків має нескладну конструкцію, що впливає на функціональні можливості пожежної системи в цілому. Конструктивно стволи відрізняються розміром, особливостями внутрішніх струминоформувальних каналів, їх пропускною здатністю. Детальний опис був наданий у розділі 2. На рис. 6.15. представлені основні типи (форми) кінцевої формувальної ланки для водяного струменя. Тут не зазначені спеціальні технічні прийоми ускладнення виду одержуваного струменя, як-от «закручування», пульсування-переривання, оскільки вони не розглядалися як маловживані в практиці пожежогасіння.

Огляд конструктивних особливостей технічних засобів для одержання струменів, використовуваних пожежно-рятувальними підрозділами ОРС ЦЗ України, дозволяє стверджувати про технічні недоліки існуючих пожежних стволів і насадок [355]. Насамперед, відзначимо той факт, що практично ніяким способом не використовуються особливості кінематики потоку рідини усередині струменя для одержання ефективних видів струменів, або для одержання такого бажаного результату як «керованість струменя». Відзначимо, що використовуваний термін керованості струменя почав застосовуватися лише останнім десятиліттям й означає наявність в обладнанні формування струменя технічних можливостей змінювати параметри одержуваної речовини (дальність подачі, дисперсність, витрата, вид хмари розпилу тощо).

Крім того, на практиці більшість персоналу пожежно-рятувальних підрозділів ОРС ЦЗ України змушена користуватися тими пристроями, які є в наявності, а не тими, які дозволили б одержувати необхідний у кожному конкретному випадку пожежогасіння вид вогнегасного струменя. Тобто, процес вибору пожежного ствола для акцій пожежогасіння – надуманий процес з причин малого типажу пристроїв, пропонованих для комплектацій підрозділів ДСНС України. Його розширення можливо, наприклад, за рахунок пристроїв, конструктивне виконання яких показане на рис. 6.18.

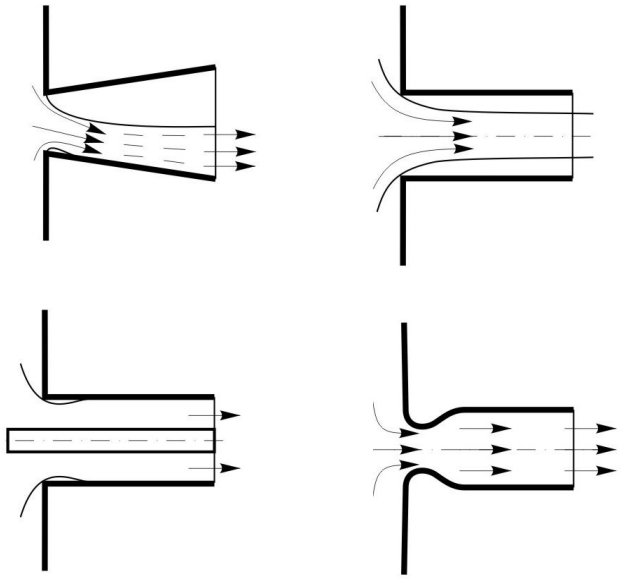
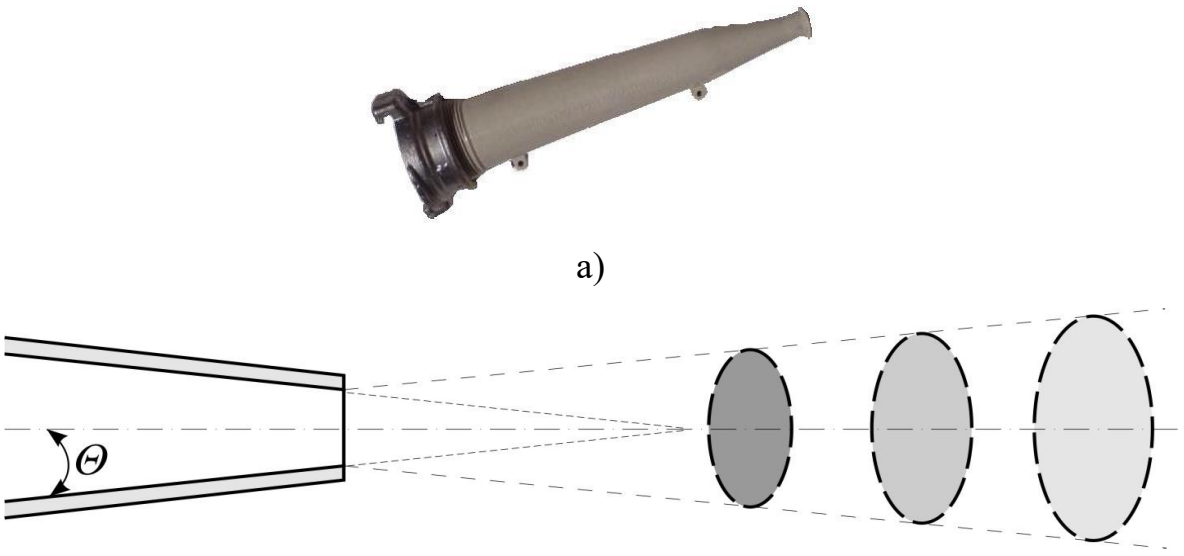


Рис. 6.18 – Нові конструкції насадок, що забезпечують формування різних типів струменів

Експерименти з використанням стенда підтвердили традиційні уявлення про процес формування водяних струменів низького тиску для випадку використання в якості струминоформувальної ланки найбільш використовуваних пожежних стволів РС-50 (витрата води при робочому тиску 0,4 МПа – 3,6 л/с, дальність компактного водяного струменя - не менше 30 м, діаметр вихідного отвору - 12 мм, довжина ствола – 265 мм) та пожежних стволів РС–70.



а)

б)

Рис. 6.19 – Пожежний ствол РС-50, фото (а), конусність струминоформувального каналу (б)

Слід зазначити, що для одного із експериментів довільно були обрані 10 пожежних стволів РС-50. При ідентичних умовах подачі до вогнища пожежі вогнегасної речовини (у нашому випадку РС-50 води) з використанням стенда, результати по дальності струменів відрізнялися на 1,4 м, що становило 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 можна вважати не суттєвим, оскільки експерименти зі стволами 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 необхідність більш уважного (вимогливого) ставлення до якості виготовлення навіть найпростіших пожежних стволів, оскільки якість одержуваного струменя (хмари розпилу) є одним з визначальних факторів ефективності проведення акцій пожежогасіння. Струмені, одержувані кожним з використовуваних однотипних

пожежних стволів, мають різне значення дисперсності крапель біля вогнища пожежі, що вимагає час для того, щоб пожежний зміг підібрати найкращі параметри струменя для гасіння. На практиці такого часу, як правило, не вистачає, тому ефективність гасіння внаслідок відмінності параметрів одержуваних струменів зменшується.

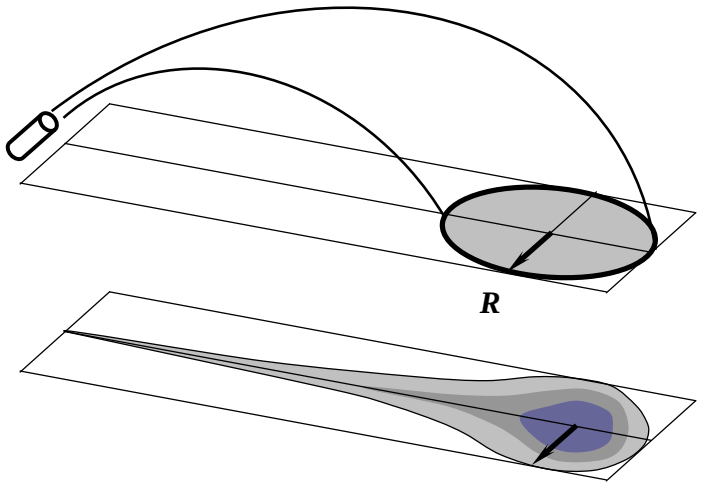


Рис. 6.20 – Демонстрація формування хмари розпилу, R – нормальний радіус

Таким чином, проведені експерименти з використанням стенда генерування гідродинамічних струменів указують на необхідність більш ретельного відношення до вибору пожежних стволів для акцій пожежогасіння, а саме до їх струминоформувальної частини, оскільки виявлені відмінності параметрів отриманих струменів для однотипних стволів іноді перевищують 30%.

6.5.3. Лабораторна установка системи подачі речовини до струминоформувального пристрою

Дослідження водяних струменів здійснювалися в декількох напрямках: теоретично, експериментально на лабораторному стенді генерування водяних вогнегасних струменів, лабораторній установці системи подачі речовини до струминоформувального пристрою, а також із використанням сучасних комп’ютерних програм моделювання водяних потоків.

Унікальною ланкою процесу дослідження стала лабораторна установка системи подачі речовини до струминоформувального пристрою. Установка, по суті, є копією пожежної автоцистерни у лабораторії. Ще за радянських часів вона була сконструйована та поміщена до ангару, в якому проводилися дослідження «сучасних» на той момент систем генерування водяних струменів, а також проводилися навчальні заняття з курсантами з дисципліни пожежна техніка (протипожежна техніка). За час існування установки вона витримала внесення великої кількості змін у її конструкцію, оскільки змінювались елементи протипожежної техніки. Таким чином, установка технічно «підлаштовувалась» під елементну базу, що застосовувалася практичними підрозділами пожежної охорони. У 2004 році було прийняте рішення про створення більш мобільного та простішого в експлуатації лабораторного стенду генерування водяних струменів, на якому й були проведені перші експерименти у 2006 році. Однак, лабораторна установка системи подачі речовини до струминоформувального пристрою не була виключена з технічного забезпечення експериментальної бази навчального закладу, оскільки її функціонування (через її конструкцію) є таким, що найбільше відповідає режиму функціонування пожежних автоцистерн. Зазначимо, що її конструкція й досі фактично є ідентичною більше половини усіх автоцистерн, що знаходяться пожежно-рятувальних підрозділів ОРС ЦЗ України.

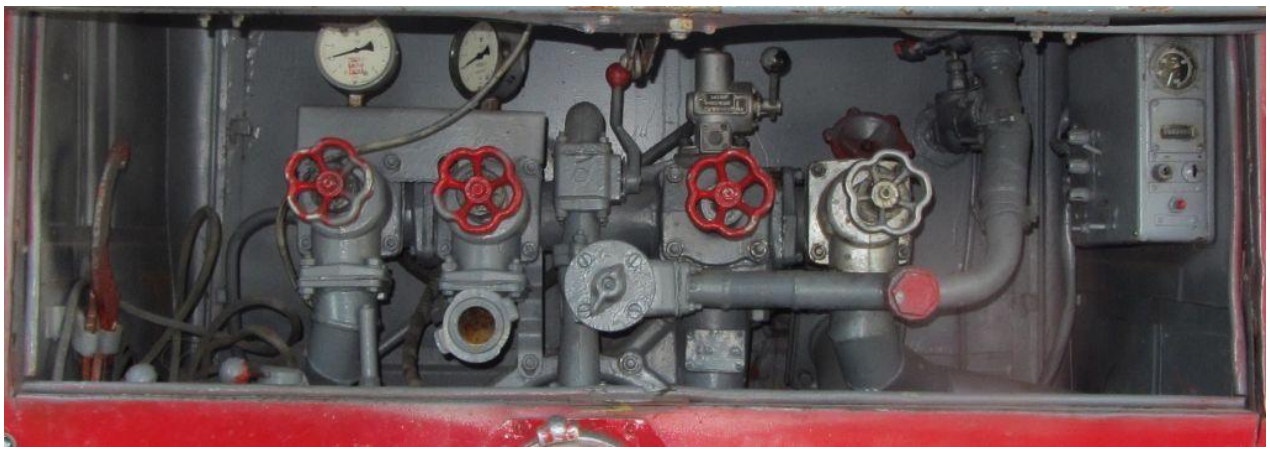


Рис. 6.21 – Модуль керування лабораторної установки системи подачі речовини до струминоформувального пристрою (фрагмент автоцистерни).

Загалом окремі експерименти, проведені на лабораторній установці системи подачі речовини до струминоформувального пристрою, дублювалися на лабораторному стенді генерування водяних вогнегасних струменів (до 2010 року). Перевага в проведенні експериментів надавалась останньому, для роботі зі стендом зазвичай було потрібно три особи, а у випадку лабораторної установки обходилися не менше як п’ятьма. Окрім того, силова частина стенда базувалась на використанні електродвигуна, тоді як в установці застосовувався двигун внутрішнього згорання. Витрати на проведення експериментів за допомогою стенда були нижчими. Починаючи із 2006 року для обробки результатів експерименту, що проводився на стенді, стало можливим використання спеціально розробленої комп’ютерної програми, яка суттєво знизила витрати на проведення експериментів. Стенд дозволяв знімати дані з системи генерування й одразу їх опрацьовувати та виводити на монітор комп’ютера у вигляді таблиць, графіків, діаграм. Таким чином, витрати речовини, що використовувалась при проведенні експериментів, у порівнянні з установкою в деяких випадках понизились щонайменше у 20 разів. Час проведення експериментів суттєво зменшився, обробка результатів спростилася.

Таблиця 6.9.

Технічні характеристики установки

Двигун

Тип	Бензиновий
Об’єм	5969 см3
Максимальна потужність	110 кВт, при 3200 об/хв
Максимальний крутний момент	402 Н·м, при 2000 об/хв
Система живлення	Карбюратор
Охолодження	Рідинне
Клапанний механізм	OHV
Тактність (число тактів)	4
Рекомендоване пальне	А–76/А–80

Трансмісія

Тип	механічна
Число ступеней	5-ступінчаста
Перемикання	напольний важіль

Тип насосу

Тип	ПН–40УВ
Місткість цистерни для води	2350 л
Місткість ємності для піноутворювача	170 л
Подача насосу	40 л/с

Як видно з табл. 5.9. Установка є ідентичною пожежному автомобілю на базі шасі АМУР–531341 (із 2012 року АМУР–531342) або ЗіЛ–131, призначених для доставки до місця пожежі бойового розрахунку, запасу води, піноутворювача та пожежно-технічного обладнання, для гасіння водою з цистерни, водойм і гідрантів, а також повітряно-механічною піною.

6.6. Стенди для дослідження реологічних властивостей рідин

В'язкість – властивість рідин чинити опір переміщенню одного прошарку щодо іншого. Вона визначається на підставі математичного опису того або іншого виду течії досліджуваного середовища. Найбільш простими є ламінарні потоки, описувані за допомогою рівняння Нав’є-Стокса.

У віскозиметрах використовують такі види ламінарних потоків:

а) потік Хаген-Пуазейля в трубці (капілярний потік);
б) кюветний потік (у просторі між двома концентричними обертовими циліндрами);
в) потік, що виникає в результаті аксіального переміщення двох концентричних циліндрів;

6.6.1. Визначення в’язкості застосовуваних речовин

Капілярний віскозиметр. Ламірарні течії не є основними для даного дослідження, однак вони властиві для випадків формування щілинними насадками рідинних потоків для охолодження поверхонь.

Ламінарний потік, що встановився, для капіляра описується рівнянням Хаген–Пуазейля [356]

$$\mu = \pi R^4 (p_1 - p_2)/(8QL),$$

де R – радіус капіляра; p_1 – тиск на вході; p_2 – тиск на виході; Q – об'ємна витрата; L – довжина капіляра.

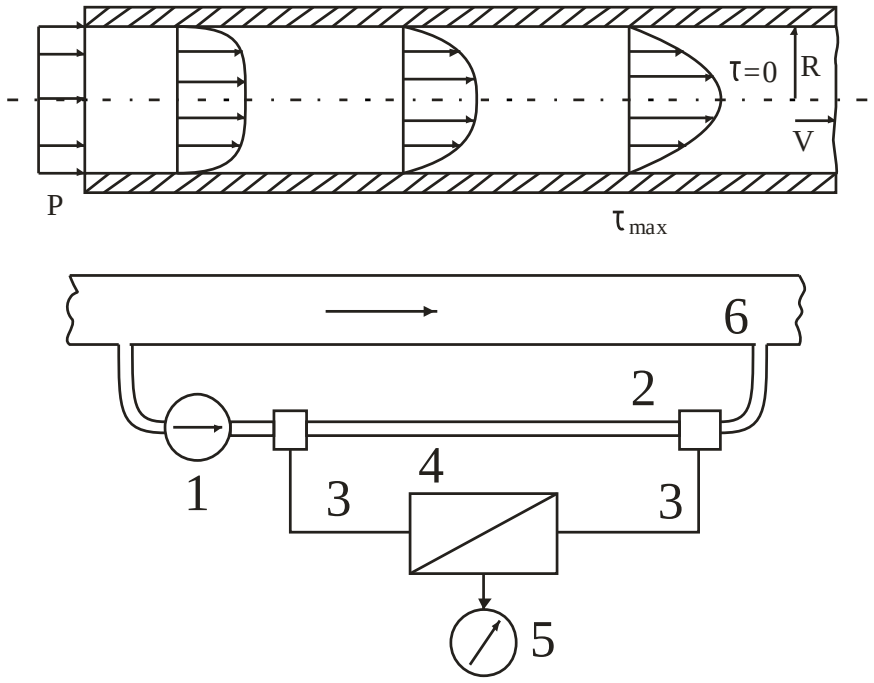


Рис. 6.22 – Схема капілярного віскозиметра:
1 – дозуючий насос; 2 – капіляр; 3 – імпульсні трубки виміру тисків; 4 – перетворювач різниці тисків; 5 – покажчик в'язкості; 6 – основний трубопровід

Капілярний віскозиметр працює за принципом вимірювання витікання рідини через тонкий канал під дією різниці тисків на його кінцях. У реальних експериментах набігаючий потік може викликати неточності у показниках, тому для зменшення цього ефекту застосовують подовжені капіляри, що забезпечують більш стабільний і рівномірний потік рідини під час вимірювань.

Скляні капілярні віскозиметри часто використовуються в лабораторних установках. Деякі з них здатні здійснювати безперервний контроль в'язкості рідини (рис. 6.24). Зразкові капілярні віскозиметри використовують для градуювання й калібрування віскозиметрів інших типів [356].

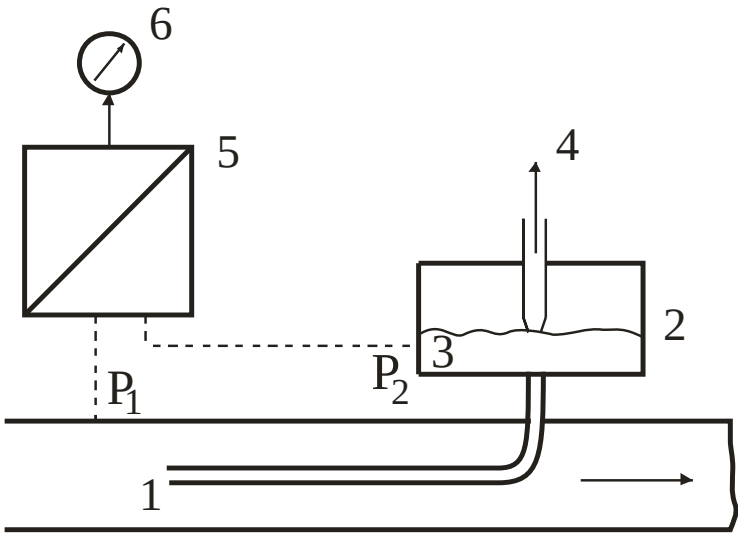


Рис. 6.23 – Принципова схема віскозиметричної установки

1 – вимірювальний зонд із капіляром; 2 – регулятор витрати; 3 – дросель, що не залежить від в'язкості; 4 – скидання; 5 – вимірювальний перетворювач; 6 – реєстратор

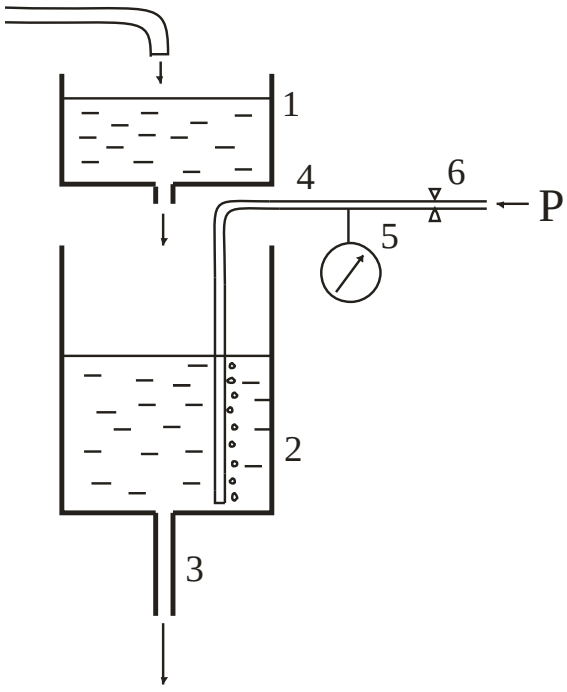


Рис. 6.24 – Принципова схема віскозиметра безперервної дії:

1 – дозована подача контрольованого середовища; 2 – вимірювальна ємність; 3 – випускний капіляр; 4 – пневматичний перетворювач гідростатичного тиску; 5 – реєстратор; 6 – дросель у лінії подачі повітря

Для забезпечення постійної витрати рідини через капіляр, у конструкцію віскозиметра входить дозуючий насос. Також у приладі передбачений вимір перепаду тисків на його кінцях і відповідне перетворення результатів вимірювання з виведенням отриманого значення в'язкості на шкалу покажчика або на реєстратор [356].

Метод капілярної віскозиметрії цілком можна віднести до високоточного методу, тому що відносна похибка вимірів складає долі відсотка, і залежить від підбора матеріалів віскозиметра, точності відліку часу, а також інших параметрів, що беруть участь у методі капілярного витікання. Конструкція такого типу віскозиметра є надзвичайно простою і надійною. Матеріали виконання приладу мають достатню міцність, через необхідність їх використання в жорстких умовах експлуатації.

Ротаційний віскозиметр. Ротаційний метод віскозиметрії полягає в тому, що досліджувана рідина поміщається в малий зазор між двома рівномірно обертовими відносно один одного циліндрами, і заснований на використанні сил вязкого тертя. Цей зазор повинен бути дуже малим для забезпечення сприятливих умов теплообміну між металевими поверхнями, які утворюють щілину та рідиною. Вимірювальними поверхнями ротаційних віскозиметрів бувають не лише циліндри, вони поділяються також на: диск–диск; конус–конус; півсфера–півсфера; конус–площина та інше.

Щоб спростити конструкцію віскозиметра, звичайно обертається тільки один із циліндрів (кювентні віскозиметри). Ламінарний характер цього потоку порушується тільки наявністю, так званих, завихрень Тейлора, що виникають при обертанні внутрішнього циліндра й при великих числах Рейнольдса [356].

Обчислення в’язкості в приладі здійснюється на основі співвідношення, що відображає пропорційну залежність між динамічною в’язкістю досліджуваного середовища та крутним моментом, прикладеним до вимірювального вала M

$$\mu = M\left(R_a{}^2 - R_i{}^2\right)/\left(4\pi L\omega_0 R_a{}^2 R_i{}^2\right)$$

де M – крутний момент; ω_0 – кутова швидкість обертання циліндра; L – довжина циліндра; ${R_a}^2,\ {R_i}^2$ – радіуси зовнішнього й внутрішнього циліндрів (рис. 6.25).

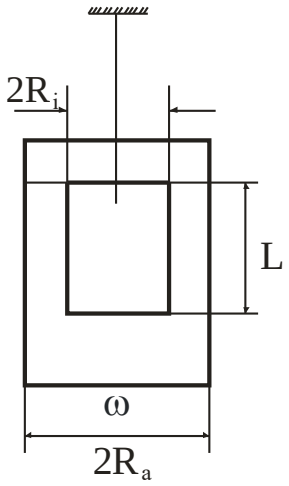


Рис. 6.25 – Принцип дії ротаційного віскозиметра (кюветного типу); 1 – нерухливий циліндр; 2 – обертовий циліндр

Внаслідок обертання рідина біля поверхні зовнішнього циліндра рухається з кутовою швидкістю ω, а біля поверхні внутрішнього циліндра вона нерухома [356].

Для елементарного кільцевого шару рідини, що розташований на віддалі r від осі обертання, градієнт швидкості складає

$$\gamma = r\frac{d\omega}{dr}.$$

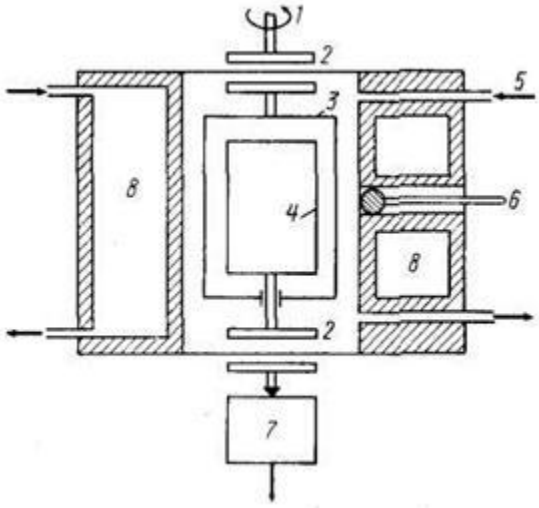


Рис. 6.26 – Принципова схема вимірювального гнізда ротаційного віскозиметра: 1 – моторний привід; 2 – магнітні муфти; 3 – обертовий зовнішній циліндр; 4 – «нерухливий» внутрішній циліндр; 5 – введення

контрольованого середовища; 6 – термометр; 7 – обладнання компенсації моменту й вимірювання; 8 – ванна термостата

Відповідно до закону Ньютона, сила тертя на поверхні радіуса r та висотою l

$$F(r) = \mu r \frac{d\omega}{dr} 2\pi r l \,.$$

Ця сила створює момент, врівноважений однаковим за величиною, але протилежним за знаком зовнішнім обертальним моментом M

$$M = 2\pi\mu l r^2 \frac{d\omega}{dr}.$$

Проінтегрувавши даний вираз, маємо

$$-\frac{M}{2r^2} = 2\pi l\mu\omega + C \,.$$

Позначимо $C = \frac{M}{2r^2}$, тому $M = 4\pi l\mu\omega \frac{{R_a}^2{R_i}^2}{{R_a}^2-{R_i}^2}$, звідки й визначатимемо в'язкість рідини μ за вищевказаною формулою.

Отриманий вираз справедливий також і для випадку, коли обертається внутрішній циліндр, а зовнішній нерухомий.

Ротаційні віскозиметри зазвичай включають електродвигун з широким діапазоном швидкостей обертання, на вал якого встановлюється шпиндель, а також електронну систему контролю. Використання електроніки дозволяє фіксувати зміни споживаного струму, необхідного для підтримки заданої швидкості обертання шпинделя, зануреного у рідину. Це надає можливість безпосередньо визначати величини напруження та швидкості зсуву, що, у свою чергу, дозволяє будувати криві, які відображають реологічні властивості рідини.

Серед основних переваг ротаційних віскозиметрів варто відзначити широкий діапазон вимірюваних значень швидкості обертання та в'язкості рідини, а також наявність системи контролю температури. Процедура вимірювання у таких приладах відносно проста й не потребує високого рівня спеціальної підготовки, що робить їх зручними для лабораторного використання. Сучасні моделі обладнані інформативними дисплеями та програмним забезпеченням, що забезпечує збір і графічне відображення даних у вигляді

кривих залежності напруження від швидкості зсуву (реограм), що значно полегшує аналіз реологічної поведінки досліджуваних рідин.

6.6.2. Реологічні особливості розчинів з поверхнево-активними речовинами, що використовуються для ліквідації горіння

З цією метою (див. 1.2) були проведені дослідження піноутворювачів [39], загальні характеристики яких наведено в табл. 6.10.

Найпоширенішим і ефективним засобом для гасіння є вода у формі струменя (або спрею, туману). Вода є дуже ефективним засобом для гасіння з різних причин. Вона нетоксична, прийнятно доступна й дешева у порівнянні з іншими рідинами. Вона володіє високою питомою теплотою пароутворення [136], що пов'язано з «полярною» структурою молекули води. Тобто молекула володіє деякою силою, що зв’язує молекули води разом. Зазначене пояснює таке явище, як поверхневий натяг води, який призводить до деяких недоліків застосування води для пожежогасіння. По-перше, вона електропровідна. По-друге, поверхневий натяг води також означає, що горючі поверхні не так легко змочуються. Проте це можна подолати, включивши невеликі кількості деяких типів поверхнево-активних речовин.

Нарешті, зв'язок між молекулами води (поверхневий натяг) також пояснює більш високі потреби енергії водяних насосів та необхідність більш високого тиску для отримання невеликих крапель.

Експерименти та їх результати. Реологічні властивості робочих розчинів піноутворювачів досліджували за допомогою ротаційного віскозиметра Реотест [39]. В експериментах застосовувався циліндричний сенсор типу N, який забезпечує реалізацію механізму вимірювань за принципом системи Сірла–Куета (Searle–Couette), що дозволяє оцінити в’язкість рідин при різних швидкостях зсуву.

Досліджуваний зразок розташовувався у кільцевій щілині між двома коаксіальними циліндрами. Зовнішній, нерухомий циліндр радіусом R виконує

функцію вимірювальної камери та розміщується у рідинному циркуляційному термостаті для підтримки стабільної температури досліджуваного матеріалу.

Внутрішній циліндр радіусом r та довжиною l, що обертається з кутовою швидкістю ω, з'єднаний через вимірювальний вал із циліндричною гвинтовою пружиною. Відхилення пружини слугує мірою обертального моменту, що діє на внутрішній циліндр. Зміни відхилення пружини реєструються потенціометром, включеним у мостову схему, при цьому зміна струму в діагоналі схеми пропорційна обертальному моменту M пружини.

У такій коаксіальній циліндричній системі напруження зсуву τ та швидкість зсуву γ можуть бути визначені з високою точністю. Для циліндричного вимірювального приладу N робочий діапазон вимірювань становить:

- напруження зсуву, τ (1,6...320) Па;
- швидкості зсуву, γ (1,5...1312) $с^{-1}$;
- в'язкості, μ (1...200000) мПа·с.

Експериментальна процедура полягала у визначенні числового значення показника α на шкалі індикаторного приладу при різних швидкостях обертання його вала. Кожна швидкість обертання відповідала конкретному режиму швидкості зсуву рідини, що дозволяло оцінити, як змінюються реологічні властивості досліджуваного розчину під дією різних механічних навантажень. Завдяки цьому підходу можна отримати кількісну характеристику поведінки рідини, що використовується для розрахунків гідравлічних втрат та прогнозування параметрів потоків у пожежогасильному обладнанні.

В простір між рухомим та нерухомим циліндрами вимірювальної ємності заливали досліджувану рідину в кількості 10 ± 0,5 мл, єднали циліндричний вимірювальний пристрій з вимірювальним механізмом приладу Реотест та під'єднували термостат. Збільшення швидкості зсуву виконували шляхом збільшення швидкості обертання вимірювального циліндра перемиканням редуктора. Для збільшення числа точок вимірювання перемикали також

швидкості обертання двигуна. Температура досліджуваних зразків у всіх дослідах становила 20 ± 2 ℃.

Для напруження зсуву, що діє в досліджуваному матеріалі, отримуємо

$$\tau = z\alpha ,$$

де τ – напруження зсуву, 10^{-1} Па;

z – постійна циліндра, 10^{-1} Па/под.шкали;

α – значення, що відраховується на шкалі індикаторного приладу.

За виміряними напрузі зсуву τ та швидкості зсуву γ можна підрахувати динамічну в'язкість $\mu = \tau/\gamma$.

За отриманими даними були побудовані реологічні криві зображені на рис. 6.27 та рис. 6.28.

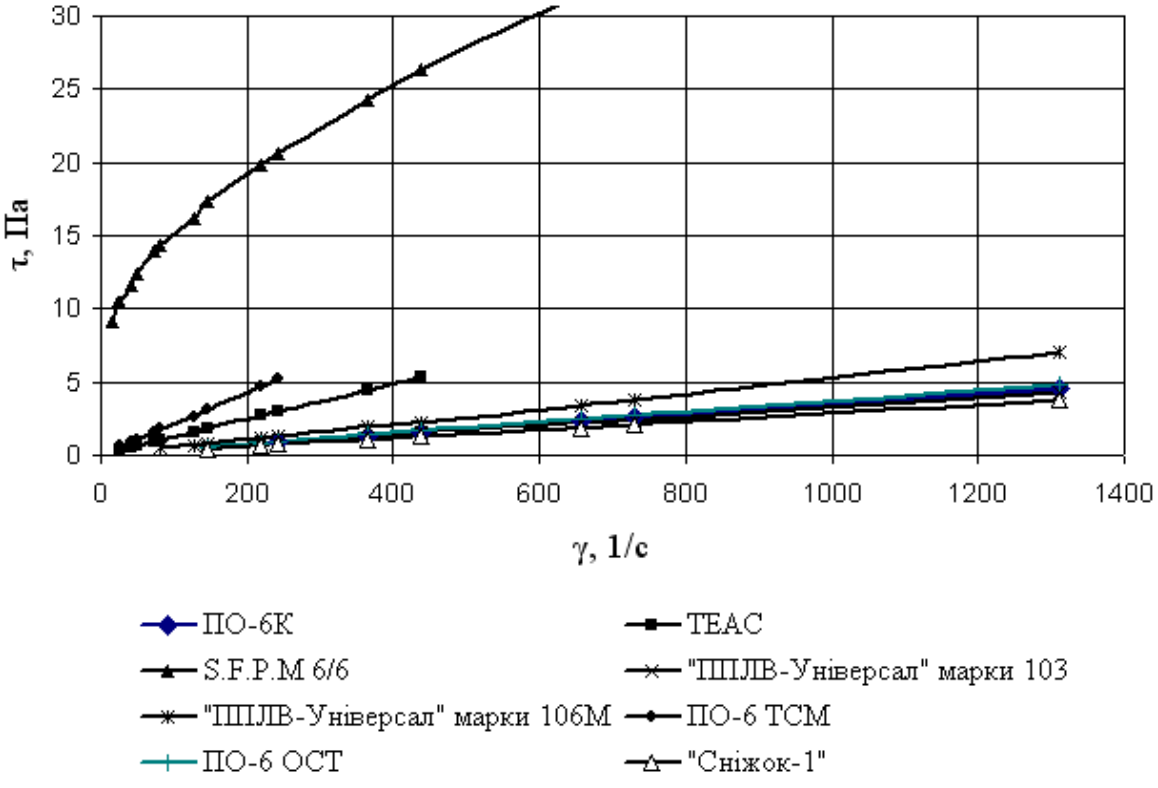


Рис. 6.27 – Реологічні криві концентратів піноутворювачів

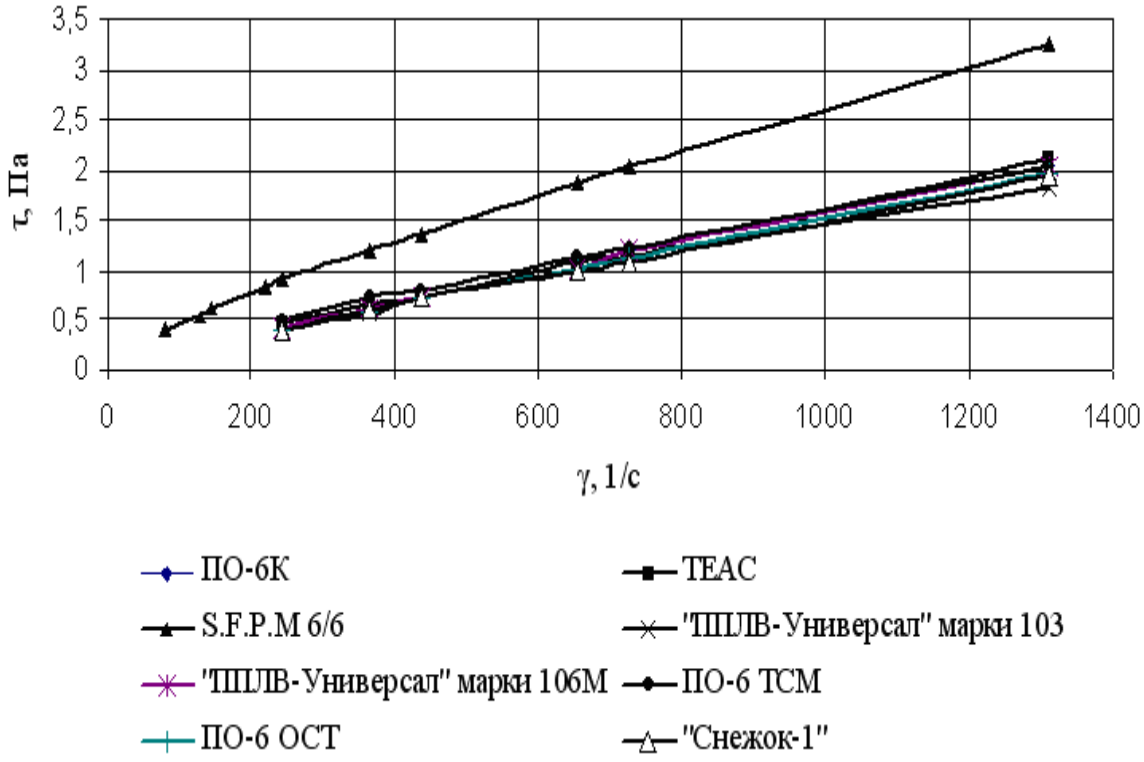


Рис. 6.28 – Реологічні криві розчинів піноутворювачів у робочих концентраціях

Таблиця 6.11

Значення консистентної сталої k та індексу течії n

Марка піноутворювача	Концентрація, %	k	n	Температура, ℃
ПО-6К	100	0,0045	0,9637	19,5
	6	0,0027	0,9226	19,5
TEAC	100	0,0157	0,9558	20,0
	6	0,0032	0,9011	20,0
S.F.P.M 6/6	100	3,1948	0,3499	20,0
	6	0,0141	0,7556	22,0
"ППЛВ-Універсал" марки 103	100	0,0041	0,97	19,5
	6	0,0032	0,8862	22,0
"ППЛВ-Універсал" марки 106М	100	0,006	0,9786	21,0
	6	0,0027	0,9246	21,5
ПО-6 ТСМ	100	0,0157	0,9558	21,5
	6	0,0032	0,9011	22,0
ПО-6 ОСТ	100	0,0046	0,9672	20,5
	6	0,0022	0,9485	20,5
"Сніжок-1"	100	0,0037	0,9619	21,0
	6	0,0024	0,9299	21,0

Були проведені реологічні дослідження піноутворювачів з підвищеною вогнегасною здатністю сімейства "Пірена" [358]. Вивчалася поведінка піноутворювача та його розчинів при базових значеннях температури 2°С, 16,5°С та 50,5°С (рис. 6.28)

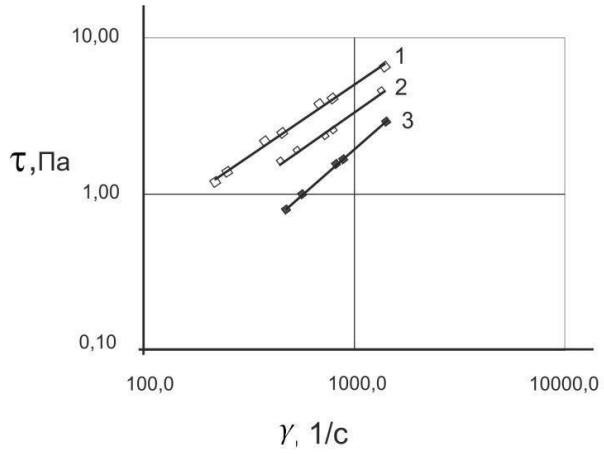


Рис. 6.28 – Реологічні криві розчинів піноутворювачів у робочих концентраціях "Пірена-1" (1), "Пірена-2" (2), "Пірена-4"(3)

Результати аналізу показують, що реологічні криві близькі по формі до кривих степенної рідини Оствальда-де Віля. Значення консистентної сталої k та індексу течії n наведено в табл. 6.11 [39].

Аналіз експериментальних даних свідчить, що рідкі поверхнево-активні речовини, а також водні суміші на їх основі у діапазоні робочих концентрацій поводяться як неньютонівські середовища з вираженими реологічними властивостями. Їхню течію доцільно описувати степеневою моделлю Оствальда–де Віля, для якої показник течії n змінюється в інтервалі приблизно від 0,35 до 0,98. Зазначені особливості реологічної поведінки мають принципове значення під час інженерних розрахунків, оскільки вони впливають на визначення гідравлічних втрат і швидкісних характеристик потоків у пожежогасильному обладнанні.

Під час розроблення лабораторних установок основну увагу було зосереджено на створенні окремого модуля, призначеного для збору експериментальних даних та їх подальшої обробки із застосуванням сучасних обчислювальних засобів. Наявність такого модуля дала змогу не лише

автоматизувати процес вимірювань, а й значно спростити аналіз отриманих результатів. Виведення експериментальних даних у зручному графічному вигляді дозволяло безпосередньо в ході досліджень оцінювати вплив зміни режимних параметрів і за потреби оперативно коригувати умови експерименту. Це забезпечувало більш ефективний підбір оптимальних значень тиску та витрати у системі формування вогнегасних струменів.

Однією з визначальних характеристик ефективності роботи протипожежної техніки є інтенсивність подавання вогнегасної речовини. Збільшення цього показника може бути досягнуте як шляхом зміни гідродинамічних властивостей рідини, що транспортується напірними пожежними рукавами, так і за рахунок зменшення гідравлічного опору самих рукавів. Величина цього опору залежить, зокрема, від числа Рейнольдса *Re* та стану внутрішньої поверхні напірних пожежних рукавів.

За значних значень числа Рейнольдса *Re* рух рідини набуває характеру розвиненої турбулентної течії. У таких умовах в’язкий підшар практично зникає, а втрати на тертя визначаються переважно шорсткістю внутрішньої поверхні рукавів. При цьому збільшення довжини напірних пожежних рукавів (рис. 6.29) супроводжується зростанням енергетичних втрат під час транспортування вогнегасної рідини, що безпосередньо впливає на робочі параметри системи.

Урахування зазначених втрат є необхідним для коректної оцінки енергетичної ефективності системи подавання вогнегасної речовини. Це, своєю чергою, дозволяє обґрунтовано виконувати ексергетичний аналіз і більш повно оцінювати роботу системи формування вогнегасних струменів у цілому.

Експериментальні дослідження подовження напірних пожежних рукавів проводилися на шести однотипних латексованих зразках діаметром 77 мм, середня довжина яких становила 1960 см. Отримані результати показали, що варіація величини подовження для цієї групи рукавів перебувала на рівні близько 12%. Фактичні значення подовження змінювалися в межах від 73 до 83 см і становили 73, 77, 79, 81, 82 та 83 см.

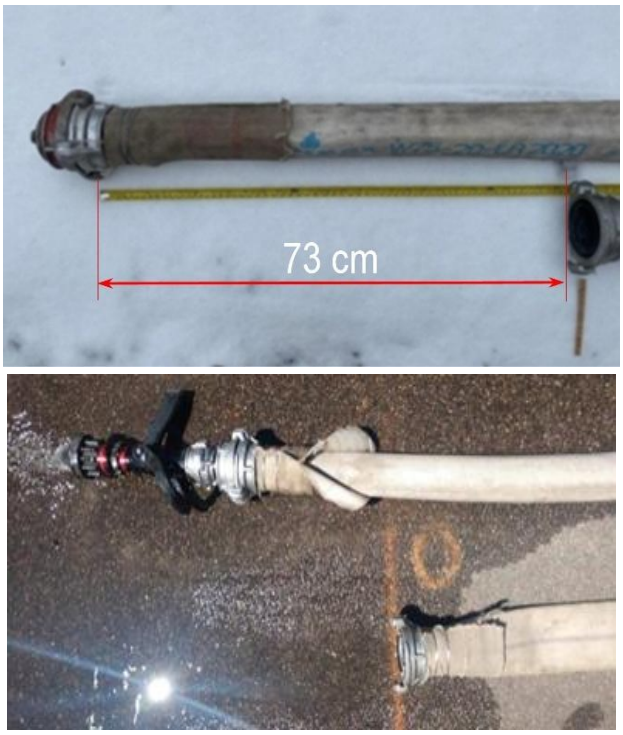


Рис. 6.29 – Фрагменти експериментів з визначення подовження напірних пожежних рукавів

Для порівняння було досліджено шість латексованих напірних пожежних рукавів діаметром 51 мм. У цьому випадку розкид значень подовження виявився меншим і не перевищував приблизно 9%, що свідчить про інші деформаційні характеристики рукавів меншого діаметра [357].

Під час випробувань із використанням пожежного ствола Protek 366 найбільше подовження було зафіксовано при подачі вогнегасної рідини через латексований напірний пожежний рукав діаметром 77 мм. За цих умов тиск на вході до рукава становив 1,0 МПа, а витрата рідини дорівнювала 1,9 л/с. Відповідна зміна довжини рукава досягала 830 мм, що є максимальним зафіксованим значенням у межах проведених експериментів.

Окремо було встановлено, що при подовженні латексованого напірного пожежного рукава діаметром 77 мм на 79 см тиск на його вході складав 0,8 МПа. При цьому сила, необхідна для забезпечення такого розтягу, становила 2,04 кН.

Під час транспортування вогнегасної речовини напірними рукавними лініями частина підведеної енергії витрачається на механічну деформацію

пожежних рукавів. Зокрема, енергетичні втрати пов’язані з процесом їх розтягу та необхідністю утримання рукавів у деформованому стані протягом роботи системи. Такі явища зумовлені пружними властивостями матеріалу рукавів і мають відчутний вплив на загальний енергетичний баланс процесу подавання рідини.

Для встановлення факту наявності розтягу напірних пожежних рукавів, а також для визначення величин динамічних зусиль, що його спричиняють, було використано емпіричні методи дослідження. Основу методики складали цілеспрямовані спостереження, інструментальні вимірювання та проведення експериментальних випробувань, що дозволило отримати достовірні кількісні характеристики деформаційних процесів.

Зменшення сумарних енерговитрат на транспортування вогнегасних рідин може бути досягнуте шляхом зниження гідравлічних втрат у рукавних лініях. Один із перспективних підходів полягає у зміні властивостей транспортованої рідини за рахунок введення до її складу поверхнево-активних речовин, які сприяють зменшенню опору руху та підвищенню ефективності подавання.

Експериментальні випробування виконувалися із використанням латексованих напірних пожежних рукавів діаметром 51 мм, які відбиралися без попереднього упорядкування. Рукавна лінія формувалася загальною протяжністю 200 м (рис. 6.30). Дослідження проводилися в умовах стабільної температури навколишнього середовища, що становила близько 20 °С, при тиску, створюваному насосом, у діапазоні 4–6 бар [59-61].

Як робоче середовище застосовували чисту воду, а також водні розчини з додаванням піноутворювачів Альпен, Пірена-1, Софір, та Барс. Отримані експериментальні дані засвідчили, що вплив складу рідини суттєво позначається на витратних характеристиках системи. Найбільш виражений ефект було зафіксовано у разі використання піноутворювача Барс у концентрації 0,021%, коли зростання витрати досягало 11,5%.



Рис. 6.30 – Фрагмент експерименту енергетичних втрат при транспортуванні вогнегасних рідин

Водночас зростання спостерігалося лише у вузькому діапазоні концентрацій доданого піноутворювача, а для інших піноутворювачів стверджувати про збільшення витрати рідини некоректно, оскільки воно не перевищує похибку результатів експериментів. Встановлений факт може бути використаний для зменшення енергетичних витрат на транспортування рідин пожежними рукавами чи гнучкими трубопроводами.

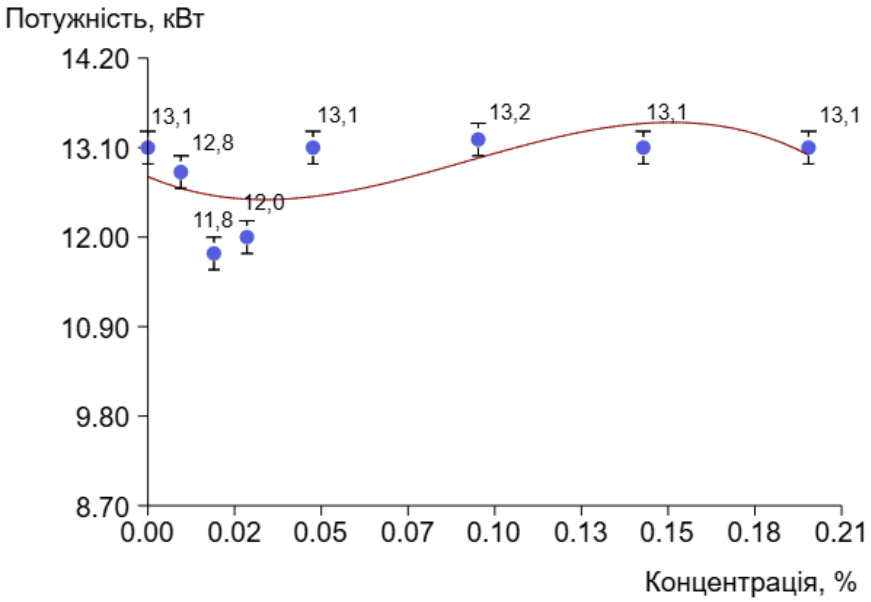


Рис. 6.31 – Залежність потужності W, що забезпечує транспортування рідин із додаванням піноутворювача Барс.

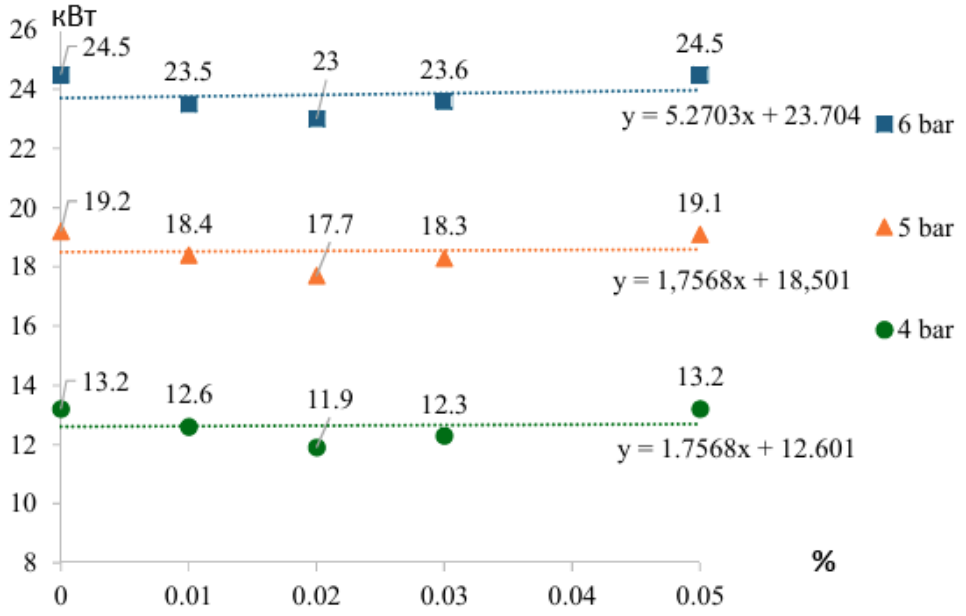
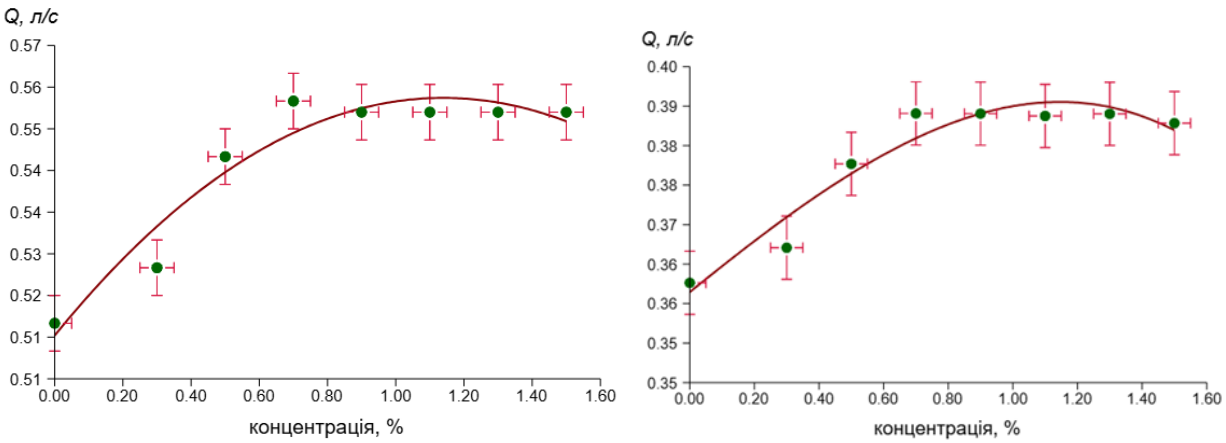


Рис. 6.32 – Залежності потужності W при транспортуванні рідин із додаванням піноутворювача Барс для різних значень тисків на виході насоса [61]

Дослідження також показали, що введення поверхнево-активних речовин у водні вогнегасні склади ефективно знижує гідравлічний опір під час їх подавання. Зокрема, додавання полігексаметиленгуанідину гідрохлориду в концентраціях від 0,03 до 0,290% дозволяє при сталому тиску підвищити витрату рідини щонайменше на 20 % [359, 360, 363]. Ефект збільшення витрати проявлявся у діапазоні тиску на вході рукава від 0,3 до 0,8 МПа.



a *b*

Рис. 6.33 – Витрати водної вогнегасної речовини на основі полігексаметиленгуанідину гідрохлориду: *a* − трубопровід довжиною 1 м; *b* – трубопровід довжиною 13м [359].

Під час досліджень розгалужених трубопроводів систем автоматичного водяного пожежогасіння було виявлено, що витрата водної вогнегасної речовини через дренчерні зрошувачі зростає при введенні полігексаметиленгуанідину гідрохлориду в концентраціях від 0,3 до 1,4 %. Для трубопроводів довжиною 1 м та 13 м підвищення витрати досягало 7,69 % (рис. 6.33, б).

Аналіз отриманих експериментальних даних із застосуванням статистичних методів дозволив побудувати залежність витрати розчину від концентрації полімеру у вигляді полінома третього степеня для трубопроводу довжиною 13 м:

$$y = -0{,}0065x^3 - 0{,}009x^2 + 0{,}0461x + 0{,}03632.$$

Ця формула дає змогу прогнозувати витрати водного вогнегасного розчину залежно від концентрації полімеру, що є важливим для практичного розрахунку ефективності системи. Достовірність апроксимації експериментальних даних, залежно від обраного порядку полінома, коливалася від 94 до 99 %, причому для полінома третього степеня вона становила 96 %.

Результати експериментальних досліджень підтвердили, що під час руху в'язких рідин у пожежних стволах, розпилювальних насадках і розгалужених трубопровідних мережах автоматичних систем водяного пожежогасіння за умов дискретного відбору рідини на гідродинаміку потоку впливають не лише сили внутрішнього тертя, а й інерційні складові, зумовлені конвективним прискоренням. У таких режимах характер енергетичних втрат у потоці вогнегасної речовини суттєво відрізняється від випадку усталеного плину, що потребує обов'язкового врахування під час виконання гідравлічних розрахунків. Урахування зазначених факторів дало змогу сформулювати практичні рекомендації щодо проєктування насадок і спринклерів із узгодженими коефіцієнтами витрати, а також обґрунтувати доцільність використання малоконцентрованих водних розчинів

піноутворювачів для забезпечення більш рівномірного розподілу витрати вздовж трубопровідної лінії.

Висновки до розділу 6

1. Використання методів фізичного моделювання дозволяє отримати детальні характеристики струминних потоків як у лабораторних, так і в натурних умовах. Зокрема, визначаються профіль швидкості вздовж струменя, довжина його початкової гідродинамічної ділянки, зона активного розпилення та параметри, що впливають на їх формування. Ці дані забезпечують можливість підвищити точність розрахункових методик для струменів різних типів і конфігурацій, що є критично важливим для проєктування ефективних систем подачі вогнегасних речовин.

2. Розроблений стенд для проведення гідродинамічних випробувань та дослідження вогнегасних струменів, згідно з результатами фізичного моделювання течії струменя. Техніко-економічними параметрами оптимізації, що дозволяють здійснювати регулювання процесу гідравлічного руйнування, приймалася енергія струменя та дальність його генерування. Модель параметра оптимізації, виходячи, з фізичного смислу коефіцієнтів регресії, дозволила зробити висновок про ступінь впливу чинників на параметр оптимізації. Встановлено, що найбільший вплив мав чинник витрати рідини і чинник діаметра вихідного отвору насадки.

3. Експериментально підтверджено зростання максимальної дальності генерування струменя на 3,6% при стандартних характеристиках функціонування ствола РС-50, витраті 3,7 л/с, тиску 0,4 МПа, при температурі 20ºС, кінематичній в’язкості $1{,}019–1{,}033\cdot10^{-6}$ $м^2/с$, а також зростання витрати на 8,5% порівняно з використанням води без добавок.

4. Відкориговано криву залежності дальності подачі вогнегасного розчину від кута нахилу ствола, максимальна дальність подачі водяного струменя спостерігалась при $\alpha\approx30°$, крива мала більш опуклу форму.

РОЗДІЛ 7
МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ І ЗАСТОСУВАННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ПОЖЕЖНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ГЕНЕРУВАННЯ РІДИННИХ СТРУМЕНІВ

Для пожежогасіння є актуальними проблеми струминотворення і «керування» отриманими струминними потоками. Фактично, розвинення наукових основ щодо створення і застосування технічних засобів генерування вогнегасних струменів має сприяти підвищенню рівня технічного забезпечення пожежно-рятувальних підрозділів ОРС ЦЗ України.

Процес горіння супроводжується випромінюванням теплової енергії, виділенням шкідливих, небезпечних речовин. У зв'язку з цим, для зменшення рівня негативних наслідків впливу чинників горіння використовуються різні типи струменів. Існує проблема визначення впливу конкретного струменя на конкретне джерело тепла, наприклад, вогнище пожежі. Іншою проблемою є розробка ефективної технології створення різних струменів та способів і засобів їх подачі до вогнища пожежі. Фактично утворюється логічний ланцюжок різні пожежі – різні теплові впливи й шкідливі речовини – різні типи струменів. Однією із складових отримання рішення може бути проведення математичне і фізичне моделювання процесів струминоформування, що має сприяти вирішенню проблеми створення технології отримання різних струменів для різних ситуацій. При цьому, як було показано у розділі 4, важливо керуватися ексергетичними критеріями.

7.1. Методики розрахунку і прогнозування гідравлічної системи формування струменів із заданими характеристиками

У системі пожежно-рятувальної техніки ключове місце впродовж тривалого часу посідає пожежна автоцистерна, яка залишається основним транспортним засобом під час виконання аварійно-рятувальних робіт і

обмеження дії небезпечних факторів. Конструктивно вона являє собою спеціалізований автомобіль, обладнаний резервуаром для води місткістю зазвичай від 2 до 4 т, а в окремих модифікаціях – до 14 т, баком для піноутворювача масою до 300 кг, пожежним насосом і комплектом пожежно-технічного оснащення. Крім того, машина передбачає наявність від трьох до восьми робочих місць для особового складу, що забезпечує оперативне транспортування підрозділу безпосередньо до місця ліквідації пожежі.

Незважаючи на широке застосування води як основного вогнегасного агента, ефективність її використання залишається низькою через неповну реалізацію потенціалу тепловідведення. За результатами численних досліджень у галузі пожежної безпеки встановлено, що сучасні способи гасіння здебільшого супроводжуються значними перевитратами рідини: на кожну умовну одиницю води, яка фактично бере участь у припиненні горіння, припадає багаторазово більший об’єм (19:1), що не виконує охолоджувальної функції. При цьому за умови фазового переходу у пар водяний вогнегасний агент здатний забезпечувати надзвичайно високий рівень тепловідбору, теоретичне значення якого досягає 2,26 МВт/л (питому теплоту пароутворення), середня питома теплоємність води складає 4,22 кДж/(кг·К). Насправді зазначена потужність охолодження досягається шляхом використання значно більшої кількості води, оскільки максимальне використання охолоджувальної потужності води є можливим лише у випадку, якщо вона повністю випаровується у вогнищі пожежі із врахуванням її поведінки [361], особливостей застосовуваної тактики пожежогасіння. Співвідношення 19:1 можна продемонструвати у такий спосіб. У випадку повного використання охолоджувальної здатності води із позицій тепловідбирання, для «типової» АЦ-40 забезпечення її нинішнього ефекту досягалося б наявністю 118-літрової ємності для води.

Перспектива реалізації вказаних властивостей води як засобу пожежогасіння має базуватися на фундаментальних дослідженнях з моделювання розвитку, розповсюдження пожежі [364]. Фактично, для

створення деякої ідеальної системи пожежогасіння (з позиції ексергійного підходу), потрібно реалізувати схему передачі енергії двигуна пожежної машини до місця остаточного розпилу струменя за умови мінімуму витрат енергії.

Створення гідравлічної системи формування струменів, що б дозволяли із найвищою ефективністю здійснювати локалізацію та ліквідацію надзвичайних ситуацій, незалежно від характеру походження подій, що можуть зумовити їх виникнення, як-то природного чи техногенного характеру, є вкрай складною задачею. Перш за все, це можна пояснити великою кількістю типів струменів, які треба генерувати у різних надзвичайних ситуаціях (суцільні, розпилені, розпорошені, імпульсні), різними видами робочої речовини (вода, водні розчини, піни, порошки), фазністю й компонентністю (рідина – газ, рідина – рідина, рідина – тверді частинки), та широким діапазоном їх основних характеристик (тиску на вході струминоформувального пристрою, швидкості струменя на його виході, витрати робочої речовини, дальності генерування, висоти подачі, силової дії струменя на перешкоду, дисперсності зони розпорошення тощо). Окрім того, не слід забувати, що суттєвий вплив на параметри отримуваного струменя чинитимуть особливості середовища, яке буде його оточувати.

З огляду на вищезазначене, передбачається доцільним створення не єдиної гідравлічної системи формування струменів із заданими характеристиками, а єдиного підходу до вибору типу, способів й засобів генерування струменів та технології їх застосування під час вирішення різноманітних задач забезпечення високоефективної локалізації та ліквідації надзвичайних ситуацій.

Використання струменів, генерованих технічними засобами, що є на озброєнні пожежно-рятувальних підрозділів ОРС ЦЗ України, зазвичай передбачає доставку вогнегасного середовища до вогнища пожежі або речовин, що дозволяють здійснювати охолодження й захист об’єктів, площ чи територій від небажаного теплового впливу. Для випадків пожежогасіння

підвищення ефективності гасіння можна було б досягти шляхом створення й коректного застосування «керованих струменів». Як показано у розділі 6, ефективне управління водяним струменем може бути досягнуте після найглибшого вивчення процесів відриву крапель від струменя й забезпечення подачі вогнегасної речовини потрібної дисперсності у потрібній кількості в кожен конкретний момент часу у необхідне місце вогнища пожежі.

Під терміном високоефективне слід розуміти гасіння, при якому вдається дієво зрошувати-охолоджувати місце, де здійснюється локалізація чи ліквідація надзвичайної ситуації, струменями із оптимальною дисперсністю розпилення при мінімальних енергозатратах та витраті речовини, і максимальній варійованості дальності її подачі.

Аналіз конструктивних рішень протипожежних машин і їхніх вузлів, задіяних у створенні вогнегасних потоків як безперервного, так і імпульсного типу, доцільно здійснювати на прикладі пожежної автоцистерни. Такий вид техніки призначений для транспортування особового складу, запасів вогнегасних засобів і пожежно-технічного обладнання до місця надзвичайної події, а також забезпечує подачу води й повітряно-механічної піни безпосередньо в зону горіння. Саме на її гідравлічній системі, яка відповідає за формування струменів із наперед визначеними параметрами, зручно розглянути основні особливості побудови та функціонування таких систем.

У конструкції пожежних автомобілів гідравлічна частина являє собою багаторівневу систему, призначену для перетворення механічної енергії силової установки у керований потік вогнегасної рідини. До її складу належать засоби створення та стабілізації робочого тиску, елементи регулювання параметрів подачі, допоміжні пристрої для модифікації структури потоку, а також трубопровідні й випускні компоненти, що забезпечують формування струменя на виході. Модулі, які забезпечують коливальний режим руху рідини, не є обов’язковими для стандартної конфігурації, однак за потреби можуть інтегруватися в систему з метою покращення характеристик розпилу. Кожна ланка цієї енергетичної схеми

супроводжується втратами, що в сукупності знижують корисну частку енергії, доступної для реалізації основного завдання – отримання високоефективного та керованого вогнегасного впливу. Враховуючи, що значна частина води під час гасіння не бере безпосередньої участі у припиненні горіння, а максимальний тепловідбір можливий лише за умови переходу рідини у парову фазу безпосередньо в зоні пожежі, доцільним є формування принципово іншого підходу до побудови систем пожежогасіння. Такий підхід має бути спрямований на оптимізацію передачі енергії від двигуна пожежного автомобіля до зони остаточного диспергування струменя за умов мінімальних початкових витрат і максимальної ексергетичної віддачі гідравлічної системи.

Розробка методів, що забезпечували б створення струменів із заданими характеристиками, може опиратися на застосування критеріїв ексергійної оптимізації проектування відповідного обладнання. Йдеться про використання напрацювань у галузі створення об’єктів нової техніки (методів, які ґрунтуються на використанні теорії систем, методів системного аналізу [365], теорії моделювання [366, 367], об‘єктно-орієнтованого або системного проектування [368]) із застосуванням їх ексергійного аналізу [369, 370]. Ексергійний аналіз найбільш корисний в тих випадках, коли на перший план виступають термічні процеси, однак, у випадку розгляду пожежогасіння як деякого процесу, його застосування вбачається так само показовим й доцільним.

Застосування категорії «прогнозування» по відношенню до гідравлічної системи формування струменів із заданими характеристиками пояснюється намаганням визначити заздалегідь можливі сценарії гідродинамічної поведінки вогнегасного струменя, тобто знаючи параметри створеної системи струминоутворення (наприклад, потужності насоса, довжини водопінних комунікацій, довжини рукавної лінії, особливостей конструкції ствола й насадки), можна говорити про прогнозні значення довжин гідродинамічної ділянки, суцільної частини усього струменя, форму

плями покриття поверхні, розподіл розмірів краплин тощо. Таким чином, для існуючої протипожежної техніки можна розраховувати параметри отриманих струменів, а для перспективної – формувати їх оптимальні значення.

7.2. Структура задачі створення систем пожежогасіння

Система цивільного захисту в Україні ґрунтується на підході, за яким ключовим показником діяльності оперативно-рятувальних підрозділів є їхня спроможність забезпечувати швидке та результативне реагування на надзвичайні події й аварії. Рівень готовності цих служб безпосередньо пов’язаний зі станом безпеки у сферах цивільного захисту, пожежної та техногенної безпеки, що охоплює організацію та контроль безпечної експлуатації виробничих процесів, об’єктів господарювання, будівель і споруд, виробничих підрозділів і приміщень, а також використання обладнання, технічних засобів і транспортної інфраструктури. Високий рівень пожежної безпеки має опиратися на розробку та використання ефективних механізмів, що дозволяли б у кожному конкретному випадку підбирати й застосовувати обладнання, що забезпечувало б ефективні методи попередження пожеж, боротьбу з ними та ліквідацію (мінімізацію негативних) наслідків.

Зроблено узагальнення відомих і отриманих у даному дослідженні результатів для прогнозування розрахунку системи струминоутворення. Перевага пропонованої схеми полягає в тому, що на відміну інших авторів, що розглядали окремо елементи струминоформувальних систем, у ній реалізовано узагальнення та об'єднання елементів, позв’язані залежності одних факторів з іншими (наприклад, потужність насоса, вид струминоформувального пристрою та середній розмір краплин в зоні розпилення струменя). Під терміном прогнозування розрахунку системи розуміється прогнозування поведінки (гідродинаміки) струменя, тобто знаючи параметри реальної системи струминоутворення, як-то потужності

насоса N, довжини водопінних комунікацій l_1, довжини рукавної лінії l_2, особливостей конструкції ствола й насадки тощо, можна говорити про прогнозні значення довжин гідродинамічної ділянки, суцільної частини й усього струменя, форму плями покриття поверхні, розмір краплин.

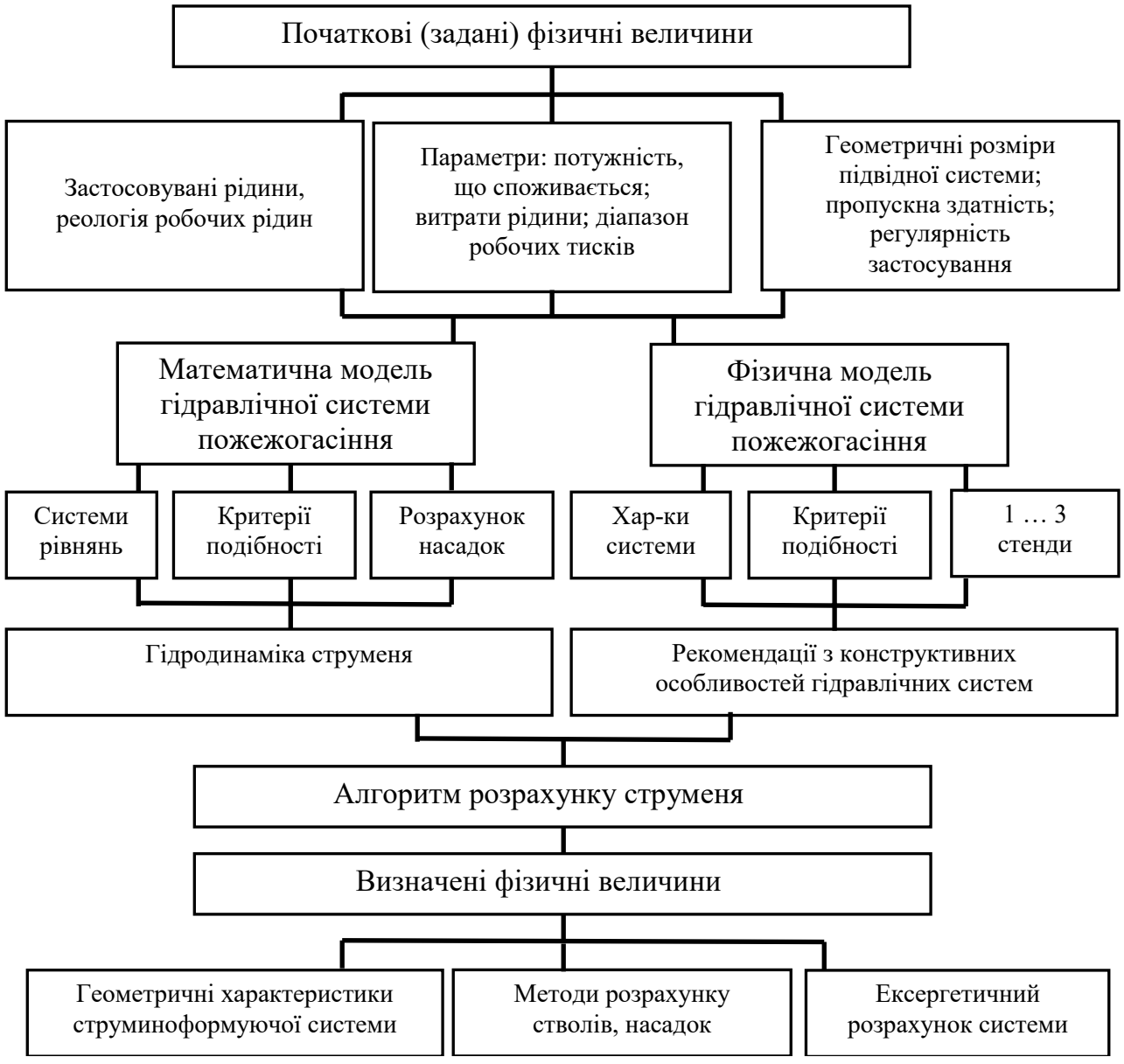


Рис. 7.1 – Структура задачі створення гідравлічної системи пожежогасіння

Фактично, можна для існуючої техніки розраховувати параметри отриманих струменів, а для перспективної (проектованої) формувати їх оптимальні значення. При цьому відбувається системне рішення задачі

струминоформування (рис. 6.2), орієнтоване на підвищення економічної ефективності гідродинаміного рішення на даному етапі й забезпечення оптимального вибору струминоформувальних пристроїв за геометричними ознаками у перспективі.

Таким чином, наприклад, методика розрахунку стаціонарної чи мобільної установки пожежогасіння полягає у тому, щоб дотримуючись начальних параметрів (ємність бака, потужність насосу, що використовується у системі, пріоритетна схема доставки рідини до ствола тощо), отримується потрібний тиск на вході струминоформувального пристрою, забезпечується необхідний рівень витрат рідини з метою одержання струменя із потрібними характеристиками (дальність подачі, форма плями розпилення, дисперсність, довжина початкової ділянки).

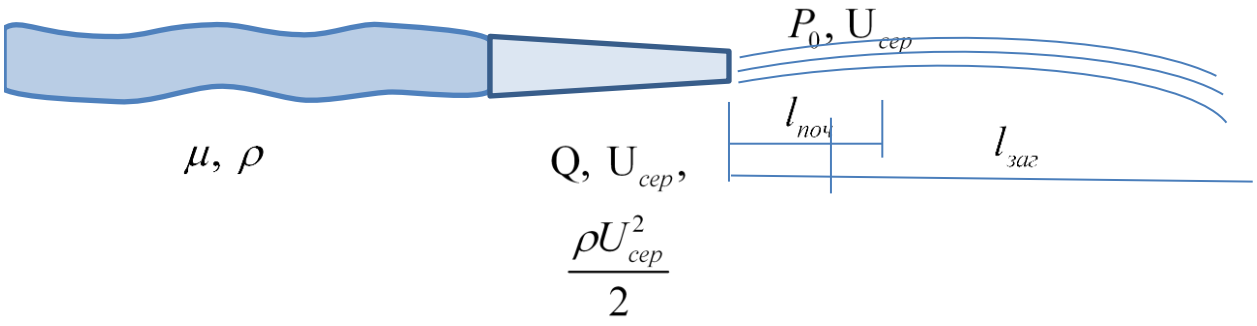


Рис. 7.2 – Основні характеристики струминоформування

Знаючи значення середньої швидкості рідини на виході зі ствола $U_{\text{сер}}$ та тиск до виходу зі ствола P_0 , ми отримуємо характеристики потоку рідини (епюри швидкостей) (рис. 7.3) й пропонуємо спосіб розрахунку початкової ділянки струменя та повязаних із нею висоти, дальності струменя й інших його характеристик.

Для випадку застосування моделі (рис. 7.1) можна використати рівняння руху в'язкої (аномально в'язкої) рідини [196, 371, 372], записати їх для випадку зі змінними по довжині витратами [373, 374] і, базуючись на пропозиціях Б. Н. Сіова, дати опис руху рідини у насадках. Фактично така

математична модель може описувати особливості гідродинамічної початкової ділянки у різного типу насадках.

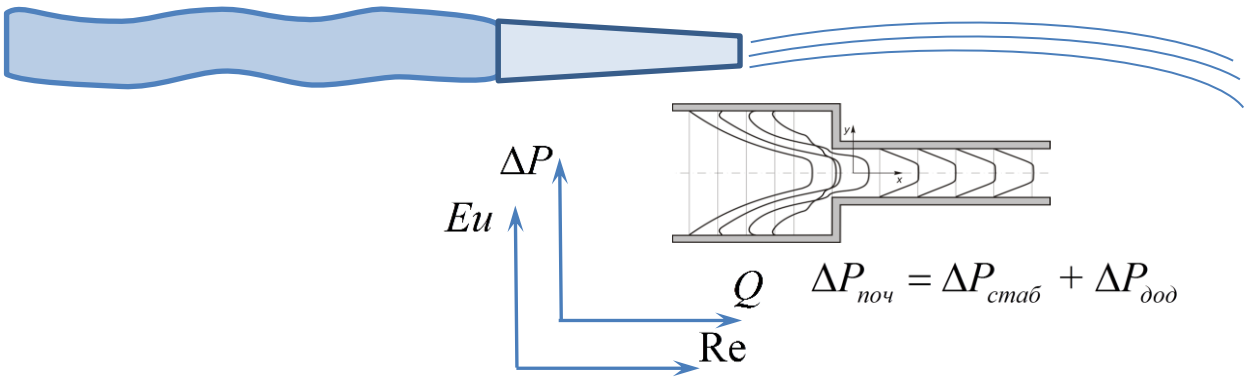


Рис. 7.3 – Врахування енергетичних витрат для систем пожежогасіння

Суттю математичної моделі є існування стабілізованої течії в трубопроводах, яке визначається відомими формулами, наприклад, формулою Дарсі-Вейсбаха. Проте «звичайна стабілізована течія» характеризується проявом лише сили в'язкого тертя, а у нашому випадку додатково існують сили інерції від конвективного прискорення. Таким чином, рівняння, що описують зміну тиску на початковій ділянці будуть характеризуватися рівнянням $\Delta P_{поч} = \Delta P_{стаб} + \Delta P_{дод}$, тобто математична модель є по суті відображенням підходу з позицій гідродинамічної початкової ділянки до опису процесів у пожежних стволах, насадках та безпосередньо у струменях. З огляду на сказане, можна стверджувати, що при певних початкових умовах, які є наперед відомими, оскільки є відомими технічні характеристики наявної протипожежної техніки та пожежного обладнання, можна отримати струмені з конкретними параметрами, і саме вони сприятимуть розв'язанню конкретних задач пожежогасіння. Важливим є те, що в даному випадку робиться спроба узагальнення знань у області струминоформування як для мобільних систем пожежогасіння, кінцевим елементом яких є пожежний ствол, так і для стаціонарних систем

автоматичного пожежогасіння [340, 375, 376] при змінному рівні витрат рідини в трубопроводах.

Технології пожежогасіння, що базуються на застосуванні систем автоматичного водяного пожежогасіння, мають забезпечувати необхідні витрати водної вогнегасної речовини. Для нестабілізованого руху рідини у магістральній частині трубопроводу властиві втрати енергії (на подолання гідравлічного опору), що призводять до нерівномірності витрати на кінцевих елементах системи автоматичного водяного пожежогасіння. Вирішенням при розрахунку у такому разі може стати врахування дії сил інерції від конвективного прискорення, а використання спеціальних добавок до водної вогнегасної речовини може суттєво вплинути на продуктивність усієї системи автоматичного водяного пожежогасіння. Для досліджених типів речовин встановлено, що введення 0,010…0,054% поверхнево-активних добавок, дозволяє збільшити витрати рідини на 9…24% не змінюючи при цьому режими й параметри роботи системи. При подальшому зростанні відсоткового значення поверхнево-активних добавок суттєвого зростання продуктивності системи не спостерігалося. Для досліджуваної схеми максимальне зростання витрати (11,5 %) зафіксоване при введенні 0,021% піноутворювача (Польща).

Проводячи аналіз струминоформування для мобільних і стаціонарних систем автоматичного пожежогасіння, виникає і потребує розв’язку задача врахування рівня енергетичних витрат на забезпечення процесу формування струменя із потрібними параметрами (рис. 4.24). Розв’язання зазначеної задачі дозволяє суттєво збільшити ефективність систем пожежогасіння, при тому, що вкрай проблемним на даний час є врахування енергетичних витрат для мобільних систем. Для випадку стаціонарних систем реалізація схеми, поданої на рис. 7.1, у спрощеному вигляді може бути описана наступним чином. Рідина, що протікає у трубопроводі, характеризується набором величин (в’язкість μ, густина ρ тощо). Для того, щоб визначити втрати тиску ΔP у трубопроводі, потрібно знати вказані величини μ, ρ, середню швидкість

течії) $U_{\text{сер}}$, геометричні розміри та особливості трубопроводу. За таких умов можна було б застосувати відому формулу Дарсі-Вейсбаха [282, 377] $\Delta P = \lambda \cdot {}^{l}/_{D} \cdot \rho \, {U_{\text{сер}}}^{2}/_{2}$, де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя по довжині l, а D – гідравлічний діаметр. Проте коефіцієнт гідравлічного тертя λ є невідомим, він залежить від числа Рейнольдса Re, шорсткості та умов протікання рідини. Лише після їх визначення можна буде застосувати формулу Дарсі-Вейсбаха й перейти до оцінки ефективності функціонування систем пожежогасіння із позицій енерговитратності.

Даний підхід може бути реалізована за умови використання відомих формул, що характеризують гідродинамічні особливості плину рідини в трубах, пожежних стволах, насадках, а також формування струменя тощо. З цією метою були створені алгоритми та програми, такі як Tube1.1© та Tube2.1©, що дали змогу візуалізувати гідродинамічні процеси струминоформування на виході зі стволів та насадок. Але основними є дві складові схеми на рис. 7.1: алгоритм розрахунку струменя й розрахунку насадки (гідродинаміки плину рідини); алгоритм розрахунку всієї системи подачі та формування струменя (двигун – коробка відбору потужності – насос – трубопровід – ресивер – імпульсний пристрій – ствол – насадка).

Розрахунок насадок може бути уточнений, скажімо, розрахунок раціонального типу струминоформувального пристрою, обраний з плоским, круглим отвором, з елементами забезпечення пульсацій потоку тощо. Таким чином, елементи схеми рис. 7.1 є в інформаційному сенсі деревами формування результату (деревами ухвалення рішень). Важливо, що в алгоритмі розрахунку всієї системи подачі та формування струменя має бути включений ексергетичний аналіз. У деякому сенсі він є критерієм ефективності усієї системи з позицій енерговитрат.

Для прикладу розглянемо частину схеми рис. 7.1 у випадку, коли раціональним струминоформувальним отвором був обраний плоский отвір. Вихідними даними для гідродинамічного розрахунку щілинної насадки, що

може бути уобраною у такому випадку, є геометричні параметри пожежного ствола, величина тиску P, витрати Q у вхідному перетині. За таких умов можна, враховуючи технічні умови формування струменя, здійснити розрахунок оптимальної геометрії внутрішнього струминоформувального каналу (§3.2.3, §3.2.5). Як показали дослідження, проведені в НУЦЗ України, використання насадок, проектування яких здійснювалося без детального розрахунку форми внутрішнього каналу, призводить до суттєвого зниження ефективності отриманих струменів. Водяні завіси містили фрагменти «склеювання» та «потовщення» (рис. 3.10). Таким чином, деякі зони за захисною завісою мали значно гірший рівень захисту від теплового випромінювання вогнища пожежі, тобто не реалізовувався принцип рівномірності захисту завіси. Відповідно до схеми розрахунку щілинної насадки епюра швидкостей на її вході має бути наближена до прямокутної форми, що відповідає максимальній кінетичній енергії. У зв'язку із проявом у формованому водяному потоці сил в'язкого тертя та створення граничного прошарку, поле швидкостей буде деформуватись. Цей процес буде характерним для усієї початкової ділянки $Z_{\text{пд}}$. Визначення довжини такої ділянки можна виконати у відповідності до досліджень Яхна О.М., Мірзоєва Р. Г., Кугушева І. Д., Брагінського В. О. [254, 300]. За межами $Z_{\text{пд}}$ плин буде стабілізованим. Знаючи тиск P_0 на вході в щілину і користуючись відповідними залежностями, можна визначити втрати енергії на початковій ділянці. Сумарні втрати енергії в щілині складають $\Delta\text{P} = \Delta\text{P}_{\text{пд}} + \Delta\text{P}_{\text{ст}} = \Delta\text{P}_{\text{пд}} + \lambda\frac{Z_{\text{ст}}}{\text{H}}\frac{U_{\text{ср}}^2}{2}$,

де $\Delta\text{P}_{\text{пд}}$ – перепад тиску на початковій ділянці;

$\Delta\text{P}_{\text{ст}}$ – на ділянці зі стабілізованою течією.

Важливою конструктивною умовою розрахунку щілинної насадки є забезпечення нерівності $Z_{\text{пд}} < l_{\text{сер}}$, де $l_{\text{сер}}$ – середнє значення довжини щілини, $Z_{\text{пд}}$ – початкова ділянка на вході у насадку, окрім того, довжина щілини насадки зазвичай менше $Z_{\text{пд}}$.

Наступним прикладом може бути розрахунок пожежних стволів та насадок. Із аналізу гідравлічного опору пожежних стволів [87, 378, 379], запропоновані до використання основні рівняння для визначення параметрів насадок

$$U_H = \varphi_H \sqrt{2gH_H} \tag{7.1}$$

$$q_H = \mu_H \omega_H \sqrt{2gH_H} \tag{7.2}$$

$$\omega_c = \varepsilon_H \omega_H \tag{7.3}$$

$$\mu_H = \varepsilon_H \varphi_H \tag{7.4}$$

де U_H – швидкість витікання із насадки, м/с; φ_H – коефіцієнт швидкості насадки; H_H – напір на вході в насадку, м; q_H – витрата рідини із насадки, м^3/с; μ_H – коефіцієнт витрати насадки, м^3/с; ω_H – площа конічного перерізу насадки, м^2; ω_c – те ж саме струменя у стислому перерізі, м^2; ε_H – коефіцієнт стиснення.

Таблиця 7.1.

Значення коефіцієнтів $\xi_н, \varepsilon_н, \varphi_н, \mu_н$ [87]

Тип насадки	$\xi_н$ гідравлічний опір	ε_H коефіцієнт стиснення	φ_H коефіцієнт швидкості	μ_H коефіцієнт витрати
конічна збіжна (13°)	0,09	0,98	0,96	0,94
коноїдальна	0,06	1,00	0,98	0,99

Таблиця 7.2.

Приріст гідравлічного опору пожежних стволів в абсолютних і відносних величинах [87]

Найменування ствола	$S_{абс} \cdot 10^{-6}$, с^2/м^5	ε_s, %
РСП–50	1,507	38
РСК–50	1,309	33
РС-50	0,196	7
РС–70	0,096	15
ПЛС–20	0,031	23

Вплив шорсткості на характер течії в насадках пожежних стволів можна зменшувати враховуючи дані графіків залежності коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса (рис. 3.15).

Збільшення гідравлічного опору пожежних стволів в абсолютних і відносних величинах наведено в табл. 7.2.

Далі на рис. 7.4 запропонована методика коригування витрат води на внутрішнє пожежогасіння з оптимізацією її на врахування гідравлічних втрат в пожежному стволі [87].

Фактично, пропонований розрахунок пожежних стволів та насадок був обраний з числа відомих способів визначення основних параметрів струминоформувальних пристроїв.

7.3. Методи визначення характеристик струминоформувальних пристроїв та приклади алгоритмів їх розрахунку

Т – висота приміщення, м; $Z_{\text{пк}}$ – висота положення клапана пожежного крана відносно підлоги, м; α – кут нахилу вектора $R_{\text{к}}$ до горизонту, град; β – емпіричний коефіцієнт; φ – емпіричний коефіцієнт; d – діаметр вихідного перерізу насадки, м; ω – площа вихідного перерізу насадки, м^2; ρ – густина рідини, кг/м^3; g – прискорення вільного падіння, м/с^2; А – питомий опір пожежного рукава, с^2/м^6; l – довжина пожежного рукава, м; $S_{\text{ств}}$ – опір пожежного ствола (табл. 3), с^2/м^5; Q – витрати пожежного ствола, м^3/с; $\Delta p_{\text{р}}$ – втрати тиску в рукавній лінії, МПа; $p_{\text{ств}}$ – те ж саме в пожежному стволі, МПа.

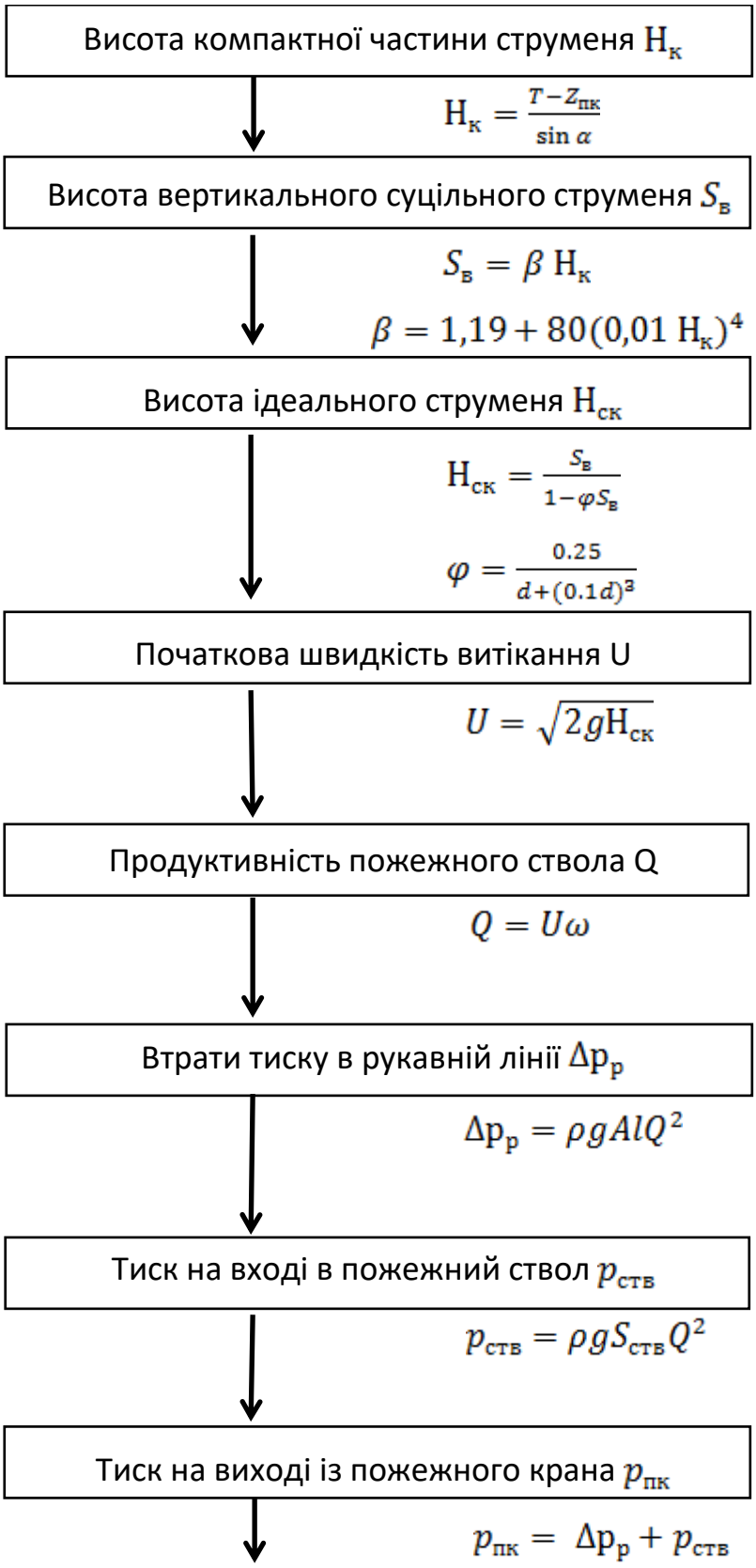


Рис. 7.4 – Приклад коригування витрат рідини на внутрішнє пожежогасіння [87]

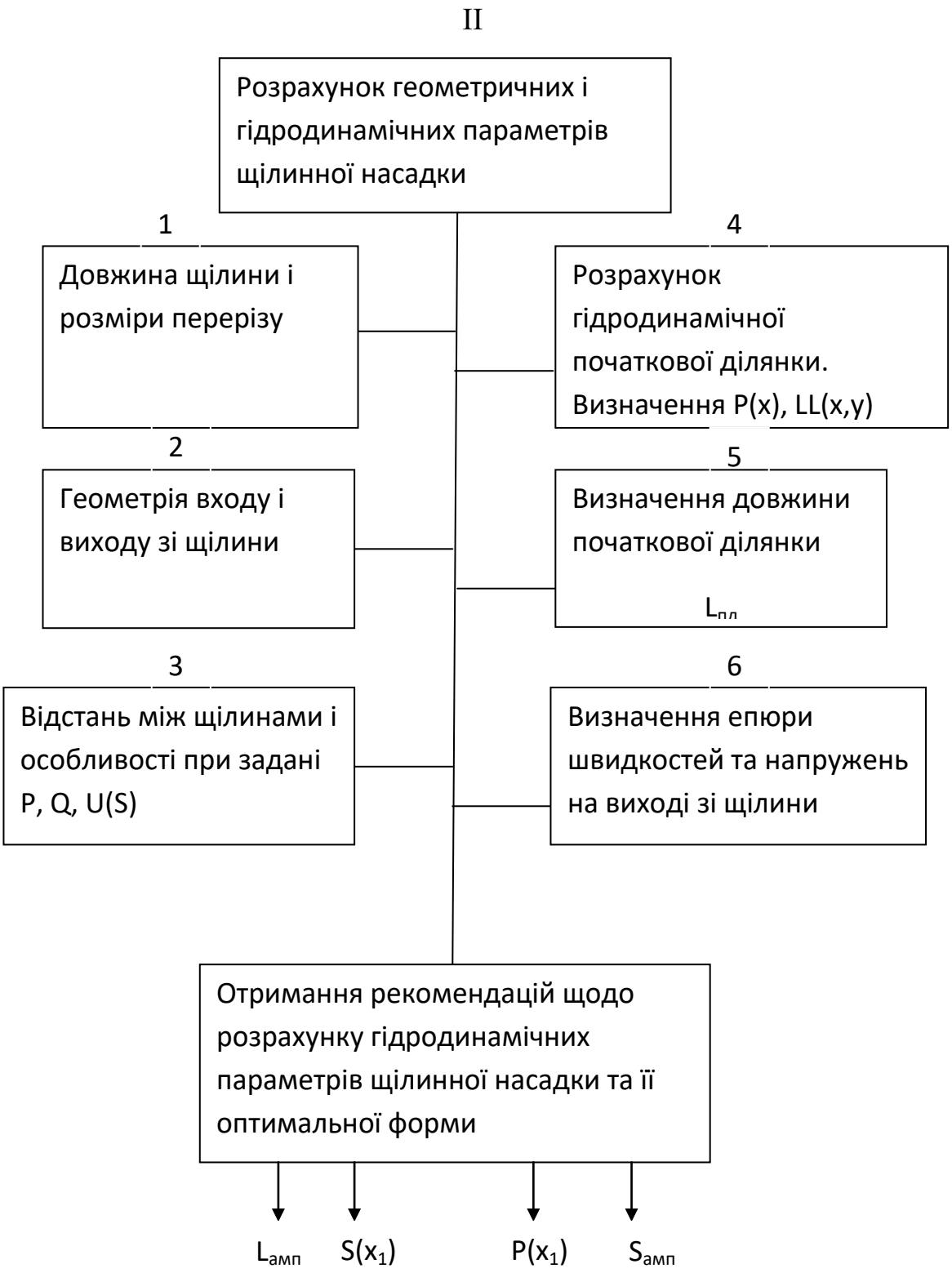


Рис. 7.5 – Розрахунок геометричних і гідродинамічних параметрів щілинної насадки



Рис. 7.6 – Гідродинамічний розрахунок плівкової течії вздовж нерухомої поверхні

Початковими даними для гідродинамічного розрахунку насадки, яка фактично виконує роль колектора, що забезпечує вирівнювання параметрів

потоку рідини за рахунок відносно великого поперечного перерізу, повинні бути його геометричні параметри, а також величина тиску P і витрати Q у вхідному перерізі. Разом з тим, при заданих P і Q, а також відомій кількості встановлених вздовж колектора щілинних каналів, можливий розрахунок форми колектора в залежності від заданих технічних умов (наприклад, лінійному, степеневому і т.д.). Дуже важливим в даній задачі є питання «геометрії входу» в щілинний канал.

Гідродинамічні дослідження даної задачі для початкових ділянок, приведених раніше, показують, що найбільш ефективними умовами входу потоку в канал, являється умова, коли вхідна частина каналу побудована за геометрією, близькою до лемніскати (в декартових координатах рівняння лемніскати має вигляд: $(x^2+y^2)^2-2a^2(x^2-a^2)=0$, а в полярних – відповідно $\rho^2-2a^2\cos 2\varphi=0$.)

На рис. 7.5 показана схема розрахунку щілинної насадки. При відповідному виконанні вхідної частини щілини, епюра швидкостей на вході може бути близькою до прямокутної. Далі, у зв'язку із проявом у потоці сил в'язкого тертя і утворенням граничного шару, поле швидкостей деформується. Деформація продовжується на ділянці з довжиною $Z_{\text{пд}}$. Визначення довжини такої ділянки можна виконати у відношенні з дослідженнями, представленими у главах 3 і 5. За межами цієї ділянки, течія стабілізована.

Знаючи тиск P_0 на вході в щілину і використавши відповідні залежності, можна визначити втрати енергії на початковій ділянці. Сумарні втрати енергії в щілині складають:

$$\Delta \mathrm{P} = \Delta \mathrm{P}_{\text{пд}} + \Delta \mathrm{P}_{\text{ст}} = \Delta \mathrm{P}_{\text{пд}} + \lambda \frac{Z_{\text{ст}}}{\mathrm{H}} \frac{U_{\text{ср}}^2}{2},$$

де $\Delta \mathrm{P}_{\text{пд}}$ – перепад тиску на початковій ділянці;

$\Delta \mathrm{P}_{\text{ст}}$ – на ділянці зі стабілізованою течією.

Зазвичай, довжина щілинної насадки значно менша $Z_{\text{пд}}$. Цим пояснюється зростаюче значення умов виходу зі щілини (епюра швидкостей, напружень).

Приблизно така ж схема розрахунку течії емульсії (дисперсної системи) по похилій поверхні щілинної насадки, представлена на рис. 7.6 (позначення як у §3.2.3–3.2.5). Найважливішими моментами являються наступні: визначення геометричних розмірів областей l_1, l_2, l_3, де проходить зміна напрямку потоку і перехід від напірного до безнапірного. На жаль, аналітичний розрахунок таких ділянок дуже складний. Проте, експериментальне моделювання процесу, що розглядається, дозволяє вважати, що довжина таких ділянок за відсутності будь-яких направляючих пристроїв у даній зоні щілинної насадки складає приблизно $Z_{\text{пд}}$ для плівкової течії.

Важливими висновками є те, що, по-перше, коефіцієнти стиснення, швидкості та витрат для типових насадок, що застосовуються при пожежогасінні (конічними), мають досить високі значення (табл. 7.1). Струмені, отримані цими насадками, володіють великою питомою кінетичною енергією внаслідок малої величини гідравлічних опорів насадки. Таким чином, визначальну роль відіграє профіль внутрішньої поверхні струминоформувального пристрою й на його виборі або розрахунку мають зосереджуватись основні зусилля при проектуванні та експлуатації протипожежного обладнання (рис. 7.1). По-друге, енергозатрати на отримання ефективних струменів передусім залежать від втрат системи генерування струменів до пожежного ствола та насадки, оскільки складову енерговитрат на струминоформування безпосередньо в стволі можемо вважати несуттєвою.

Наведемо приклад врахування балістики крапель розпилених вогнегасних рідин із врахуванням їх випаровування [349]. Зазначене перед усім стосується проектування й застосування установок імпульсного пожежогасіння. Оскільки диспергування рідин суттєво погіршує балістичні властивості струменя, що зумовлено як зростанням опору газового середовища рухові, так і випаровуванням дрібних крапель під час польоту у просторі з високою температурою. Таким чином, при проектуванні й

використанні імпульсних установок пожежогасіння слід знати закони розпилення рідини та закономірності руху крапель, що випаровуються, й «керованість» струменя підвищить ефективність установок при гасінні пожеж.

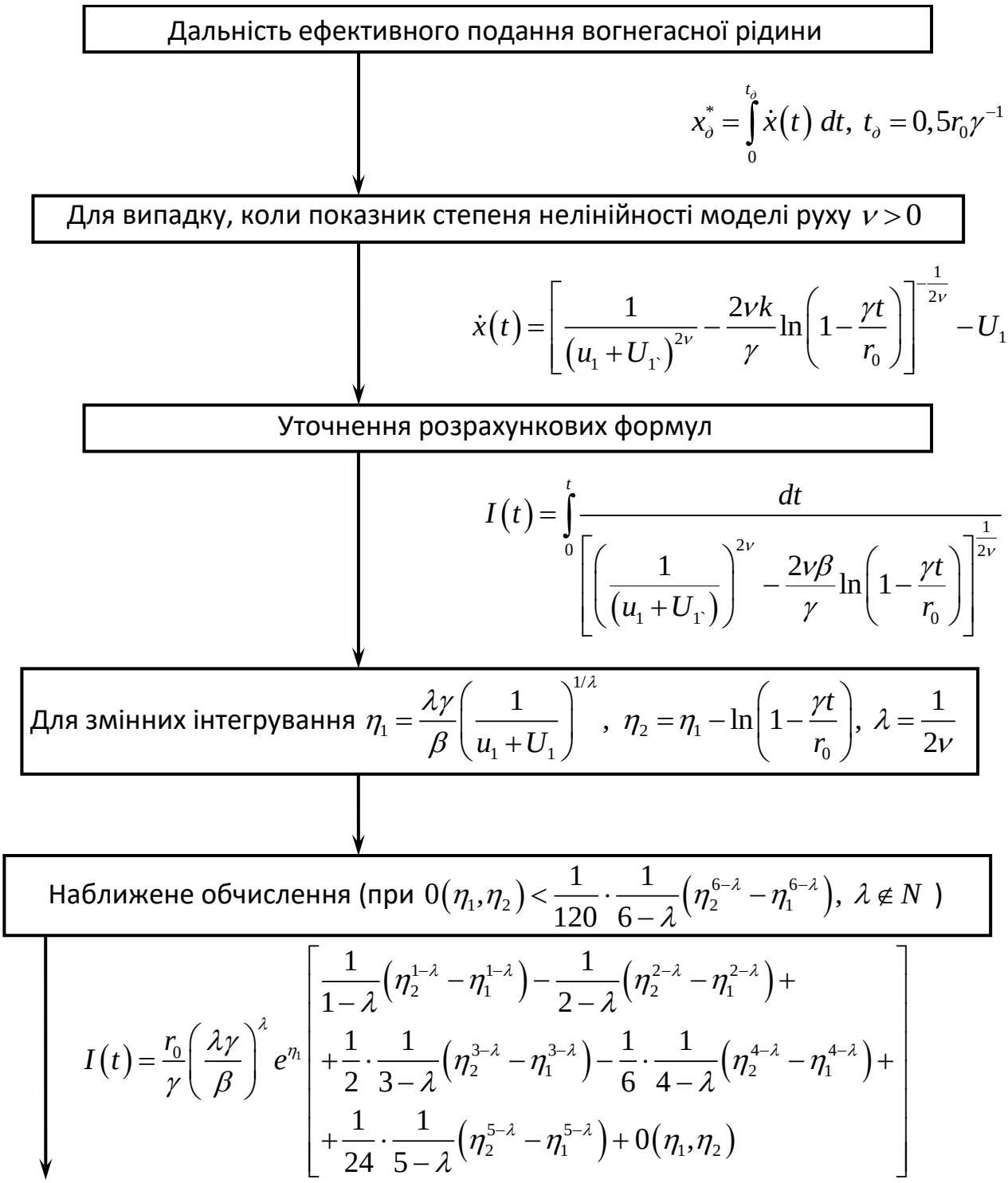


Рис. 7.7 – Дальність ефективного подання вогнегасної рідини [349]

Практичний інтерес для пожежогасіння має обчислення гранично допустимої дальності подавання крапель вогнегасних речовин [349], тобто відстані $\max L$, на якій вихідний радіус r_0 краплі зменшується вдвічі. Важливо, що дослідження показали, що гранично допустима дальність польоту вогнегасних речовин в умовах випаровування нелінійно залежить від початкової швидкості витікання краплі u_0. Вибиралися кути витікання рідини $\theta_0 \leq 30^0$, що забезпечують максимальну подачу рідини.

Оскільки установки імпульсного пожежогасіння забезпечують $r_0 \geq 120$ м/с, а вага частинки мала, то час польоту t є невеликим й, відповідно, сила гравітації на початковому етапі руху краплини несуттєво викривляє її траєкторію. Врахування вищезазначеного покладено в основу розрахунку балістики крапель розпилених вогнегасних рідин.

Реалізація відомих розрахункових методів щодо визначення товщини та швидкості стікання охолоджувальної плівки. Зазначимо, що ми не проводимо оцінку рівня конвективної тепловіддачі у водну плівку при охолодженні нагрітого резервуара пожежними стволами. Такі дослідження, наприклад, проводилися раніше О. Є. Басмановим та А. О. Михайлюком [380, 381] й можуть у по подальшому бути використані для створення узагальненої методики охолодження резервуарів, що включатиме як питання створення охолоджувальних плівок, так і оцінку ефективності їх застосування.

Фактично, як один із багатьох варіантів розв’язування задачі побудови системи охолодження резервуарів, а саме за рахунок використання стікаючих потоків, можна застосувати підхід «ціледосягнення»↔«цілеспрямування» (§6.1, рис. 6.2), поданої на рис. 7.8.

В рамках даної роботи виконання п.4 рис. 7.8 може бути забезпечене реалізацією відомих розрахункових методів щодо визначення товщини та швидкості стікання охолоджувальної плівки.

Для цього можна скористатися залежностями з табл. 7.3. Підходи різних авторів до розрахунку товщини та швидкості плівки є схожими, різняться областю застосування та значенням характеристичного параметру товщини плівки Нуссельта N.



Рис.7.8 – Етапи вибору насадок для охолодження резервуара

На рис. 7.9. подано розрахунок параметра Нусельта для товщини плівки. У залежності від області застосування запропонованих різними авторами розрахункових залежностей параметр Нусельта для товщини плівки для однакових значень числа Рейнольса дещо різниться. Горизонтальна координатна вісь подана з коефіцієнтом масштабування 2.

Таблиця 7.3

Визначення товщини та швидкості плівки

Автор	Середня швидкість плівки ω (u)	Середня товщина плівки μ (h)	Параметр товщини плівки N	Застосування
В. Нуссельт	$\left(\frac{g\nu}{48}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{\frac{2}{3}}$	$\left(\frac{3\nu^2}{4g}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{\frac{1}{3}}$	$0.9084\,\mathrm{Re}^{\frac{1}{3}}$	не вказано
П.Л. Капіца	$1.0753\left(\frac{g\nu}{48}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{\frac{2}{3}}$	$0.93\left(\frac{3\nu^2}{4g}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{\frac{1}{3}}$	$0.8448\,\mathrm{Re}^{\frac{1}{3}}$	не вказано
В. Бретц	$21.1420\left(\frac{g\nu}{48}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{\frac{1}{3}}$	$0.0473\left(\frac{3\nu^2}{4g}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{\frac{2}{3}}$	$0.0430\,\mathrm{Re}^{\frac{2}{3}}$	$\mathrm{Re} > 2360$
Г. Брауер	$4.3725\left(\frac{g\nu}{48}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{\frac{7}{15}}$	$0.2287\left(\frac{3\nu^2}{4g}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{\frac{8}{15}}$	$0.2077\,\mathrm{Re}^{\frac{8}{15}}$	$\mathrm{Re} > 1600$
Л.Я. Живайкін	$6.4433\left(\frac{g\nu}{48}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{\frac{5}{12}}$	$0.1552\left(\frac{3\nu^2}{4g}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{\frac{7}{12}}$	$0.1410\,\mathrm{Re}^{\frac{7}{12}}$	$\mathrm{Re} > 4000$
К. Файнд	$3.4141\left(\frac{g\nu}{48}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{\frac{1}{2}}$	$0.2929\left(\frac{3\nu^2}{4g}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{\frac{1}{2}}$	$0.2661\,\mathrm{Re}^{\frac{1}{2}}$	$\mathrm{Re} > 1600$
Г.Д. Фулфорд	$1.1322\left(\frac{g\nu}{48}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{0.663}$	$0.8832\left(\frac{3\nu^2}{4g}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{0.337}$	$0.8023\,\mathrm{Re}^{0.337}$	$120 < \mathrm{Re} < 1200$
Є.Г. Воронцов	$6.8965\left(\frac{g\nu}{48}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{0.4}$	$0.145\left(\frac{3\nu^2}{4g}\right)^{\frac{1}{3}}\mathrm{Re}^{0.6}$	$0.1317\,\mathrm{Re}^{0.6}$	$\mathrm{Re} > 1600$

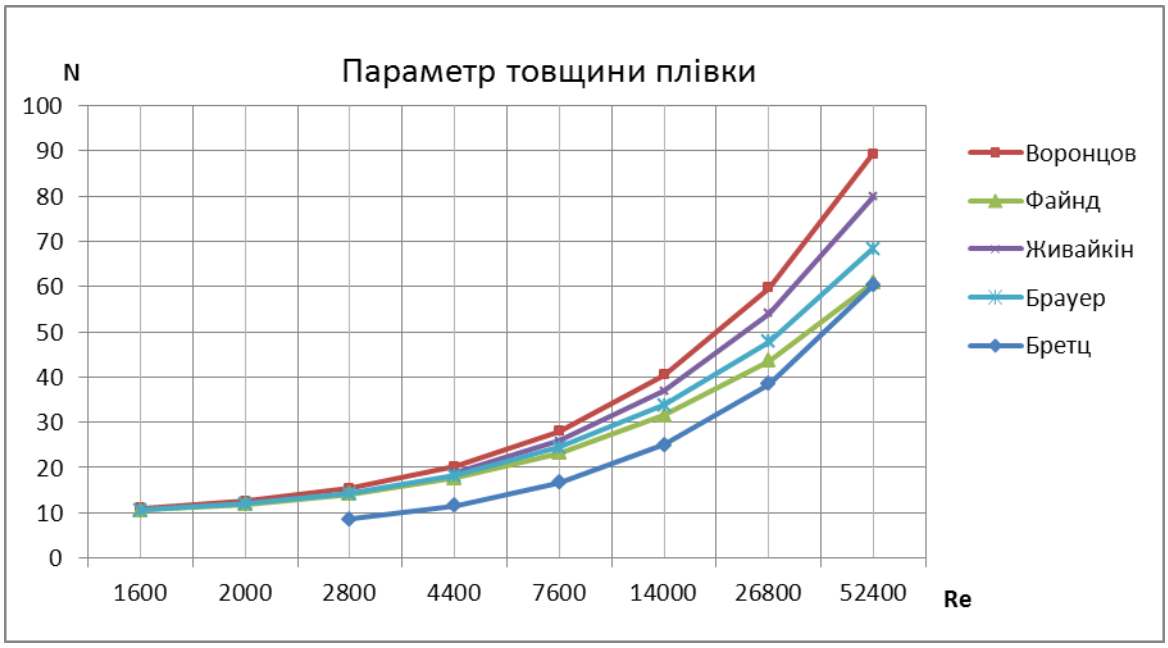


Рис.7.9 – Параметр Нуссельта для товщини плівки

Для насадки з вихідною щілиною, подібною до щілинної насадки (0,3х14 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.

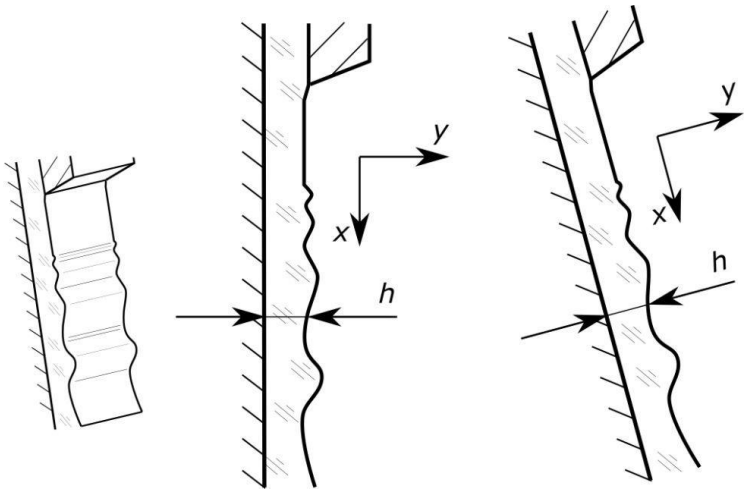


Рис.7.10 – Картина стікання плівки по вертикальній та похилій поверхнях

Як результат сформований струмінь якийсь час не розпадається. Параметри такої початкової ділянки струменя можуть бути використані в якості його характеристики, була експериментально встановлена залежність для низки струменів між довжиною початкової ділянки й дальністю генерування струменя.

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 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 $\rho_{пов}$ /$\rho_р$ 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 $1{,}019\ldots1{,}033\cdot10^{6}$ м^2/с при температурі 20 ºС. 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Статистика пожеж та їх наслідків в Україні за 2013–2016 роки: Статистичний збірник аналітичних матеріалів. За загальною редакцією В. С. Кропивницького – Київ: УкрНДІЦЗ, 2018. – 100 с.

2. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2017 року – Київ: Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, 2018. – 32 с.

3. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2018 року – Київ: Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, 2019. – 44 с.

4. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2019 року – Київ: Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, 2020. – 56 с.

5. Аналітичні довідки про пожежі та їх наслідки в Україні 2020–2024 рр. [Електронний ресурс] // Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України.

6. ДСТУ 2272:2006 ССБП. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять. – Чинний від 01. 07. 2007. – Київ: Держспоживстандарт України, 2006. – 28 с.

7. Постанова Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2015 р. № 1052 "Про затвердження Положення про Державну службу України з надзвичайних ситуацій".

8. Кодекс цивільного захисту України: редакція від 12.09.2025 / Верховна Рада України. – Офіц. вид. – Київ: Парлам. вид-во, 2012, [Електронний ресурс] // Верховна Рада України: [сайт].

9. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні 2024 рр. [Електронний ресурс] // Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України.

10. Порядок класифікації надзвичайних ситуацій за їх рівнями. постанова Кабінету Міністрів України від 24 березня 2004 р. № 368. Редакція від 31.12.2021.

11. Fredericks, A. (2000). Little drops of water: 50 years later, part 2. Fire Engineering.

12. Zalok, E. (2011). Validation of methodologies to determine fire load for use in structural fire protection (pp. 1–65).

13. Thauvoye, C., Zhao, B., Klein, J., & Fontana, M. (2008). Fire load survey and statistical analysis. Fire Safety Science, 9, 991–1002.

14. Hurley, M. J., et al. (2016). SFPE handbook of fire protection engineering (5th ed., Vol. 3). Springer.

15. O’Connor, D. J. (2017). Guide to human behavior in fire: Engineering guide (2nd ed.).

16. Шналь Т. М. Характеристика моделей розвитку пожеж / Т. М. Шналь, І. П. Синенько, М. І. Стасюк // Вісник Нац. університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 697. – С. 252–256.

17. Гуліда Е. М. Вплив різних видів пожежного навантаження на димовиділення та на пониження концентрації кисню при пожежі в закритому приміщенні. / Е. М. Гуліда. // Пожежна безпека № 24, 2014. – С. 65–73.

18. Гуліда Е. М. Забезпечення пожежної безпеки та ліквідація пожеж на деревообробних підприємствах: монографія. / Е. М. Гуліда, О. М. Коваль. – Львів: ПАІС, 2017. – 272 с.

19. ДСТУ 2273:2006 Протипожежна техніка. Терміни та визначення основних понять – Чинний від 01. 04. 2007. – Київ: Держспоживстандарт України, 2006. – 44 с. – (Національний стандарт України).

20. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. загальні положення – Чинний від 01.01.2020. – Київ: Держспоживстандарт України, 2020. – 84 с. – (Національний стандарт України).

21. Wickström, U. (2016). Temperature calculation in fire safety engineering. Springer.

22. Шкарабура М. Г. Вступ до гідроструминних технологій / Черкаський ін-т пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля. – Чернігів: РВК Деснянська правда, 2006. – 191с.: рис., табл. – Бібліогр.: в кінці розд. – ISBN 966–502–290–3.

23. Фізико-хімічні процеси розвитку та припинення горіння: навч. посіб. В. К. Костенко, В. М. Покалюк, А. О. Майборода, О. М. Нуянзін, А. А. Нестеренко, Ю. П. Ненько. – Харків: Третяков О. М., 2020. – 218 с.

24. De Sanctis, G., Kohler, J., & Fontana, M. (2013). On the use of fire brigade statistics for structural fire safety engineering. In Proceedings of the International Conference: Application of Structural Fire Engineering (pp. 89–95). Prague, Czech Republic.

25. Сенчихін Ю. М., Дерев’янко І. Г. Обґрунтування етапів розвитку пожежі. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». Черкаси. – 2016. – С. 112–114.

26. Методика розрахунку сил і засобів, необхідних для гасіння пожеж у будівлях і на територіях різного призначення. Наказ МНС України від 16.12.2011 р. № 1341.

27. Сіов Б. М. Витікання рідини через насадки в середовища з протитиском / Б. М. Сіов. – Машинобудування, 1968. – 140 с.

28. Яхно О. М. Технічна гідродинаміка та гідродинамічна теорія змащування: навч. посіб. для вищих навч. закладів / О. М. Яхно, В. М. Матієга, С. І. Одайський. Чернівці: Золоті литаври, 2010. – 335 с.

29. Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка [Текст]: підручник / О. М. Яхно, О. В. Узунов, О. Ф. Луговський, В. А. Ковальов, А. В. Мовчанюк, І. В. Коц, О. П. Губарев; [за ред. О. М. Яхно]. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 711 с.

30. Лойцянський Л. Г. Механіка рідини і газу. Дрофа, 2003. 846 с. ISBN 5-7107-6327-6.

31. Дрейцер Г. А., Марковський П. М. Про результати розрахунково-графічних оцінок впливу змінної витрати на турбулентну структуру потоку в трубі // Теплообмін між потоками і поверхнями, 1980. С. 25–29.

32. Liu, Y. C., Jiang, J. C., & Huang, A. C. (2023). Experimental study on extinguishing oil fire by water mist with polymer composite additives. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 148, 4811–4822.

33. Нижник В.В., Волошинець В.А., Нижник Т.Ю. Колоїдна хімія з елементами нанохімії. К.: Фітосоціоцентр, 2012. – 506 с. – ISBN: 978-966-306-168-8.

34. Exerowa, D., Gochev, G., Platikanov, D., Liggieri, L., & Miller, R. (2018). Foam films and foams: Fundamentals and applications. CRC Press.

35. Balanyuk, V., Myroshkin, V., Kopystinsky, Y., Hirskyi, O., & Gerasimiuk, O. (2022). Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин. Пожежна безпека, 41, 12-19.

36. Aveyard, B. (2019). Adsorption of surfactants at liquid interfaces: Thermodynamics. In Surfactants: In solution, at interfaces and in colloidal dispersions. Oxford University Press.

37. Стрельцова О. О. Поверхнево-активні речовини. Властивості та використання. ОНУ імені І.І. Мечникова. Хімія. 2013. – 40 с.

38. Стрельцова О.О. Фізико-хімічні основи процесу флотаційного виділення іоногенних поверхнево-активних речовин із водних розчинів та стічних вод. – Одеса: “Астропринт”, 1997. – 140 с.

39. Шкарабура М. Г. Реологічні особливості розчинів з поверхнево-активними речовинами, що використовуються для ліквідації горіння / М. Г. Шкарабура, С. В. Стась, Д. М. Деревинський // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. – 2004. – №45. – С. 152–154.

40. ДСТУ 3789:2015 Пожежна безпека. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробування; Введ. 22.06. 2015 р. з поправками від 24.02.2016. – К.: Держстандарт України. – 2015. – 18 с.

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

42. Огурцов С. Ю., Стилик І. Г., Антонов А. В. Аналіз методів випробувань вогнегасних порошків з визначення їх вогнегасної здатності// Науковий вісник УкрНДІПБ. – К.: 2013. – № 1(27). – С. 86–92.

43. Жартовський В. М., Откідач М. Я., Цапко Ю. В., Тропінов О. Г. Дослідження з визначення вогнегасної ефективності сумішей інгібіторів горіння та інертних розріджувачів. Науковий вісник, 2003, №2. С. 5–10.

44. Антонов А. В. Вогнегасні речовини: Навчальний посібник / А. В. Антонов, В. О. Боровіков, В. П. Орел, В. М. Жартовський, В. В. Ковалишин – К.: Пожінформтехніка, 2004. – 176 с.

45. Білкун Д. Г. Пожежна безпека – 2011: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції, Харків: НУЦЗ України, 2011. – 372 с.

46. Borovykov, V., Slutska, O., Skorobahatko, T., Voytovych, D., & Sukach, R. (2023). Розроблення та застосування вітчизняної нормативної бази щодо оцінювання якості піноутворювачів для гасіння пожеж на перехідний період. Пожежна безпека, 42, 5-15.

47. Voitovych, T., Kovalyshyn, V., Voitovych, O., & Kaluzhniak, I. (2025). Огляд сучасних досліджень корозійної дії піноутворювачів та їх робочих розчинів на елементи систем пожежогасіння. Пожежна безпека, 46, 45-52.

48. Войтович Т. М., Ковалишин В. В., Кошеленко В. В. Дослідження впливу інгібіторів корозії на корозійну активність робочих розчинів піноутворювачів. Пожежна безпека. 2017. № 30. С. 16–21.

49. Stylyk, I. G., Benedyuk, V. S., Prysyazhnuk, V. V., & Osadchuk, M. V. (2019). Проведення випробувань піноутворювачів загального призначення для гасіння пожеж. Scientific Bulletin of UNFU, 29(5), 120-122.

50. Kovalyshyn, V. V., Velykyi, N. R., Kovalyshyn, V. V., Lyn, A. S., Pastukhov, P. V., & Velykyi, A. Y. (2024). Дослідження параметрів компресійної піни при подаванні «підшаровим» способом. Пожежна безпека, 45, 10-17.

51. Білошицький М. В. Вплив співвідношень компонентів на вогнегасну здатність вогнегасних порошків / М. В. Білошицький // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2007. – №1 (15). – С. 107 – 114.

52. Вогнегасні речовини. / Антонов А. В., Боровиков В. О., Орел В. П., Жартовський В. М., Ковалишин В. В. // Посібник. – Київ: Пожінформтехніка, 2004. – 176.

53. an, B., Shao, D., Sun, L., Fu, J., He, L., Liu, T., Peng, M., & Zhu, G. (2025). Experimental and simulation study of fluorine-free firefighting foam

reinforced with aerogel particles and polymers. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 708.

54. Ateş, A., Qiao, R., & Lattimer, B. Y. (2025). Fuel resistance of firefighting surfactant foam formulations. Fire, 8(2), 44.

55. Islam, R., & Lattimer, B. Y. (2024). Understanding the impact of fuel on surfactant microstructure of firefighting foam. Fire Technology, 60, 3413–3441.

56. Hinnant, K. M., Conroy, M. W., & Ananth, R. (2017). Influence of fuel on foam degradation for fluorinated and fluorine-free foams. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 522, 1–17.

57. Li, Z., Zhu, H., Qiu, F., Zhao, J., & Tian, C. (2023). Experiment study on the effectiveness of various and mixed kinds of low expansion foam of 120# gasoline pool fire suppression. Fire, 6(3), 121.

58. Osei-Bonsu, K., Shokri, N., & Grassia, P. (2015). Foam stability in the presence and absence of hydrocarbons: From bubble- to bulk-scale. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 481, 514–526.

59. 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.; 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; 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.

60. 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.

61. Stas, S., Kolesnikov, D., Bychenko, A., & Borsuk, O. (2025). 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, Vol. 2, No. 10 (134). P. 53–61.

62. Ландау Л. Д. До проблеми турбулентності / Л. Д. Ландау // – Т. 44, 1944. – С. 339.

63. Ландау Л. Д., Ліфшиц Є. М. Теоретична фізика. У 10 томах. Том 6. Гідродинаміка / Л. Д. Ландау, Є. М. Ліфшиц. – Наука, 1986. – 512 с.

64. Ван-Дайк, М. Альбом течій рідини та газу / М. Ван-Дайк. – Видавництво «Мир», 1986. – 184 с.

65. Кулінченко, В. Р. Гідродинаміка: навч. посіб. / В. Р. Кулінченко. – К.: НМК ВО, 1992. - 272 с.

66. Струтинський, С. В. Основи гідравліки [Електронний ресурс]. – Електронні текстові дані. – Київ: НТУУ «КПІ», 2012. – Назва з екрана.

67. Башта, Т. М. Машинобудівна гідравліка: довідник / Т. М. Башта. – 1963. – 696 с.

68. Руденко, Т. В. Практикум з гідравліки [Текст]: навч. посіб. / Т. В. Руденко, М. В. Красота, Ю. В. Кулєшков ; М-во освіти і науки України, – Кропивницький: ЦНТУ, 2024. – 201 с.

69. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: підручник / В. Р. Кулінченко. – Київ: Фірма «ІНКОС», Центр навчальної літератури, 2006. – 616 с.

70. Schade, G. D. (2016). Fluid mechanics: An introduction to the theory of fluid flow. Berlin: De Gruyter, 450 p.

71. Яхно О. М., Матієга В. М., Ракович В. Я. Технічна гідродинаміка та гідродинамічні решітки: Посібник. –Чернівці: Зелена Буковина, 2002. –264с., іл. 112.

72. Халатов А. А. Основи теорії конвективного теплообміну: навч. посібник / А. А. Халатов, Є. В. Мочалін. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 191 с.

73. Durst, F. (2022). Fluid mechanics: An introduction to the theory of fluid flows (2nd ed.). Berlin: Springer.

74. Tkachuk, O. A., et al. (2023). Theoretical aspects of turbulent flows in pipeline. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics, 70(1), 141–157.

75. Kotwica, K. (2021). Hard rock mining using disk tools supported by high-pressure water jets in the aspect of reducing energy consumption. Energies, 14(9), 2595.

76. Merzlyakov, V. G., Derevyashkin, I. V., Boykova, I. E., & Tolmachev, A. I. (2023). Coal and rock fracturing by high-velocity water jets. Mining Informational and Analytical Bulletin (MIAB).

77. Perec, A. (2021). Research into the disintegration of abrasive materials in the abrasive water jet machining process. Materials, 14(14), 3940.

78. Wang, H., Yuan, R., Zhang, X., Zai, P., & Deng, J. (2023). Research progress in abrasive water jet processing technology. Micromachines, 14(8), 1526.

79. Zhang, T., Zhang, Z., Feng, J., Shi, C., Zhou, H., Meng, F., & Tong, D. (2024). Development of a novel water jet polisher using soft abrasives for small

complex-structure heat pipes of aluminum alloy produced using additive manufacturing. Materials, 17(3), 582.

80. Саленко О. Ф. Інструмент інтегральної дії для виконання струминно-абразивного очищення / О. Ф. Саленко, П. Б. Поздняков // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорськ, 2007. – Вип. 22. – С. 93–98.

81. Saravanan, K., Sundaramoorthy, N., Mohankumar, G., & Subramanian, N. (2007). Studies on some aspects of jet mixers I: Hydrodynamics. Modern Applied Science, 4(3), 51–58.

82. Самойчук, К. О., Полудненко, О. В. Результати комп'ютерного моделювання процесу змішування рідких компонентів у струминному змішувачі. Обладнання та технології харчових виробництв, 2019, № 2, с. 45–52.

83. Качанов, І. В., Карпенчук, І. В., Пармон, В. В., Шкутник, В. А., Янкевич, Н. Г., Патоцький, Д. А. Математична модель руху вогнегасної рідини в проточному тракті лафетного ствола з гвинтовою структуризацією потоку. Надзвичайні ситуації: запобігання та ліквідація, 2013, № 2, с. 156–164.

84. Лєвич, В. Г. Фізико-хімічна гідродинаміка. 3-є вид., випр. та доповн. – М.: ГІФМЛ, 2016. – 700 с.

85. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: підручник. – Київ: ІНКОС; Центр навчальної літератури, 2006. – 616 с.

86. Корнієнко Я. М., Лукач Ю. Ю., Мікульонок І. О., Ракицький В. Л., Рябцев Г. Л. Процеси та обладнання хімічної технології: підруч. / за заг. ред. Є. М. Панова. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – Ч. 1–2. – 716 с.

87. Качанов І. В., Карпенчук І. В., Красовський А. І. Опір пожежних стволів // Вісник БНТУ: науково-технічний журнал. – 2010. – № 2. – С. 58–63.

88. Batchelor G. K., An Introduction to Fluid Dynamics, 2nd ed., rev. and enl., Cambridge: Cambridge University Press, 2000, XVIII, 615 p.

89. Vynogradov, A. (2019). Calculation of Design Parameters of Fire Protection Water Curtains. Mechanics and Advanced Technologies, (3 (87)), 61-74.

90. Виноградов А. Г. Розрахунок параметрів водяних завіс на основі теорії затоплених струменів / А. Г. Виноградов // Промислова гідравліка і пневматика. – 2014. – № 2 (44). – с. 16–22.

91. Виноградов А. Г. Взаємозв'язок параметрів протипожежних водяних завіс з ефективністю екранування теплового випромінювання / А. Г. Виноградов., О. М. Яхно, В. А. Дунюшкин // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2015. – № 1 (31). – с. 36–45.

92. Виноградов А. Г. Розрахунок параметрів протипожежних струменів розпиленої води / А. Г. Виноградов., О. М. Яхно // Прикладна гідромеханіка. – 2015. – Т. 17. – № 4. – С. 3 – 13.

93. Виноградов А. Г. Експериментальне дослідження екранування теплового випромінювання розпиленою водою / А. Г. Виноградов, С. Ю. Огурцов, В. А. Дунюшкин, В. С. Бенедюк, Е. А. Линчевский // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2014. – № 2 (30). – с. 99–108.

94. Виноградов А. Г. Розрахунки траєкторних параметрів крапель водяної завіси у вертикальній площині / А. Г. Виноградов // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», сер. Машинобудування. – 2008. – №53. – с. 84–88.

95. Виноградов А. Г. Розрахунок векторного поля швидкостей крапель водяної завіси / А. Г. Виноградов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2008. – №2 (49). Частина 2 – с. 42–44.

96. Виноградов А. Г. Теплозахисні властивості суцільної плівки води. Матеріали науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». – 2021, (26), 214-216.

97. Виноградов А. Г. Методика розрахунків параметрів водяних завіс на основі теорії затоплених струменів / А. Г. Виноградов // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2013. – № 2 (28). – с. 127–139.

98. Виноградов А. Г. Еквівалентний діаметр крапель струменів розпиленої води та його залежність від технічних параметрів / А. Г. Виноградов., О. М. Яхно // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», сер. Машинобудування. – 2016. – № 1 (76). – с. 39–45.

99. Лазаренко О. В. Дослідження захисних водяних завіс, генерованих насадками РВ–12 та НРТ–5 / О. В. Лазаренко. // «Пожежна безпека: теорія і практика». – 2015. – С. 76–80.

100. Дендаренко Ю.Ю. Радіальні водяні струмені-екрани для протипожежного захисту. Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.16 / Харківський держ. техн. ун-т буд. та архіт. – Харків. 2004. - 20 с.

101. Helmholtz, H. (1879). Über electrische Grenzschichten. Annalen der Physik und Chemie, 7, 337–382.

102. Gautschi, W. (1964). Bessel-functions of the first kind. Communications of the ACM, 7(8), 479.

103. Kotlyar, V. V., Khonina, S. N., & Soifer, V. A. (1995). Algorithm for the generation of nondiffracting Bessel modes. Journal of Modern Optics, 42(6), 1231–1239.

104. Olver, F. W. J., Lozier, D. W., Boisvert, R. F., & Clark, C. W. (Eds.). (2010). NIST handbook of mathematical functions. New York: Cambridge University Press. xv, 951 p.

105. Brychkov, Y. A. (2008). Handbook of special functions: Derivatives, integrals, series and other formulas. Boca Raton: CRC Press. 672 p.

106. Pikulin, V. P., & Pohozaev, S. I. (2001). Equations in mathematical physics: A practical course. Basel: Birkhäuser. VIII, 207 p.

107. Mathews, J., & Walker, R. L. (1970). Mathematical methods of physics (2nd ed.). New York: W. A. Benjamin. XIII, 501 p.

108. Nikiforov, A. F., & Uvarov, V. B. (1988). Special functions of mathematical physics: A unified introduction with applications. Basel: Birkhäuser. XVIII, 427 p.

109. Olver, F. W. J. (1974). Asymptotics and special functions. New York: Academic Press. XVI, 572 p.

110. Schweizer, W. (2021). Special functions in physics with MATLAB. Cham: Springer. XVII, 282 p.

111. Мартиненко М. А., Легеза В. П. Математична фізика: підручник / М. А. Мартиненко, В. П. Легеза. – Київ: ФОП Колісник К.І., 2009. – 480 с.

112. Атанов Г. А. Розрахунок гідродинамічної кумуляції / Г. А. Атанов // Обчислювальна математика і математична фізика. – 1975. – т. 15, №3. – С. 800–802.

113. Атанов Г. А., Семко А. Н. Про поширення струменя/ Гідромеханіка. – Київ: Наукова думка, 1974. – Вип. 26. – С. 16–20.

114. Атанов Г. А., Бешевлі Б. І. Про розподіл швидкості вздовж осі струменя імпульсного водомета / Газова динаміка, 1991, с. 3–8.

115. Клименко А. Д., Український Ю. Д. Визначення поля густини струменя гідропушки / Теоретична і прикладна механіка. – Київ, 1974. – 687 с.

116. Rein, M. (1993). Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces. Fluid Dynamics Research, 12(2), 61–93.

117. Lesser, M. B. (1995). Thirty years of liquid impact research: A tutorial review. Wear, 186–187, 28–34.

118. Возняк О. Т. Математичні моделі струминних течій / О. Т. Возняк. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2011. – Вісник НУ «Львівська політехніка». № 697: Теорія і практика будівництва. – С. 54–59.

119. Gao, Y., Li, P., & Huang, W. (2025). Investigations of internal flow characteristics of multi-hole nozzle using X-ray imaging technique. Processes, 13(2), 309.

120. Pan, Y., Zhai, S., Meng, X., Pei, K., & Huo, F. (2023). Study on the fracturing of rock by high-speed water jet impact. Processes, 11(1), 114.

121. Петраков А. І. Імпульсні водомети для руйнування гірських порід // Вугілля України, 1975, №3, с. 39–41.

122. Петраков А. І., Галитенко М. М., Криворотько О. Д. Руйнування порід високонапірними імпульсними водяними струменями // Вугілля, 1972, №3, с. 42–44.

123. Семко А. М. Розрахунок течії в гідропушці чисельним методом з штучною в'язкістю. Прикладна гідромеханіка, 2000, №1, С. 88–91.

124. Семко А. М. Гідроімпульсна прес-пушка з розширеною робочою камерою, Вісник Донецького університету, Серія А. Природничі науки, 1998, № 2, с. 62–65.

125. Войцеховський Б. В., Лаврентьєв М. А., Антонов Е. А. Питання теорії та практики імпульсних водяних струменів / Ін-т гідродинаміки. – 1960. – 26 с.

126. Войцеховський Б. В., Войцеховська Ф. Ф. Руйнування міцних гірських порід ударами високої енергії при проходці та бурінні / Наука, 1992. – 109 с.

127. Stas S. Peculiarities of calculating hydrodynamic characteristics of non-steady currents / S. Stas, O. Yakhno, D. Kolesnikov // Technical University of Gabrovo, ISC UniTech. – 2016. – V. III, p. 308–313.

128. Beznosyk, Y., & Bugaieva, L. (2021). Study of structure of flows of a technological apparatus using the theory of random functions. Technology Audit and Production Reserves, 1(3(57)), 16–20.

129. Бугаєва Л. М., Бойко Т. В., Безносик Ю. О. Системний аналіз хіміко-технологічних комплексів / Л. М. Бугаєва, Т. В. Бойко, Ю. О. Безносик. – Київ: Інтерсервіс, 2017. – 254 с.

130. Халатов А., Борисов І., Кобзар С., Коваленко Г., Донік Т., Шихабутинова О. Heat transfer and hydrodynamics in centrifugal fields / Київ: Інститут «Теплоенергетика» НАН України, 2024. – 119 с.

131. Воробйов М. В., Баскова О. О. Процеси теплопровідності та конвективного теплообміну: навч. посіб. / Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 48 с.

132. Пархоменко Р. В., Чалий Д. О., Войтович Д. П. Пожежна тактика / Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2016. – 416 с.

133. Клюс П. П., Палюх В. Г., Пустовой А. С. та ін. Пожежна тактика. – Харків: Основа, 1998. – 592 с.

134. Довідник керівника гасіння пожежі / уклад.: Р. В. Пархоменко, Д. О. Чалий, Д. П. Войтович. – Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2016. – 320 с. https://ldubgd.edu.ua/node/4974.

135. Zakhmatov, V. D., Tsikanovskii, V. L., & Kozhemyakin, A. S. (1998). Throwing of fire-extinguishing powder jets from barrels. Combustion, Explosion and Shock Waves, 34(1), 97–100.

136. Davis, S. (2000). Fire fighting water: A review of fire fighting water requirements – A New Zealand perspective. University of Canterbury, New Zealand.

137. Gieslsson, K., & Rosander, M. (1984). Making the best use of water for extinguishing purposes. Fire Journal, October, 43–46.

138. Кравчуновський В. Ф. Результати випробувань ручного диспергувального ствола, розробленого на основі використання гідроімпульсних систем // Бабенко В. С., Кравчуновський В. Ф., Присяжнюк В. В., Кремена А. П. Пожежна безпека. – 2003 р. – №3. – С. 91–95.

139. Стась С. В. Створення спеціалізованих систем та їхніх елементів для МНС України на базі сільськогосподарської техніки / В. С. Бабенко, С. В. Стась // Промислова гідравліка і пневматика. – 2004. – №3 (9). – С. 120–122.

140. Кравчуновский В. Ф. Пожежні стволи – короткий аналіз існуючих пристроїв для розпилення рідини, перспективність використання гідроімпульсних систем. Пожежна безпека, збірник наукових праць. – ЛІПБ, №2. – 2002 р. – С. 73–76.

141. Атанов Г. А. Гідроімпульсні установки для руйнування гірських порід [Текст] / Г. А. Атанов. – К.: Вища шк., 1987. – 152 с.

142. Терентьєв О., Клєщов А., Крючков А., Сергієнко М. Технологічні параметри руйнування гірських порід при класичному і молекулярно-хвильовому підходах // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2019. – Вип. 1. – С. 74–82.

143. Семко А. Н. Використання імпульсних струменів рідини високої швидкості для гасіння газових факелів / А. Н. Семко, С. А. Виноградов, І. М. Грицина // Вісн. Донец. ун-ту. Сер. А. Природн. науки. – 2011. – № 1. – С. 160–167.

144. Стась С. В. Аналіз факторів, що впливають на гідродинаміку потоку в’язкої рідини в пожежному стволі. Матеріали ІІ Міжнародної науково-практичної конференції «Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту». Черкаси : ЧІПБ. 2008. С. 94–96.

145. Патент України № 156618. Автоматична установка водяного пожежогасіння / Євстратенко Л. І. – UA 156618. – Опубл. 17.07.2024.

146. Патент України № 82780 U. Головка для створення водяного туману / – UA 82780 U, МПК A62C 31/00. – Опубл. 15.05.2008, Бюл. № 9.

147. Патент України № 92987. Пристрій для кавітаційної обробки рідини / Луговський О. Ф., Гришко І. А., Мовчанюк А. В. – UA 92987 C2. – Опубл. 27.12.2010.

148. Hinze, Y. O. (1948). Critical speed and sizes of liquid globules. Journal of Applied Scientific Research, 1(4), 274–288.

149. Gordon, G. D. (1959). Mechanism and speed of breakup of drops. Journal of Applied Physics, 30(11), 1759–1761.

150. Dodd, K. N. (1960). On the disintegration of water drops in air stream. Journal of Fluid Mechanics, 9(2), 175–182.

151. Simons, G. A. (1976). Liquid drop acceleration and deformation. AIAA Journal, 14(2), 278–280.

152. Li, M. K., & Fogler, H. S. (1978). Acoustic emulsification. Part 2. Break up of the large primary oil droplets in a water medium. Journal of Fluid Mechanics, 88(3), 513–528.

153. Rein, M. (Ed.). (2002). Drop–surface interactions. Wien; New York: Springer. 284 p.

154. Ni, R. (2024). Deformation and breakup of bubbles and drops in turbulence. Annual Review of Fluid Mechanics, 56, 319–347. https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121021-034541

155. Gobyzov, O. A., Ryabov, M. N., & Bilsky, A. V. (2020). Study of deformation and breakup of submillimeter droplets' spray in a supersonic nozzle flow. Applied Sciences, 10(18), Article 6149.

156. Simakov, N. N. (2020). Liquid spray from nozzles: Experimental and computer simulation of hydrodynamics and interphase heat and mass transfer. Cham; New York: Springer. 194 p.

157. Badr, S. B., Deyab, A. A., & El-Magd, M. A. (2012). An analytical approach for calculation of critical Weber number of droplet breakup in turbulent gaseous flows. Arabian Journal for Science and Engineering, 37(8), 2311–2321.

158. Виноградов С. А. Комп'ютерне моделювання параметрів високошвидкісних струменів рідини / С. А. Виноградов // Вісті Автомоб. - дор. ін-ту. – 2012. – № 1. – С. 53–57.

159. Грицина, І. М. Розрахунок довжини суцільної ділянки ультраструменя / І. М. Грицина, С. А. Виноградов//Проблеми пожежної безпеки: зб. наук. пр. – Харків, 2011. – Вип. 29. – С. 46–49.

160. Lin, P. S., & Kang, D. J. (1987). Atomization of a liquid jet. Physics of Fluids, 30, 2000–2006.

161. Craig, L., Barlow, N., Partel, S., Kanya, B., & Lin, S. P. (2009). Optimal and non-optimal flows in a swirl atomizer. Journal of the Institute for Liquid Atomization and Spray Systems, 13, 113–124.

162. Lin, S. P. (1996). Regimes of jet breakup and breakup mechanisms (mathematical aspects). In K. K. Kuo (Ed.), Recent advances in spray combustion: Spray atomization and drop burning phenomena (Vol. 1, pp. 137–160). Reston: AIAA Inc.

163. Hibling, J., & Heister, S. D. (1996). Droplet size control in liquid jet breakup. Physics of Fluids, 8(6), 1574–1581.

164. Ashgriz, N. (2011). Handbook of atomization and sprays: Theory and applications. Springer Science and Business Media. 935 p.

165. Yarin, A. L. (1996). Free liquid jets and films: Hydrodynamics and rheology. Harlow; New York: Longman. 312 p.

166. Vassallo, P., & Ashgriz, N. (1991). Satellite formation and merging in liquid jet breakup. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 433, 269–286.

167. Keller, J. B., Rubinow, S. I., & Tu, Y. O. (1973). Spatial instability of a jet. Physics of Fluids, 16, 2052–2055.

168. Yoon, S. S., & Heister, S. D. (2004). A nonlinear atomization model based on a boundary layer instability mechanism. Physics of Fluids, 16(1), 47–61.

169. Pilch, M., & Erdman, C. A. (1987). Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop. International Journal of Multiphase Flow, 13(6), 741–757.

170. Hsiang, L. P., & Faeth, G. M. (1992). Near-limit drop deformation and secondary breakup. International Journal of Multiphase Flow, 18(5), 635–652.

171. Gelfand, B. E. (1996). Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag. Progress in Energy and Combustion Science, 22(3), 201–265.

172. Guildenbecher, D. R., Lopez-Rivera, C., & Sojka, P. E. (2009). Secondary atomization. Experiments in Fluids, 46(3), 371–402.

173. Ranger, A. A., & Nicholls, J. A. (1969). Aerodynamic shattering of liquid drops. AIAA Journal, 7(2), 285–290.

174. Huh, K. Y., Lee, E., & Koo, J.-Y. (1998). Diesel spray atomization model considering nozzle exit turbulence conditions. Atomization and Sprays, 8, 453–469.

175. Schmidt, D. P., Nouar, I., Senecal, P. K., Rutland, C. J., Martin, J. K., & Reitz, R. D. (1999). Pressure-swirl atomization in the near field. SAE Technical Paper Series, 1999-01-0496.

176. Senecal, P. K., Schmidt, D. P., Nouar, I., Rutland, C. J., Reitz, R. D., & Corradini, M. L. (1999). Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization. International Journal of Multiphase Flow, 25, 1073–1097.

177. O'Rourke, P. J., & Amsden, A. A. (1987). The TAB method for numerical calculation of spray droplet breakup. SAE Technical Paper 872089.

178. Reitz, R. D., & Diwakar, R. (1987). Structure of high-pressure fuel sprays. SAE Technical Paper Series 870598.

179. Reitz, R. D. (1987). Modeling atomization processes in high-pressure vaporizing sprays. Atomisation and Spray Technology, 3, 309–337.

180. Ibrahim, E. A., Yang, H. Q., & Przekwas, A. J. (1993). Modeling of spray droplets deformation and breakup. Journal of Propulsion and Power, 9(4), 651–654.

181. Chryssakis, C., & Assanis, D. N. (2008). A unified fuel spray breakup model for internal combustion engine applications. Atomization and Sprays, 18(5), 375–426.

182. Kippax, P., Marshall, A., & Martial, P. (2009). Droplet size analysis in the development of enhanced water mist fire suppression systems. Labmate UK.

183. Колесніков Д. В. Вибір раціональних параметрів спеціальних струменеформуючих насадок Макаревського/ Д. В. Колесніков // Промислова гідравліка і пневматика. – №4(34). – Вінниця: ВНАУ, 2011. – С. 7–10.

184. Widmann, J. F., Sheppard, D. T., & Lueptow, R. M. (2001). Non-intrusive measurements in fire sprinkler sprays. Fire Technology, 37(4), 297–315.

185. Колесніков Д. В., Семінська Н. В. Вплив дестабілізації течії в каналі зі змінним по довжині витратним потоком на характеристики потоку // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XIX Міжнародної науково-технічної конференції. – Кіровоград: Гідравліка-Трейд, 2014. – С. 64–65.

186. Целюх І., Лапшин В. Пожежна техніка та пожежно-технічне обладнання: навч. посібник. – Львів: Нац. акад. сухопут. військ, 2021. – 173 с.

187. Fire Service Training Association. (2018). Essentials of fire fighting (7th ed.). Stillwater, OK: Fire Protection Publications. 672 p.

188. Morrison, T. (2013). The history of the fog nozzle & indirect fire attack. Firefighter Nation; FireRescue Magazine. Firerescue Magazine. (2013). Little drops of water: 50 years later, part 1. Fire Engineering Magazine.

189. Layman, L. (1952). Attacking and extinguishing interior fires. Boston: National Fire Protection Association.

190. Royer, K. (1995). Iowa rate of flow formula for fire control. Fire Engineering, September.

191. Royer, K. (1959). Water for firefighting. Engineering Extension Service, Iowa State University, Bulletin No. 18. Ames, IA. p. 2.

192. Nelson, F. (1991). Qualitative fire behavior. Ashland, MA: International Society of Fire Service Instructors.

193. Nelson, F. (1991). Qualitative fire behavior. Staunton, VA: International Society of Fire Service Instructors.

194. Royer, K., & Nelson, F. (1959). Water for fog fire fighting—How much and how to apply it!.

195. Purser, D. A., & McAllister, J. L. (2016). Assessment of hazards to occupants from smoke, toxic gases, and heat. In M. J. Hurley (Ed.), SFPE

handbook of fire protection engineering (5th ed., Vol. 3, pp. 2308–2428). New York, NY: Springer.

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

197. Яхно О. М., Матієга В. М., Кривошеєв В. С. Гідродинамічна початкова ділянка / В. М. Матієга (ред.). – Чернівці: Зелена Буковина, 2004. – 144 с.

198. Колесніков Д. В. Аналіз чинників впливу на характеристики пожежного струменя / Д. В. Колесніков // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування: збірник наукових праць. – 2011. – № 63. – С. 237–239.

199. Петухова О. А., Андронов В. А., Горносталь С. А., Черепаха Р. Е. Протипожежне водопостачання: навч. посіб. – Харків: НУЦЗУ, 2022. – 280 с.

200. Brock P. D., Charter V. Fire Protection Hydraulics and Water Supply Analysis. – Cham: Springer, 2026. – 756 p.

201. ДСТУ 9069:2021. Протипожежна техніка. Рукави пожежні плоскоскладані для пожежно-рятувальних автомобілів. Загальні вимоги та методи випробування. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2021. – 18 с.

202. National Fire Protection Association. (2023). NFPA 750: Standard on water mist fire protection systems. Quincy, MA: National Fire Protection Association. 118 p.

203. British Standards Institution. (2008). BS EN 1028–1:2002+A1:2008 Fire-fighting pumps – Fire-fighting centrifugal pumps with primer – Part 1: Classification – General and safety requirements.

204. ТОВ «Харцизький машинобудівний завод». Пожежне обладнання. Стволи пожежні. Каталог продукції. – Донецьк: Харцизький машинобудівний завод, 2007. – 23 с.

205. Гідравліка / О. В. Ратушний, О. Г. Гусак. –2-ге вид., перероб. – Суми: Сумський державний університет (СумДУ), 2022. –251 с.

206. Milne-Thomson, L. M. (1996). Theoretical hydrodynamics (5th ed.). New York; London: Dover Publications. 768 p.

207. Eirich, F. R. (Ed.). (1956–1967). Rheology: Theory and applications. New York; London: Academic Press.

208. Грицина І. Н., Виноградов С. А., Консуров Н. О. Високошвидкісні струмені рідини як засіб гідроруйнації елементів будівельних конструкцій під час проведення аварійно-рятувальних робіт / І. Н. Грицина, С. А. Виноградов, М. О. Консуров // Науковий вісник Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки. – Київ, 2013. – № 2 (28). – С. 173–178.

209. Виноградов С. А., Консуров М. О., Сокол Я. С. Експериментальні дослідження системи гідроімпульсного руйнування елементів будівельних конструкцій. Збірка наукових праць "Проблеми надзвичайних ситуацій" 2015. – С. 11–17.

210. Семінська, Н. В. Вдосконалення гідроструминних технологій з врахуванням особливостей формування струменів високого тиску [Текст]: автореферат дис. . . . канд. техн. наук: 01. 02. 05 / Н. В. Семінська; Нац. техн. ун-т "Харк. політехн. ін-т". – К., 2008. – 21 с.

211. Ольшанський В. П., Халипа В. М., Дубовик О. А. Приблизні методи розрахунку гідравлічних пожежних струменів. – Харків: Митець, 2004. – 113 с.

212. Bansal, R. K. (2005). A textbook of fluid mechanics and hydraulic machines. New Delhi: Laxmi Publications. 1102 p.

213. Розрахунок пожежних гідравлічних струменів. Єременко С. А., Ольшанський В. П., Халипа В. М., Дубовик О. О. Харків: АЦЗУ – 125 с.

214. Stas S. Study of parameters of hydraulic streams used for extinguishing / S. Stas, O. Yakhno, D. Kolesnikov // Technical University of Gabrovo, ISC AmTech. – 2007. – V. II. – p. 211–215.

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

216. Parrish, K. (2014). Modern fire trucks: An illustrated history. Ertel Publishing. 128 p.

217. Стась С. В. Особливості пульсуючої течії рідини в циліндричних насадках / Н. Г. Шкарабура, С. В. Стась // Вісник Черкаського державного технологічного інституту. – 2004. – №2. – С. 68–71.

218. Абрамов Ю. А., Росоха В. Є., Шаповалова Є. А. Моделювання процесів у пожежних стволах. – Харків: Фоліо, 2001. – 195 с.

219. Brushlinsky, N., Sokolov, S., & Wagner, P. (2010). Humanity and fires. EDURA (Poland). 500 p.

220. Целюх І., Лапшин В. Пожежна техніка та пожежно-технічне обладнання: навчальний посібник. – Львів: НАСВ, 2021. – 173 с.

221. Stas S. System design of fire-rescue equipment and its components // Journal of the Technical University of Gabrovo. – Vol. 47, 2014. – P. 8–12.

222. Angle, J. S. (2014). Firefighting strategies and tactics. Sudbury: Jones & Bartlett Learning. 490 p.

223. Astarita, G., Marrucci, G., & Nicolais, L. (2012). Rheology: Volume 1: Principles. New York: Springer. 421 p.

224. Яхно О. М., Желяк В. І. Гідравліка ньютонівських рідин. – Київ: Вища школа, 1995. – 175 с.

225. Vinogradov, G. V., & Malkin, A. Y. (2013). Rheology of polymers: Viscoelasticity and flow of polymers. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag. 468 p.

226. Korolchenko, A. Ya., & Korolchenko, D. A. (2004). Fire and explosion hazards of substances and materials and means of their extinguishing: Handbook (Vol. 2, Part I). ASE. 110 p.

227. Bengtsson, L. G. (2001). Enclosure fires. Swedish Rescue Services Agency.

228. Andersson, P., & Holsmedt, G. (1999). Limitations of water mist as a total flooding agent. Journal of Fire Protection Engineering.

229. Gsell, J. (2009). The cutting extinguisher: Presentation, demonstration, tactical and operational use.

230. Gukhman, A. A. (1965). Introduction to the theory of similarity. New York; London: Academic Press. 256 p.

231. Durst, F. (2008). Fluid mechanics: An introduction to the theory of fluid flows. Berlin: Springer-Verlag. 723 p.

232. Irgens, F. (2014). Rheology and non-Newtonian fluids. Cham: Springer. 190 p.

233. 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.

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

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

236. Tadmor, Z., & Gogos, C. G. (2006). Principles of polymer processing. New York: John Wiley & Sons. 992 p.

237. Franco-Gómez, A., Onuki, H., Yokoyama, Y., Nagatsu, Y., & Tagawa, Y. (2021). Effect of liquid elasticity on the behaviour of high-speed focused jets. Experiments in Fluids, 62, Article 41. 10 p.

238. Computational and experimental investigation of a swirl nozzle for viscous fluids. (2020). International Journal of Multiphase Flow, 128, Article 103278.

239. Metzner, A. B. (1961). Flow of non-Newtonian fluids. In Z. V. Z. Streeter (Ed.), Handbook of fluid dynamics (pp. 7–17). New York: McGraw-Hill.

240. Harries, I. (1964). Rheological characterization and incompressible flow. Nature, March 28.

241. Lamnawar, K., & Maazouz, A. (2022). Rheology and processing of polymers. Basel: MDPI. 302 p.

242. Wu, W., Mi, H.-Y., et al. (2022). Advances in the processing and application of polymer and its composites. Basel: MDPI. 194 p.

243. Lambride, C., Syrakos, A., & Georgiou, G. C. (2023). Entrance length estimates for flows of power-law fluids in pipes and channels. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 317, Article 105056. 17 p.

244. Sarukhanyan, A., Vardanyan, Y., Baljyan, P., & Vermishyan, G. (2023). Pattern identification of the non-stationary laminar flow of a viscous fluid in the round pipe inlet section. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(28), 33–42.

245. Düz, H. (2019). Numerical and experimental study to predict the entrance length in pipe flows. Journal of Applied Fluid Mechanics, 12(1), 155–164.

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

247. İlikan, A. N., & Aydın, R. (2023). Analysis of the slip flow in the hydrodynamic entrance region of a 2D microchannel. Journal of Thermal Engineering, 9(3), 733–745.

248. Регирер С. А. Приближённое решение задачи о течении проводящей жидкости в канале прямоугольного сечения // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1970. – № 5. – С. 33–40.

249. Ranjith, S. K., Patnaik, B. S. V., & Vedantam, S. (2012). Hydrodynamics of the developing region in hydrophobic microchannels: A dissipative particle dynamics study. arXiv.

250. Liu, Z., Kashef, A., Lougheed, G. D., & Benichou, N. (2002). Review of three dimensional water fog techniques for firefighting. Institute for Research in Construction, National Research Council Canada. Research Report RR124. Ottawa, Canada.

251. Alageel, E., & Swithenbank, J. (1998). Mitigation of compartment jet fires using water sprays. University of Sheffield, UK.

252. Grimwood, P. (2003). Tactical firefighting: A comprehensive guide. Firetactics, Cemac. 127 p.

253. Särdqvist, S., & Holmstedt, G. (2001). Water for manual fire suppression. Journal of Fire Protection Engineering, 11, 210–211.

254. Мірзоєв Р. Г., Кугушев І. Д., Брагінський В. А. та ін. Основи конструювання та розрахунку деталей із пластмас і технологічного оснащення для їх виготовлення: навч. посібник для студентів вишів. Машинобудування, 1972. – 416 с.

255. Жданов Ю. А., Рябінін Д. Д., Допіра П. К. До питання універсальності каналів плоскощілинних головок рівного опору // Хімічне машинобудування. – К.: Техніка, 1973. – С. 7–11.

256. Рябінін Д. Д., Жданов Ю. А., Лотоцький Ю. В. Особливості течії розплаву ударостійкого полістиролу у формувальних каналах // Хімічна технологія. – 1978. – № 4. – С. 43–47.

257. 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.; 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. ISSN 1310–6686.

258. Стась С. В. Аналіз гідродинамічних характеристик потоку рідини у спеціальних пожежних стволах і насадках щілинного типу // Вісн. Нац. техн. ун-ту України «КПІ». Сер. Машинобуд. – 2009. – Вип. 57. – С. 139–142.

259. Яхно О. М., Дубовицький В. Ф. Основи реології полімерів. – К.: Вища школа, 1976. – 186 с.

260. Пат. 105235 U України, МПК A62C 31/00. Насадок для створення плоско-радіальної водяної завіси / С. В. Росоха, Ю. М. Сенчихін, В. А. Голендер, К. М. Остапов, Ю. Ю. Дендаренко; Заявник і патентовласник Національний Університет цивільного захисту України / Заяв. 07. 09. 2015, Опубл. 10. 03. 2016. – Бюл. №5. – 4 с.

261. Дендаренко Ю. Ю. Ефективність радіального водяного струменя-екрана в зоні теплової дії дифузійного факела полум'я / Ю. Ю. Дендаренко, В. І. Дивень, О. Д. Блащук // Науковий вісник НЛТУ України. – 2017. – Вип. 27(9). – С. 104–106.

262. Kundu, P. K., Cohen, I. M., Dowling, D. R., & Capecelatro, J. (2024). Fluid mechanics. Amsterdam: Academic Press. 768 p.

263. Durst, F. (2008). Fluid mechanics: An introduction to the theory of fluid flows. Berlin; Heidelberg: Springer. XVIII, 723 p.

264. Яхно О. М. Технічна гідромеханіка та гідродинамічні решітки / О. М. Яхно, В. М. Матієга, В. Я. Ракович. – Чернівці: Зелена Буковина, 2002. – 264 с.

265. Яхно О. М., Коваль О. Д., Піщенко Л. І., Паскалов В. П., Яске Н. Н. Кавітація у переробці нафти. – К.: Світ, 1999. – 257 с.

266. Маргуліс М. А. Дослідження електричних явищ, пов’язаних із кавітацією // До теорії виникнення сонолюмінесценції та звуко-хімічних реакцій. – Журнал фізичної хімії. – 1985. – Т. 59, № 6. – С. 1497–1503.

267. Пат. 60500 U України, МПК A62C 31/00. Пожежний ствол / Стась С. В., Яхно О. М., Луговський О. Ф., Колесніков Д. В., Кришталь В. М.; заявник і патентовласник Академія пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля МНС України. – Заявл. 09.11.2010, Опубл. 25.06.2011. – Бюл. № 12. – 2 с.; Патент України 152183 U, МПК A62C 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.

268. Пат. 58516 U України, МПК A62C 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 ім. Героїв Чорнобиля МНС України. – Заявл. 09.11.2010, Опубл. 11.04.2011. – Бюл. № 7. – 3 с.; Патент України 146639 U, МПК A62C 31/00, A62C 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.

269. McCarthy, M. J., & Molloy, N. A. (1974). Review of stability of liquid sprays and the influence of nozzle design. Chemical Engineering Journal, 7, 1–20.

270. Anisovich, A. G., Eleseev, S. Yu., & Makhan’ko, V. I. (2005). Anti-corrosion protective coatings on steel St. 3. Bulletin CEIMESRB, (2), 41–48.

271. Makhanko, V. I., Eleseev, S. Yu., & Kulakovskiy, B. L. (2005). Anti-corrosion protection of fire truck tank compartments. Bulletin CEIMESRB, (1), 19–24.

272. McCafferty, E. (2010). Introduction to corrosion science. New York: Springer Science + Business Media. 565 p.

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

274. Marchenko D., Artyukh V., Matvyeyeva K. Analysis of the influence of surface plastic deformation on increasing the wear resistance of machine parts / Problems of Tribology. – 2020. – Vol. 25, № 2/96. – P. 6–11. –

275. Мамедов Н. М., Яхно О. М. Вплив кремнійорганічних покриттів труб на опір гідросистемі / Гідропривід і гідроавтоматика. Республіканський міжвідомчий науково-технічний збірник. – Вип. 22. – 1986. – С. 19–25.

276. Ратушний О. В., Гусак О. Г. Гідравліка: підручник. –2-ге вид., перероб. – Суми: Сумський державний університет, 2022. –251 с.

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

278. Шкарабура М. Г., Стась С. В. Основні принципи генерування імпульсних потоків у гідравлічних системах / Промислова гідравліка і пневматика. – 2004. – № 1 (3). – С. 25–29; 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.

279. Кулінченко В. Р. Гідродинаміка: навч. посіб. –К.: НМК ВО, 1992. – 272 с.

280. Schlichting, H., & Gersten, K. (2017). Boundary-layer theory (9th ed.). Berlin/Heidelberg: Springer. 805 p.

281. Kutateladze, S. S., & Leontiev, A. I. (1990). Heat transfer, mass transfer, and friction in turbulent boundary layers. New York: Hemisphere. 302 p.

282. Левицький Б. Ф., Лещій Н. П. Гідравліка. Загальний курс. – Львів: Світ, 1994. – 264с.

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

284. Stas, S. V. The questions of formation the hydraulic jet in impulse fire extinguishing systems/ S. Stas, D. Kolesnikov, A. Bychenko // Unitech'17. – Technical University of Gabrovo. – 2017. – Vol. III. – P. 153–157.

285. Камінер А. О., Яхно О. М. Гідромеханіка в інженерній практиці. – К.: Техніка, 1987. –175 с.

286. Womersley, J. R. (1955). Method for the calculation of velocity, rate of flow and viscous drag in arteries when the pressure gradient is known. The Journal of Physiology, 127(3), 553–563.

287. Ногін Н. В. Періодичний рух в'язкої нестисливої рідини по необмеженій циліндричній трубі / Н. В. Ногін. –Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. праць. Темат. вип.: Нові рішення в сучасних технологіях. –Харків: НТУ «ХПІ», 2013. –№ 16 (989). – С. 182–186.

288. Лаврівський З. В., Мандрус В. І. Технічна механіка рідин та газів. Навчальний посібник – Львів: СПОЛОМ, 2004. –191с. ISBN 966–665–156–4.

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

290. Roeser. (2004). First assistance. Luxembourg. Retrieved from http://www.pompjeen-reiserbann.lu/ifex3000.htm

291. Implementing national statistics code of practice and release practice protocol. (n.d.). U. K., Digital Object Identifier.

292. Стась С. В., Шкарабура Н. Г. Можливі методи аналізу систем формування гідравлічних струменів / С. В. Стась, Н. Г. Шкарабура. – Надзвичайні ситуації: освіта і наука. Міжнародний науково-практичний журнал, 2007. –№ 1, т. 2. – С. 29–34.

293. Пастушенко С. І. Методи термодинамічного аналізу і термоекономічної оцінки систем гідроприводів сільськогосподарських машин // Вісник аграрної науки Причорномор'я. – Миколаїв: Видавничий відділ МДАА. – 2002. – Вид. 4 (18). – Т. 1. – С. 64–74.

294. Бродянський В. М., Верхівнер Г. П., Карчер Я. Я. та інші. Ексергетичні розрахунки технічних систем: довідкове посібник / Під ред. А. А. Домінського, В. М. Бродянського. –Київ: Наукова думка, 1991. –360 с.

295. Шкарабура Н. Г., Пастушенко С. І., Стась С. В., Яхно О. М. Можливий метод вибору раціональних параметрів гідравлічних систем пожежного автомобіля / Н. Г. Шкарабура, С. І. Пастушенко, С. В. Стась, О. М. Яхно. –Вісник КІІМНС, № 1 (5), 2007. – С. 18–24.

296. Мерзляков В. Г., Бафталовський В. Є. Фізико-технічні основи гідроструминних технологій у гірничому виробництві. ІГД ім. А. А. Скочинського, 2004. –673 с.

297. Росоха С. В., Сенчіхін Ю. Н., Остапов К. М., Дендаренко Ю. Ю. Рішення задачі конструювання пожежного ствола-розпилювача / С. В. Росоха, Ю. Н. Сенчіхін, К. М. Остапов, Ю. Ю. Дендаренко. –Науковий вісник будівництва, 2016. –№ 1. – С. 228–233.

298. Росоха С. В., Сенчіхін Ю. Н., Остапов К. М., Дендаренко Ю. Ю. Планування експерименту та конструювання насадок пожежних стволів для дистанційного гасіння пожеж гелеподібними складами / С. В. Росоха, Ю. Н. Сенчіхін, К. М. Остапов, Ю. Ю. Дендаренко. –Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, 2016. –Вип. 4. – С. 94–99.

299. Воронцов Е. Г., Тананайко Ю. М. Теплообмін у рідинних плівках [Текст]: навч. посіб. / Е. Г. Воронцов, Ю. М. Тананайко. –Київ: Техніка, 1972. –196 с.

300. Воронцов Е. Г., Яхно О. М. Особливості гравітаційного течії нерівномірно розподілених рідинних шарів / Е. Г. Воронцов, О. М. Яхно. – Інженерно-фізичний журнал, 1974. –Т. 26, № 2. – С. 272–279.

301. Яхно О. М., Воронцов Е. Г. Інтегральні характеристики плівки, що нерівномірно зрошує зовнішню поверхню труби / О. М. Яхно, Е. Г. Воронцов. –Хімічна технологія, 1975. –№ 4. – С. 43–45.

302. Cote, A. E. (2003). Operation of fire protection systems (19th ed., Vols. I & II). Quincy, MA: National Fire Protection Association. 683 p.

303. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2014 році. – К.: МНС України, 2015. – 365 с.

304. Аналітичний огляд стану техногенної та природної безпеки в Україні за 2016 рік. К.: МНС України, 2017. – 377 с.

305. Бурєнніков Ю. А., Немировський І. А., Козлов Л. Г. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи: навч. посібник для студентів вищ. навч. закладів. – Вінниця: ВНТУ, 2013. –273 с.

306. Бедрій Я. Охорона праці та пожежна безпека / Я. Бедрій. –Тернопіль: Навчальна книга-Богдан, 2014. –250 с.

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

308. Генератори середньої кратності ГПС – 200 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://expert-01.com/biblioteka/normativ-nye_dokumenty/Gost_r/Pril/50409-92_1r. htm.

309. Колєнов О. М. Навчальний посібник з дисципліни «Первинна підготовка рятувальника»/ О. М. Колєнов, О. Є. Безуглов, В. М. Іщук // Харків: НУЦЗУ. – 2012. – 403 с.

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

311. Портативний піногенератор: пат. 121256 U України, МПК A62C 31/12 / О. М. Землянський, О. М. Мирошник, С. В. Куценко, А. О. Биченко, І. Г. Маладика, І. М. Шкарабура, С. В. Стась, Р. В. Галенда; заявник і патентовласник О. М. Мирошник. –Заявл. 26.06.2017, опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22. –3 с.

312. Khodayari, H., Ommi, F., & Saboohi, Z. (2018). Investigation of primary breakup length and instability of non-Newtonian viscoelastic liquid jets. International Journal of Multiphysics, 12(4), 327–347.

313. Tadmor, Z., & Gogos, C. G. (2006). Principles of polymer processing (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 992 p.

314. Махно А. М. Сучасні тренди та перспективи розвитку досліджень технології гідроабразивного різання матеріалів у гірництві та загальній інженерії / А. М. Махно. –Технічна інженерія, 2024. –№ 2(94). – С. 291–297. – https://doi.org/10.26642/2024-2-291-297.

315. Лебедєв І. В., Трескунов В. С., Яковенко В. С. Елементи струминної автоматики / І. В. Лебедєв, В. С. Трескунов, В. С. Яковенко. – Машинобудування, 1973. –360 с.

316. Stas S. Research into cavitation processes in the trapped volume of the gear pump / D. Kostiuk, D. Kolesnikov, S. Stas, O. Yakhno // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 4/7 (94). – 2018. – p. 61–66,

317. Khodayari, H., Ommi, F., & Saboohi, Z. (2018). Investigation of primary breakup length and instability of non-Newtonian viscoelastic liquid jets. International Journal of Multiphysics, 12(4), 327–347.

318. Stas S., Shkarabura N., Yakhno O. The analysis of the factors influencing hydrodynamics of a stream of a viscous liquid in a fire trunk / S. Stas, N. Shkarabura, O. Yakhno. –Technical University of Gabrovo, ISC UniTech, 2006. – Vol. II. –P. 432–436.

319. Путяткін В. Ф., Козачек Л. А., Яхно О. М. Дослідження коефіцієнтів опору труб із внутрішнім епоксидним покриттям / В. Ф. Путяткін, Л. А. Козачек, О. М. Яхно // Збірник Гідравліки та гідротехніки. –1975. –№ 21. – С. 32–35.

320. 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; 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 : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2023. С. 157–159.;

321. Кусковець С. Л., Мандрус В. І., Кусковець А. С. . Гідравлічні опори пожежних стволів// Зб. наук. пр. Пожежна безпека. – №7, 2005. – С. 64–66.

322. Urbanowicz, K., & Tijsseling, A. S. (2024). Ten years of passion: I. S. Gromeka's contribution to science. Fluids, 9(3), Article 57. 18 p.

323. Sochi, T. (2011). Slip at fluid-solid interface. arXiv. Article ID 1101.4421.

324. Sochi, T. (2018). Wall slip for complex liquids – Phenomenon and its causes. Advances in Colloid and Interface Science, 257, 42–57.

325. 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$ 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.

326. Cecі, A., & Pirozzoli, S. (2025). Direct numerical simulation study of turbulent pipe flow with imposed radial rotation. Journal of Fluid Mechanics, 1004, Article A15.

327. Стась С. В., Шкарабура Н. Г., Яхно О. М. Основні закономірності дроблення струменя і умови дроблення крапель // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування. – 2006. – № 49. – С. 82–86.

328. Яхно О. М., Булгаков В. М., Войтюк Д. Г. Дроблення крапель рідини, що розподіляється по трубопроводу // Промислова гідравліка і пневматика. – 2004. – № 2(4). – С. 13–16.

329. Тимченко А. А. Основи системного проектування та системного аналізу складних об’єктів. –Київ: Либідь, 2004. –272 с.

330. Antoulas, A. C. (2011). Mathematical system theory: The influence of R. E. Kalman. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. 605 p.

331. Плотников В. В., Петрова О. Г. Ексергетичний метод у системному аналізі хіміко-технологічних систем // Сучасні наукоємні технології. – 2009. – № 4. – С. 27–29.

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

333. Smits, A. J., & Lim, T. T. (2012). Flow visualization: Techniques and examples (2nd ed.). Berlin; Heidelberg: Springer. 478 p.

334. Uemura, Y., Ueda, N., & Iguchi, K. (2018). Flow visualization in materials processing. Tokyo: Springer. 256 p.

335. Ge, M., Zhang, G., & Zhang, X.-L. (2025). Flow visualization: Experiments and techniques. Basel: MDPI Books. 242 p.

336. Fu, B., You, C., Cai, J., Xiao, H., & Lu, B. (2025). Experimental study of water jet atomization using the Schlieren method. Journal of Applied Fluid Mechanics, 18(11), 2810–2822.

337. Волокита А. М., Селіванов В. Л. Основи теорії планування експерименту: розділ дисципліни «Методика та організація наукових досліджень»: навч. посібник / А. М. Волокита, В. Л. Селіванов. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. –41 с.

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

339. Яхно, О. М. Технічна гідродинаміка та гідродинамічна теорія змащування / О. М. Яхно, В. М. Матієга, С. І. Одайський: навч. посіб. – Чернівці: Золоті литаври, 2010. – 326 с.

340. Колесніков Д. В. Удосконалення стаціонарних систем автоматичного водяного пожежогасіння [монографія] / Колесніков Д. В., Стась С. В. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. – 100 с.; Колесніков Д. В., Стась С. В., Мигаленко К. І. Створення розпилених струменів води для автоматичних установок пожежогасіння : монографія. Черкаси : ЧІПБ НУЦЗ України, 2023. 122 с.; 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 : ЧІПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2014.

341. Потєха А. В., Ковальов А. І., Грушовинчук А. В. Визначення експериментальних траєкторій та інших геометричних характеристик пожежних струменів за допомогою фотозйомки / А. В. Потєха, А. І. Ковальов, А. В. Грушовинчук // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. –2017. –№ 1. – С. 138–149.

342. Chen, L., Gao, D., Cheng, M., Cai, Y., & Guo, L. (2022). Effect of special-shaped nozzle structure on water jet performance. Processes, 10(10), Article 2066.

343. Gałaj, J., & Bąk, S. (2014). Investigation of the influence of nozzle inclination angle and output on the size of sprinkling area and intensity of the spray. Proceedings of International Conference “Fire Protection 2014”, Ostrava, September 2–4, 2014, 64–69.

344. Gałaj, J., & Koszykowski, R. (2014). Badanie wpływu położenia kątowego i wydajności wybranego działka pożarniczego na proces rozpadu prądu zwartego na strumień rozpylony. Logistyka, 6, 3736–3747.

345. Bashitialshaaer, R., Larson, M., & Persson, K. M. (2012). An experimental investigation on inclined negatively buoyant jets. Water, 4(3), 720–738.

346. Bense, A., Lizee, M., Guillet, T., & Gallot, G. (2022). Spatial distribution of air bubbles created by an impinging water jet into a free water surface. Emergent Scientist, 6(3), Article 3. 7 p.

347. Slavchev, H. D., & Raykova, M. (2011). Vodny turbini [Water turbines]. Gabrovo: University Publishing House "V. Aprilov". 228 p. ISBN 978-954-683-456-0.

348. Raykova, M. (2013). Turbopompi, ventilatori i turbokompressori [Turbopumps, fans and turbocompressors] (2nd ed.). Gabrovo: University Publishing House "Vasil Aprilov". 224 p.

349. Балістика крапель розпилених вогнегасних рідин [Текст] / В. П. Ольшанський, С. В. Ольшанський, О. М. Ларін, Є. М. Фомін. – Біла Церква: видавець Пшонківський О. В., 2006. – 124 с.

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

351. Gałaj, J., Drzymała, T., & Tabaka, D. (2016). Analiza wpływu wydajności na rozkład średnic kropel w strumieniu rozpylonym wytwarzanym przez prądownicę Turbo Master 52. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, 43(3), 51–62.

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

353. European Committee for Standardization. (2015). EN 16712-3:2015 Portable equipment for projecting extinguishing agents supplied by fire fighting pumps – Portable foam equipment – Part 3: Low and medium expansion hand-held foam branchpipes PN 16. Brussels: European Committee for Standardization (CEN). 18 p.

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

355. Росоха С. В., Грицина І. Н., Виноградов С. А. Експериментальне визначення швидкості краплинного потоку вогнегасної рідини, необхідної для гасіння газового факела / С. В. Росоха, І. Н. Грицина, С. А. Виноградов // Проблеми пожежної безпеки: зб. наук. пр. / НУГЗ. – Харків, 2011. – Вип. 30. – С. 205–208.

356. Kutz, M. (Ed.). (2013). Handbook of engineering measurements. Vol. 2: Measurements in science and engineering. Hoboken, NJ: Wiley. 672 p.

357. Жартовський С. В., Коваль О. Д., Маладика І. Г., Кришталь В. М. Дослідження реалогічних властивостей водної вогнегасної речовини ФСГ–2 / С. В. Жартовський, О. Д. Коваль, І. Г. Маладика, В. М. Кришталь // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2011. –№ 9. – С. 53–60.

358. Стась С. В. Реологічні особливості поверхнево-активних добавок, що використовуються для піноутворення / С. В. Стась // Вісн. Нац. техн. ун-ту України "КПІ". Сер. Машинобудування. – 2013. – Вип. 2. – С. 19–24;

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.

359. Nyzhnyk, Taras & Mahlovana, Tetiana & Strikalenko, Tatyana & Kolesnikov, Denis & Zemlianskyi, Oleh & Stas, Serhiy & Kopytin, Dmytro. (2025). Experimental study of the hydrodynamically reagent for energy saving. Ecological Engineering & Environmental Technology.

360. 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.

361. Clarke, F. B. (1991). Fire hazards of materials, an overview. In NFPA handbook (17th ed., pp. 3–15). Quincy, MA: National Fire Protection Association.

362. 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.

363. International Fire Service Training Association. (2024). Essentials of fire fighting: Firefighter I & II. Stillwater, OK: Fire Protection Publications. 1168 p.

364. Speer, K., & Goodrick, S. (Eds.). (2022). Wildland fire dynamics: Fire effects and behavior from a fluid dynamics perspective. Cambridge: Cambridge University Press. 350 p.

365. Прокопенко Т. О. Теорія систем і системний аналіз: навч. посібник / Т. О. Прокопенко. –Черкаси: ЧДТУ, 2019. –140 с.

366. Snytyuk, V., & Kucher, P. (2014). Problem and mathematical models for rescue technics acquisition. International Journal “Information Theories and Applications”, 21(1), 60–64.

367. Kryshtal, V., & Snytyuk, V. (2016). System analysis of formation rescuing equipment sets. International Journal “Information Technologies and Knowledge”, 10(1), 91–99.

368. Кучер П., Снитюк В. Формалізація задачі комплектування та еволюційні аспекти її розв’язання [Текст] / П. Кучер, В. Снитюк // Штучний інтелект. – 2009. – № 4. – С. 268–273.

369. Karwa, R. (2020). Heat and mass transfer. Singapore: Springer. 1172 p.

370. Dincer, I., & Rosen, M. A. (2013). Exergy: Energy, environment and sustainable development (2nd ed.). London: Elsevier. 596 p.

371. Стась С. В., Яхно О. М., Семінська Н. В., Колесніков Д. В. Розрахунок характеристик нестабільного потоку в'язкої рідини в полі дії масових сил / Technical University of Gabrovo, ISC UniTech, 2011. – Т. II. – С. 397–401.\

372. Стась С. В. Врахування стисливості рідини за неусталеної течії в напірних трубопроводах систем пожежогасіння / О. М. Яхно, С. В. Стась, Р. М. Гнатів// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – № 3/7. – С. 38–42; 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 : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2017. С. 154–156.

373. Stas, S. V. Experimental research of hydrodynamics of flows with a variable along the length mass/ S. Stas, D. Kolesnikov, O. Yakhno// Journal of the Technical University of Gabrovo. – 2017. – Vol. 54. – P. 23–26; Стась С. В., Колесников 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 : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2016. С. 179–181.

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

375. Стась С. В., Шкарабура М. Г., Бурляй І. В. Розробка комбінованої системи виявлення і гасіння пожеж у житлових приміщеннях / С. В. Стась, М. Г. Шкарабура, І. В. Бурляй // Вісник Черкаського державного технологічного інституту. –2005. –№ 3. – С. 125–127.

376. National Fire Protection Association. NFPA 72: National Fire Alarm and Signaling Code Handbook. –Quincy, MA: NFPA, 2016. –369 c.

377. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: підручник. –Київ: Фірма «Інкос», Центр навчальної літератури, 2006. –616 с.

378. Карпенчук І. В., Грачулін А. В. Реологічні особливості руху піни в рукавній системі / І. В. Карпенчук, А. В. Грачулін // Пожежна безпека: теорія і практика: Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. –Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011. – С. 103–106; Стась С. В. Визначення сили розтягу напірного пожежного рукава при транспортуванні води. Гідроаеромеханіка в інженерній практиці. Матеріали науково-технічної конференції. 2023. С. 40–43.

379. Карпенчук І. В., Кравцов А. М., Шкутник В. А. Застосування нових технічних рішень для підвищення дальності подачі вогнегасних речовин

лафетними стволами / І. В. Карпенчук, А. М. Кравцов, В. А. Шкутник // Пожежна безпека: теорія і практика: Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011. – С. 113–114.

380. Басманов О. Є., Михайлюк А. О. Моделювання нагріву водної плівки, що стікає по стінці резервуара / О. Є. Басманов, А. О. Михайлюк // Проблеми пожежної безпеки. – 2010. – № 28. – С. 42–46.

381. Басманов О. Є., Михайлюк А. О. Взаємодія водяного струменя зі стінкою резервуара під час його охолодження в умовах пожежі / О. Є. Басманов, А. О. Михайлюк // Проблеми пожежної безпеки. – 2009. – № 25. – С. 14–20.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор «Компанія «ТІТАЛ»
_____ П. П. Брицький
«13» _____ 2013 року

Акт
впровадження результатів дисертації С. В. Стася на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Ми, що підписалися нижче, генеральний директор Брицький Павло Петрович, заступник директора, к.т.н. Хлапук Андрій Миколайович, інженер-конструктор Малашин Євген Миколайович, склали цей акт у тому, що результати дисертації С. В. Стася стали основою методики удосконалення системи вибору обладнання протипожежної техніки при проектуванні пожежної автоцистерни АЦ 2,0-40(30) (Hyundai) та пожежної автоцистерни АЦ 8,0-40 (КамАЗ, 6х6). 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), та на 6,1% при потужності двигуна 181 кВт для пожежної автоцистерни АЦ 8,0-40 (КамАЗ, 6х6).

Окрім того, на майданчику випробувань були проведені стендові експерименти із застосуванням експериментального пожежного ствола кавітаційного типу (Пат. 60500 U України, МПК A62C 31/00. Пожежний ствол./ Стась С.В. та ін.), що забезпечив розпил гідравлічного струменя дисперсністю 30…300 мкм при значенні тиску на виході ствола 0,6 МПа та витраті рідини 3,7 л/с, дальність подачі хмари склала 10 м при наявності супутньої складової вітру 0,5 м/с.

Запропоновані у роботі положення впроваджені в практичну діяльність ТОВ «Завод з виробництва пожежної техніки «ТІТАЛ» при формуванні технічного завдання з вибору насосного обладнання пожежно-рятувальних автомобілів в процесі їх проектування та виготовлення.

Директор П.П. Брицький

Заступник директора А.М. Хлапук

Інженер-конструктор, кандидат технічних наук Є.М. Малашин

ЗАТВЕРДЖУЮ
Начальник Головного управління
Державної служби України з
надзвичайних ситуацій у
Дніпропетровській області
кандидат технічних наук
Андрій КУЛЬБАЧ
«12» 05 2019 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Стася С. В. на тему «Розвиток наукових основ створення технічних засобів генерування струменів водної вогнегасної речовини»

Комісія в складі: голови заступника начальника Головного управління з реагування на надзвичайні ситуації полковника служби цивільного захисту Шевченка Олександра Володимировича, членів: начальника оперативно-координаційного центру Головного управління полковника служби цивільного захисту Кушнірука Олега Васильовича, начальника управління реагування на надзвичайні ситуації Головного управління підполковника служби цивільного захисту Корінного Сергія Сергійовича проаналізувала результати дисертаційної роботи Стася С. В. на тему «Розвиток наукових основ створення технічних засобів генерування струменів водної вогнегасної речовини».

За результатами дослідження конструкцій струминоформувального протипожежного обладнання та гідродинамічних особливостей вогнегасних рідин встановлено, що у роботі запропоновано пов'язувати значення тиску на вході пожежних стволів із параметрами вогнегасних струменів на їх виході. Для уточнення розрахунків щодо конструкції ручного диспергувального ствола РСД-2 та лафетного диспергувального ствола ПЛСД-2 проводилися натурні експерименти з метою виявлення основних закономірностей формування струменів для генерування розпилених потоків рідини на велику відстань.

Використання методики розрахунку гідродинамічних характеристик потоку вогнегасної рідини у пожежних стволах сприяє реалізації державної політики у сфері цивільного захисту, а саме захисту населення від надзвичайних ситуацій підрозділами ДСНС України у Дніпропетровській області, за рахунок застосування сучасних вітчизняних розробок пожежних стволів.

Голова комісії: _____ полковник служби ЦЗ Шевченко О.В.

Члени комісії: _____ полковник служби ЦЗ Кушнірук О.В.

_____ підполковник служби ЦЗ Корінний С.С.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Начальник ГУ ДСНС України
у Запорізькій області

Олексій ЛЕПСЬКИЙ
_____ 2020 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Стася Сергія Васильовича тему «Розвиток наукових основ створення технічних засобів генерування струменів водної вогнегасної речовини»

Комісія в складі: голови полковника служби цивільного захисту Пуги Олексія Олексійовича, членів: полковника служби цивільного захисту Си чова Олександра Вікторовича, полковника служби цивільного захисту Федосова Олексія Володимировича проаналізувала результати дисертаційної роботи Стася С. В . на тему «Розвиток наукових основ створення технічних засобів генерування струменів водної вогнегасної речовини».

Під час аналізу було встановлено, що робота присвячена особливостям генерування водяних вогнегасних струменів, конструктивним особливостям пожежних стволів, насадок, гідравлічного пожежного обладнання. Вона має актуальність, наукову новизну та практичне значення для підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту.

У роботі вдалося уточнити сучасні уявлення про формування водяних струменів низького тиску, що найчастіше застосовуються практичними підрозділами ДСНС України з надзвичайних ситуацій. Вважливо, що провівши ряд досліджень, було запропоновано визначати значення тиску на вході до пожежних стволів чи іншого гідравлічного пожежного обладнання, щоб отримати струмені з потрібними параметрами для виконання необхідних завдань при проведенні різних аварійно-рятувальних робіт, пожежогасіння, очищення завалів й руйнування конструкцій тощо.

Використання результатів дослідження Стася С. В. Дозволить модернізувати існуючі системи гідравлічного пожежного обладнання у підрозділах ГУ ДСНС України у Запорізькій області.

Голова комісії: _____ полковник с.ц.з., Олексій ПУГА

Члени комісії: _____ полковник с.ц.з., Олександр СИЧОВ

_____ полковник с.ц.з., Олексій ФЕДОСОВ

Затверджую
перший проректор з навчальної
роботи Національного університету
цивільного захисту України
полковник служби цивільного захисту

Олександр ДЖУЛАЙ
«02» 07 2025

А К Т

про впровадження результатів дисертаційної роботи «Розвиток наукових основ створення технічних засобів генерування струменів водної вогнегасної речовини» Стася Сергія Васильовича в освітній процес кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України

Комісія у складі: заступника начальника кафедри державного нагляду у сфері пожежної т а техногенної безпеки навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки Олени ПЕТУХОВОЇ та доцента кафедри Дениса КОЛЕСНІКОВА засвідчує, що при підготовці бакалаврів за освітньо професійними програмами «Пожежна безпека», «Пожежогасіння та аварійно рятувальні роботи» у галузі знань 26 «Цивільна безпека» за спеціальністю 261 «Пожежна безпека» дисципліни «протипожежне водопостачання» використовуються результати дисертаційного дослідження Стася С. В., а саме застосовуються експериментальний стенд генерування водяних струменів та стенд моделювання течії рідини із змінною вздовж потоку масою рідини при вивченні питань енергетичних втрат під час транспортування вогнегасних рідин трубопроводами систем автоматичного водяного пожежогасіння.

Заступник начальника кафедри
ДНСПТБ ННІ ПТБ,
кандидат технічних наук, доцент Олена ПЕТУХОВА

Доцент кафедри
ДНСПТБ ННІ ПТБ,
кандидат технічних наук, доцент Денис КОЛЕСНІКОВ

Старший викладач кафедри
ДНСПТБ ННІ ПТБ Олександр СІПКО

Затверджую
Ректор Черкаського Державного
технологічного університету
Олег ГРИГОР
«___» _____ 2025

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
«РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ГЕНЕРУВАННЯ СТРУМЕНІВ ВОДНОЇ ВОГНЕГАСНОЇ РЕЧОВИНИ»
Стася Сергія Васильовича
в освітній процес кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Черкаського державного технологічного університету

Комісія у складі: Сергія ГОЛУБА, д.т.н., проф.; Олександра ПІВНЯ, к. фіз.-мат.н.; Володимира САЛАПАТОВА, к.т.н., доц. засвідчує наступне.

При підготовці бакалаврів за освітньо-професійною програмою «Інженерія програмного забезпечення» спеціальності 121 - Інженерія програмного Забезпечення у курсі лекцій і лабораторних занять дисципліни «Конструювання програмного забезпечення» використовуються результати дисертаційного дослідження, а саме:

- розрахункові програми візуалізації параметрів імпульсних і пульсуючих струменів Tube1.0 та Tube1.1;
- моделювання процесу руху вогнегасної речовини в обмеженому об'ємі шляхом підбору її параметрів.

Завідувач кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Черкаського державного технологічного університету, д.т.н., проф. Сергій ГОЛУБ

Доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Черкаського державного технологічного університету, к.фіз.-мат.н., доц. Олександр ПІВЕНЬ

Доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Черкаського державного технологічного університету, к.т.н., доц. Володимир САЛАПАТОВ

ДОДАТОК Б. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ 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 : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2017. 100 с.

9. Колесніков Д. В., **Стась С. В.**, Мигаленко К. І. Створення розпилених струменів води для автоматичних установок пожежогасіння : монографія. Черкаси : ЧІПБ 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 Н. 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 Національного технічного університету України «КПІ». Серія 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. ISSN 1310–6686.

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. ISSN 1310–6686.

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. ISSN 2603–378X.

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. ISSN 1310–6686. DOI: 10.62853/XQCZ2078.

Патенти:

43. Патент України 58516 U, МПК A62C 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 A62C 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 A62C 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 A62C 31/00, A62C 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 A62C 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, що 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 ІІ Міжнародної науково-практичної конференції «Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту».* Черкаси : ЧІПБ. 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 : ЧІПБ імені Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2014. С. 96–97. (Форма участі – очна).

59. **Стась С. В.**, Колесников 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 : ЧІПБ 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 : ЧІПБ 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 : ЧІПБ 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 : ЧІПБ 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 : ЧІПБ 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).