

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ЦИВІЛЬНОГО
ЗАХИСТУ

**АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ
МОДЕЛЮВАННЯ РИЗИКІВ
І ЗАГРОЗ ВИНИКНЕННЯ
НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ
ІНФРАСТРУКТУРИ**

2016

ISBN 978-966-7792-05-3

**Матеріали II-ої
міжнародної конференції**

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ**



**ПРАЦІ II-ої МІЖНАРОДНОЇ
НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ**

**«АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ РИЗИКІВ І ЗАГРОЗ ВИНИКНЕННЯ
НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ОБ'ЄКТАХ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ»**

26-28 травня 2016

Київ, Україна

Організаційний комітет:

Голова Оргкомітету: генерал-майор сл.ц.з. КРОПИВНИЦЬКИЙ Віталій Станіславович, начальник Українського науково-дослідного інституту цивільного захисту (УкрНДЦЗ), Україна;

Співголова оргкомітету: д.т.н., проф., ПОПОВ Михайло Олексійович, заступник директора з наукової роботи Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України;

Співголова оргкомітету: член-кореспондент НАН України, д.т.н., проф. ТРОФИМЧУК Олександр Миколайович, во директора Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору;

Співголова оргкомітету: член-кореспондент НАН України, д.т.н., проф. ЛИСИЧЕНКО Георгій Віталійович, директор ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»;

Заступник голови: ЄВДІН Олександр Миколайович, перший заступник начальника УкрНДЦЗ, Україна;

Заступник голови: полковник сл. ц.з. БОРИС Олександр Павлович, заступник начальника УкрНДЦЗ, Україна.

проф. Мирослав КЕЛЕМЕН, PhD, бриг. ген., ректор Вищої школи менеджменту безпеки в Кошицях, Словацька Республіка;

плк., проф. Павел НЕЧАС, PhD., проректор з науки, досліджень і міжнародних відносин, Вищої школи менеджменту безпеки в Кошицях, Словацька Республіка;

плк. інж. Штефан ГАЛЛА, PhD., директор інституту пожежно-технічної та експертної оцінки Міністерства внутрішніх справ, Словацька Республіка;

доц. Растислав КАЗАНСЬКИЙ, PhD, зав. каф. досліджень безпеки, Університет Матея Бела в Банській Бистриці, Словацька Республіка;

ген. ІСОСРІМ, почесний доктор, Йозеф ЗЯТЬКО, Словацька Республіка.

проф., д. Ян МАЦИЄВСЬКИЙ, Університет Вроцлавський, Республіка Польща;

др. інж. Вальдемар ГАЙДА, ректор Варшавської вищої школи управління, Республіка Польща;

др. Юліуш ПІВОВАРСЬКИЙ, ректор Вищої школи публічної і індивідуальної безпеки «Апейрон», Республіка Польща;

д.ю.н., проф., Віктор ПОРАДА, Вища школа в Карлових Варах, Чеська Республіка;

доц., к.т.н. Володимир ЗУБЕК, Вища школа в Карлових Варах, Чеська Республіка;

д.т.н., проф. Бедріх ШЕСТАК, каф. Кризового менеджменту, Поліцейська академія Чеської Республіки в Празі;

д.т.н., доц. Йозеф САБОЛ, каф. Кризового менеджменту, Поліцейська академія Чеської Республіки в Празі.

ЛІТВІНОВ Юрій Миколайович, директор ТОВ «НТУ СЕРВІС», Литовська Республіка.

д.ф.-м.н., проф., КЛИМЕНКО Віталій Петрович, заступник директора з наукової роботи інституту проблем математичних машин та систем;

д.т.н., НІКУЛІН Олександр Федорович, начальник науково-дослідного центру інноваційних технологій УкрНДЦЗ, Україна;

д.ф.м.н., проф., ДІВІЗІНЮК Михайло Михайлович, заступник директора з наукової роботи ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України»;

д.т.н., с.н.с. ЧУМАЧЕНКО Сергій Миколайович, начальник відділу моделювання надзвичайних ситуацій УкрНДЦЗ, Україна.

ISBN 978-966-7792-05-3

ЗМІСТ

V. Štefka Safety education in the czech republic	9
Ю.Ю. Гончаренко, М.М. Дівізінюк, О.В. Фаррахов, О.М. Фурсенко Системи моніторингу низько активних ізотопів для запобігання надзвичайних ситуацій	13
Е.В. Азаренко, О.В. Бляшенко, М.М. Дивизинюк, В.Е. Ковач Системы экологического мониторинга морских захоронений отравляющих веществ	21
Е.В. Азаренко, О.В. Бляшенко, О.В. Алексеева, В.Е. Ковач Математична модель процесу моніторингу радіаційного забруднення промислових та житлових споруд	30
Е.В. Азаренко, Ю.Ю. Гочаренко, М.М. Дивизинюк Защита телеметрической информации на критически важных объектах	42
Є.О. Яковлєв Автореабілітаційне затоплення шахт Донбасу як критичний фактор надзвичайних ситуацій у зоні впливу АТО	49
В.Ф. Кондрат, Я.Й. Лопушанський, М.М. Семерак Вогняні торнадо у містах	59
В.А. Романюк, О.Я. Сова, А.В. Романюк Цільові функції управління вузлами безпроводових сенсорних мереж моніторингу об'єктів критичної інфраструктури	69
С.П. Мосов Застосування безпілотних авіаційних комплексів для вирішення завдань надзвичайних ситуацій: вимоги, проблемні питання та рекомендації	76
Н.В. Пазинич, Л.П. Ліщенко, Г.Б. Крилова, В.Є. Філіпович, М.С. Лубський Дослідження та моніторинг пожежонебезпечних торфовищ на основі матеріалів дистанційного зондування землі	80
Р.М. Білик, В.В. Мендерецький, У.І. Недільська, О.П. Панчук, О.Г. Чорна Навчання з аналізу ризику і управління безпекою в контексті освіти з цивільного захисту та кризового менеджменту	87
С.І. Азаров, В.Л. Сидоренко, А.М. Демків Методика розрахунку видудання ¹³⁷ CS у чорнобильській зоні відчуження після природних пожеж	95
О.Г. Барило, С.П. Потеряйко Модель порівняння якостей керівника за стилями керівництва в умовах ризику	101
І.О. Васильєв Оцінка рівня ризику – головна складова пожежної безпеки	108
П.Б. Волянський, О.П. Євсюков, А.В. Терент'єва Методологічні засади викладання навчального курсу «Управління ризиками у сфері техногенної та природної безпеки»	113
В.О. Тищенко Аналіз ризику – найважливіша складова управління безпекою	118
В.Б. Беликов Концепция индивидуальных программ экологической профилактики, адаптации и реабилитации в условиях техногенных и экологических рисков	122
О.А. Подскальна Приєднання України до механізму цивільного захисту європейського союзу – один із шляхів подальшого вирішення проблем запобігання виникненню надзвичайних ситуацій та захисту об'єктів критичної інфраструктури	127

А.М. Лагоднюк, В.М. Корбутяк, Д.В. Стефанишин Ідентифікація коефіцієнта шорсткості річкових заплав за даними дистанційного зондування для підтримки математичного моделювання повеней на ріках	134
Д.В. Стефанишин Про удосконалення діагностичних моделей регресійного типу для прогнозування поведінки гребель, обладнаних автоматизованими системами моніторингу	135
В.А. Лакно, А.М. Терещук, Т.А. Петренко Адаптивныя системы распознавания кибератак на критически важные компьютерные системы	136
О.В. Євтушенко, А.О. Сірик, П.В. Породько, Т.О. Потапова Удосконалення методу аналізу ризиків виробничого травматизму	142
Н.Ю. Швагер, Д.П. Заїкіна Ідентифікація та управління ризиками на промислових підприємствах, як один із методів поліпшення результатів діяльності	150
О.С. Дацько, Н.М. Параняк, А.С. Романів Майбутнє дисципліни «цивільний захист» після проведення реформи освіти на прикладі національного університету «Львівська політехніка»	156
М.В. Домнічев, О.В. Нестеренко Вибухонебезпечні предмети сучасності, особливості навчання населення	162
О.М. Башкатов Острова тепла у місті, як фактор виникнення зон екологічного ризику	173
А.Ф. Никулин, А.И. Лысенко, С.Н. Чумаченко, Е.Н. Тачинина Новая интерпретация функционала обобщенной работы в задачах оптимального управления малогабаритными БПЛА	181
Н.А. Дубровина, В.В. Бойко, П.Н. Замятин, А.М. Гуров, С. Филип, Д.П. Замятин Моделирование и анализ уровня рисков травматизма и смертности в результате ДТП	187
В.В. Бєгун, В.Ф. Гречанінов, В.П. Клименко, П.П. Кропотов Галузеве керівництво з розробки та реалізації політики управління ризиками	195
А.О. Тропіна, В.В. Малишев Особливості викладання дисципліни «основи охорони праці» для інженерних спеціальностей	201
Ю.Л. Фещук Методичні підходи щодо визначення місць дислокації пожежно-рятувальних підрозділів	207
Т.П. Поведа, В.В. Мендерецький Надзвичайні ситуації нашого часу: актуальні питання на заняттях з безпеки життєдіяльності у ВНЗ	210
В.В. Мохор, В.В. Цуркан, Я.Ю. Дорогий, О.М. Крук Функціональна модель системи керування ризиком безпеки інформації	216
А.Ю. Цина, А.А. Ткаченко Визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки	222
В.В. Ковалишин, Я.Б. Кирилів, О.В. Грушовінчук Обґрунтування параметрів генераторів піни ежекційного типу підвищеної вогнегасної ефективності	231
С.О. Андрєєв Визначення стратегічних пріоритетів державного управління в Україні: цивільна оборона або захист критичної інфраструктури?	241

С.В. Щербіна, О.І. Бріцький, В.А. Ільєнко, І.Д. Белов, В.В. Остапенко, Ю.В. Лісовий, О.А. Цубін, О.П. Дєдов, П.Г. Пігулевський, О.О. Чалий, О.С. Кирилук	
Дослідження провальних явищ в історичній частині Києва на території національного заповідника «Софія Київська»	251
В.М. Чернета	
Дослідження критичної інфраструктури та допустимих значень пожежних ризиків об'єктів України	258
О.А. Крюковська, В.О. Галаганов	
Аналіз техногенних небезпек, пов'язаних з діяльністю промислових підприємств	264
О.І. Лисенко, С.В. Валуйський, С.М. Чумаченко	
Застосування літаючих дронів у безпроводових сенсорних мережах екологічного моніторингу	269
Н.М. Бендасюк, А.И. Лысенко	
Методы проектирования наноспутников для мониторинга чрезвычайных ситуаций	273
A. Gusynin, O. Tachinina, I. Chekanova, O. Lysenko, I. Alekseeva, S. Chumachenko.	
The system of injection of subminiature satellites (nanosatellites) to near-Earth orbit on the basis of an-124-100 and an-225 airplane	278
С.В. Валуйський, О.В. Дакаєв	
Інтелектуальна парковка	293
А.И. Лысенко, С.В. Кашуба	
Применение спутниковых технологий в беспроводных сенсорных сетях	300
О.І. Лисенко, О.М. Тачиніна	
Математичне моделювання руху мобільного сенсора на базі квадрокоптера	306
О.І. Лисенко, О.О. Великий, О.С. Кутельова	
Безпроводові сенсорні мережі екологічного моніторингу побудовані на радіогідроакустичних буях	314
Б.В. Трач, О.І. Лисенко	
Застосування протоколу Bidirectional Forwarding Detection для підвищення надійності безпроводових сенсорних мереж екологічного моніторингу	324
І.В. Уряднікова, С.М. Чумаченко, С.В. Кармазін, О.М. Тесленко	
Застосування експертно-аналітичних методів для оцінювання ризиків надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури	330
Т.О. Прищепа, Т.О. Ханіна	
Сенсорні мережі із літаючим вузлом	341
С.В. Валуйський, В.О. Шилов	
Протоколи мережевого рівня для безпроводових сенсорних мереж моніторингу техногенних об'єктів	349
Н.М. Бендасюк, Н.Ю. Кравчук	
Агрегування даних мультисенсора наносупутникової платформи	355
В.І. Новіков, В.А. Воловик	
Транспортування повільного трафіку в сенсорній мережі з самоорганізацією	363
І.В. Алексєєва, А.О. Заруцька	
Синхронізація у безпроводових сенсорних мережах з використанням швидких і повільних локальних годинників	368
О.І. Лисенко, С.В. Кашуба	
Методи множинного доступу у супутникових каналах сенсорних мереж	375
В.М. Петрова, О.В. Куриленко	
Розвиток інтернету речей	382

А.И. Лысенко, И.В. Чеканова, Е.Н. Тачинина Траектория выведения группы мониторинговых наноспутников	388
Е.Н. Тачинина Условия оптимальности траектории движения группы дронов с мультисенсорами на борту с возможным перенацеливанием	395
Є.В. Гаврилко, О.В. Барабаш Аналіз та управління ризиками застосування формувань під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру	402
М.Yu. Grytsiuk Complex estimation of strategic tourism development options in carpathian region	407
О.О. Попов, В.О. Ковач, А.В. Яцишин, Є.Б. Краснов, М.В. Малков Розробка інформаційно-технічного методу попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних із забрудненням водного середовища	415
С.М. Малашенко, О.О. Смиловенко Выбор рациональных параметров тушения резервуаров подслоинным способом	425
В.В. Кобяк Прогнозирование абразионных риск-процессов на водохранилищах Республики Беларусь	430
А.Н. Скрипко, Л.В. Мисун, В.В. Кобяк Обоснование характеристик средства молниезащиты с разработкой технических решений и рекомендаций по снижению влияния грозových проявлений на здания	436
В.О. Балицька Дослідження радіаційного впливу на матеріали для моніторингу аварійних і екстремальних ситуацій	444
С.О. Ємельяненко, А.І. Івануса Оцінювання пожежних ризиків будівель і споруд громадського призначення	450
И.Ю. Чернявский Радиологические аспекты пространственного распределения поглощённой дозы импульсного гамма-нейтронного излучения военного характера	456
В.О. Маховський, О.А. Крюковська Техногенні та екологічні ризики під час експлуатації автозаправних станцій	464
А.Я. Регуш, В.І. Желяк Рекомендації для гідравлічного розрахунку автоматичних систем водяного пожежогасіння	479
В.М. Стасюк Зростання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій у комунальному водопостачанні як об'єкті критичної інфраструктури в умовах урізноманітнення форм господарювання	484
О.В. Пуляк, С.М. Богомаз-Назарова Професійна підготовка майбутніх учителів до дій в умовах загрози надзвичайних ситуацій	487
Ю.С. Туровець Моделювання воєнно-техногенних впливів застосування ОБТ на структуру ґрунту та процес розповсюдження у ньому забруднення з урахуванням територій розташування об'єктів критичної інфраструктури	492
В.А. Дмитрієв, О.О. Бардін Аналіз можливостей терористичної атаки БПЛА-камікадзе на типову нафтобазу	501
В.М. Безштанько, В.В. Мохор Метод визначення граничних ризиків безпеки інформаційних ресурсів на об'єкті критичної інфраструктури	507

С.М. Чумаченко, С.В. Хоперський, С.О. Пономаренко Комплексна технологія ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС	516
В.В. Бегун, В.Ф. Гречанинов Технічні питання реалізації процедур оцінки і управління ризиками	517
А.А. Бардин Технологический комплекс по управлению защитными свойствами озонового слоя планеты Земля	523
М.В. Возник Правові аспекти легалізації вогнепальної зброї в Україні	531
С.І. Чоланюк Ризики самореалізації жіночої ідентичності в умовах військового колективу	533
В.М. Баланюк, Н.М. Козяр, О.І. Гарасим'юк Обґрунтування вибору компонентів тернарних вогнегасних сумішей, для протипожежного захисту об'єктів з наявністю високотемпературних джерел запалювання	536
С.В. Жартовський Проблемні питання створення системи захисту об'єкта критичної інфраструктури від надзвичайних ситуацій, обумовлених загораннями та пожежами	542
Д.Г. Бобро Методологія оцінки рівня критичності об'єктів інфраструктури	547
S. Ivanyuta The importance of implementation of disaster risk reduction approach in Ukraine	556
С.П. Іванюта Зростання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій різного походження на території АТО	564
R. Kazanský, M. Melková Cyberterrorism and cyberwar as new threats to the security of the state	570
M. Martinská Sociálna podpora rodín vojenského profesionála – možnosti harmonizácie práce a rodiny	577
В.М. Заплатинський, W. Gajda Перспективи освіти з питань безпеки у вищих навчальних закладах України пов'язані з розробкою нових стандартів вищої освіти	590
І.В. Уряднікова, В.Г. Лебедєв, С.М. Чумаченко, С.В. Кармазін, О.М. Тесленко, В.А. Шойко Використання логіко-імовірностних моделей для дослідження нештатних ситуацій теплоенергетичних систем критичної інфраструктури	603
С.В. Мацера, Е.О. Брень Система моніторингу параметрів навколишнього середовища та відеоспостереження в зоні надзвичайних ситуацій на базі гібридних безпілотних літальних апаратів	618
С.М. Чумаченко, В.В. Троцько Підхід до оцінки ризику виникнення пожеж на торфовищах Київської області і вироблення шляхів його зниження з використанням методу аналітичних мереж	621
О.П. Кутовий, Б.А. Вороч Щодо створення та застосування автоматизованої системи управління і контролю (АСУК) надзвичайними ситуаціями (подальший розвиток ПС ДСНС)	629

УДК 614.8

В.В. Ковалишин
д-р техн. наук, проф.

Я.Б. Кирилів
канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

О.В. Грушовінчук
канд. техн. наук

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРАТОРІВ ПІНИ ЕЖЕКЦІЙНОГО ТИПУ ПІДВИЩЕНОЇ ВОГНЕГАСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Змодельовано процес транспортування струменя середньої кратності двома струменями низької кратності. Також визначена оптимальна конструктивна схема розташування струменів. Встановлено вплив вітру на траєкторію узагальненого струменя. У даній роботі також було досліджено взаємодію струменів повітряно-механічної піни різної кратності. На основі теоретичних і експериментальних досліджень визначено оптимальне розташування струменів піни, яке дозволяє досягти максимального значення дальності подачі піни при мінімальних втратах кратності. Результати даного дослідження в подальшому будуть застосовані для розробки дослідного зразка піногенератора.

Ключові слова: *похилі гідравлічні струмені, математична модель, повітряно-механічна піна, рівняння, оптимальна конструктивна схема, кратність піни, дальність подачі піни*

IDENTIFICATION OF PARAMETERS FOR A FOAM GENERATOR WITH IMPROVED EXTINGUISHING EFFECTIVENESS

Initially a model was identified, which revealed the delivery process of a medium-expansion foam jet with the use of two streams of low-expansion foam. Additionally, a model with an optimal configuration of the stream system was identified and a description provided, dealing with the influence of wind on the trajectory of a combined jet. During research, tests were performed on the mutual influence of mechanical foam streams with variations of expanded foam. On the basis of experiments, an optimal location of foam streams was specified, which allows the attainment of maximum results (range) in the distribution of foam with minimal losses. Results from tests may be utilised in the future for the development of an experimental foam generating model.

Key words: *inclined hydraulic stream, mathematical model, mechanical foam, equation, optimal construction scheme, multiple foaming, foam delivery range*

Вступ. Аналіз тактико-технічних можливостей, конструктивних рішень і параметрів таких піногенераторів, що знаходяться на озброєнні ДСНС України, свідчить про обмеженість поєднання дальності і висоти подачі піни з її високою кратністю [1]. Висока кратність піни забезпечує не тільки високу ефективність гасіння пожежі, а й малу дальність і висоту подачі струменя піни, є результатом дуже малої питомої маси і низької початкової швидкості, а отже – найнижчого значення кінетичної енергії струменя.

Мала довжина струменя піни (6-8 м) вимагає наближення пожежного до вогню, що є не завжди можливим, і завжди – небезпечно. Зниження кратності піни призводить до збільшення довжини струменя, але також і до зменшення ефективності гасіння пожежі. З огляду на проблему транспортування піни високої кратності ($K > 200$) до місця пожежі і високу ймовірність руйнування автоматичних установок пожежогасіння, легкозаймисті та горючі рідини найбільш ефективно гасять повітряно-механічною піною середньої кратності ($K = 80 -$

100) або використовують плівкоутворювальні піноутворювачі на основі фторованих та інших поверхнево-активних рідин, здатних утворювати плівку, яка характеризується здатністю до самовідновлення після механічного руйнування. Оптимальна кратність пін, утворена з таких піноутворювачів значно нижче, а відповідно і дальність струменя – вище [1, 2, 3]. Однак широке використання таких піноутворювачів обмежене їхньою високою вартістю, але для підшарового гасіння ці піноутворювачі є дуже ефективні і виправдовують свою вартість. Серію таких досліджень проведено ЛДУБЖД з вітчизняним плівкоутворювальним піноутворювачем Барс AFFF-1, який дешевше закордонних аналогів.

Усунення цих та інших недоліків існуючих генераторів піни неможливо без обґрунтування параметрів і реалізації нових конструктивних рішень, якими ведеться застосування комбінованого принципу транспортування піни, що може об'єднувати переваги конструкцій генераторів піни низької та середньої кратності. Відповідно, одним із шляхів підвищення ефективності пожежогасіння легкозаймистих і горючих рідин і проведення пожежно-рятувальних робіт є розробка і впровадження установок піногенераторів, де паралельні струмені піни низької кратності виконують функцію транспортування струменя середньої кратності в зону горіння [4, 5].

Методи дослідження. З метою дослідження процесу переміщення в повітрі похилих гідравлічних струменів побудуємо математичну модель процесу взаємодії струменів повітряно-механічної піни різної кратності. Розрахунки будуть базуватися на інтегруванні рівнянь руху матеріальних точок з урахуванням опору середовища. При взаємодії одного струменя повітряно-механічної піни (надалі просто піни) середньої кратності (80 – 100) і декількох (чотирьох) струменів піни низької (8 – 10) кратності слід також врахувати сили, що виникають в результаті взаємодії струменів між собою.

З цією метою опишемо рух струменів, спрямованих під кутом, за допомогою рівнянь динаміки кинутих вгору двох або більше абсолютно твердих тіл, умовно пов'язаних між собою силами. При цьому положення тіл в просторі в момент часу t описується двома координатами: $x = x(t)$ і $y = y(t)$ [4].

На основі аналізу літературних даних, приходимо до висновку, що найбільш адекватною є квадратична залежність сили опору струменя при його терті до повітря. Приймаємо коефіцієнт опору [6]:

$$\alpha = \frac{0,316}{\rho D} \quad (1)$$

Також приймемо, що залежність сили взаємодії між струменями від різниці швидкостей цих струменів характеризується квадратичною залежністю.

Спочатку змодельуємо процес транспортування струменя середньої кратності двома струменями низької кратності. Отримаємо систему з шести нелінійних диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} \ddot{x}_0 + \alpha_0 \cdot \dot{x}_0 \cdot (\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2)^{1/2} + \beta \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_1) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_1)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_1)^2)^{1/2} + \beta \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_2) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_2)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_2)^2)^{1/2} &= 0 \\ \ddot{x}_0 + \alpha_0 \cdot \dot{x}_0 \cdot (\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2)^{1/2} + \beta \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_1) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_1)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_1)^2)^{1/2} + \beta \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_2) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_2)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_2)^2)^{1/2} &= -g \\ \ddot{x}_1 + \alpha_1 \cdot \dot{x}_1 \cdot (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2)^{1/2} + \beta \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_0) \cdot ((\dot{x}_1 - \dot{x}_0)^2 + (\dot{y}_1 - \dot{y}_0)^2)^{1/2} &= 0 \\ \ddot{x}_1 + \alpha_1 \cdot \dot{x}_1 \cdot (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2)^{1/2} + \beta \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \cdot ((\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2 + (\dot{y}_1 - \dot{y}_2)^2)^{1/2} &= -g \\ \ddot{x}_2 + \alpha_2 \cdot \dot{x}_2 \cdot (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2)^{1/2} + \beta \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_0) \cdot ((\dot{x}_2 - \dot{x}_0)^2 + (\dot{y}_2 - \dot{y}_0)^2)^{1/2} &= 0 \\ \ddot{x}_2 + \alpha_2 \cdot \dot{x}_2 \cdot (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2)^{1/2} + \beta \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \cdot ((\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2 + (\dot{y}_2 - \dot{y}_1)^2)^{1/2} &= -g \end{aligned} \quad (2)$$

з початковими умовами:

$$\begin{aligned} x_0(0) = 0; \quad y_0(0) = a; \quad \dot{x}_0(0) = v_{00} \cos \Theta_1; \quad \dot{y}_0(0) = v_{00} \sin \Theta_1 \\ x_1(0) = 0; \quad y_1(0) = b; \quad \dot{x}_1(0) = v_{01} \cos \Theta_1; \quad \dot{y}_1(0) = v_{01} \sin \Theta_1; \\ x_2(0) = 0; \quad y_2(0) = c; \quad \dot{x}_2(0) = v_{02} \cos \Theta_2; \quad \dot{y}_2(0) = v_{02} \sin \Theta_2; \end{aligned} \quad (3)$$

Тут, як і раніше, v_0 – швидкість витікання струменя із ствола; Θ – кут нахилу осі ствола до горизонту; α – коефіцієнт взаємодії струменя з атмосферою; β – коефіцієнт взаємодії струменів між собою. Індексом «0» позначимо струмінь піни середньої кратності, а індексами «1, 2» – струмені піни низької кратності. Константи a ; b ; c визначаються відповідно до схем розташування стволів низької кратності «1, 2, ... n» щодо ствола середньої кратності «0».

Також запишемо умову, за якої буде відбуватися взаємодія між струменями:

$$\text{Если } |y_1 - y_0| > Y_1 \text{ то } \beta = 0$$

$$\text{Если } |y_1 - y_0| \leq Y_1 \text{ то } \beta \neq 0 \quad (4)$$

де Y_1 – значення вертикальної відстані між струменями і визначається зі схеми розташування струменів. Таку умову слід записувати для кожного струменя низької кратності.

Постійні величини, що входять у формули математичної моделі представимо в таблиці 1.

Таблиця 1

Постійні величини, що входять у формули математичної моделі

Струмінь з індексом «0»:	Струмінь з індексом «1; 2;...n»:
<ul style="list-style-type: none"> повітряно-механічна піна середньої кратності $K = 100$; діаметр струменя $D_0 = 315$ мм (піногенератор ГПС-600); питома густина піни $\rho_0 = 10$ кг/м³; динамічна в'язкість піни $\mu_0 = 0,182$ Па·с. 	<ul style="list-style-type: none"> повітряно-механічна піна низької кратності $K = 10$; діаметр струменя $D_1 = 42$ мм (ствол СВП-2); питома густина піни $\rho_1 = 100$ кг/м³; динамічна в'язкість піни $\mu_1 = 0,0135$ Па·с;

Коефіцієнти опору струменів при їх взаємодії з повітрям складають: $\alpha_1 = 0,316 / (10 \cdot 0,3) = 0,1053$ м⁻¹; $\alpha_0 = 0,316 / (100 \cdot 0,042) = 0,0752$ м⁻¹; $\Theta_1 = \Theta_2 = 30^\circ$; $v_{00} = 12,45$ м/с; $v_{01} = 35,33$ м/с (орієнтовні значення для ствола СВП-2 і піногенератора ГПС-600).

Результати. Для визначення величини коефіцієнта β від величини відносної швидкості струменів були проведені попередні експериментальні і теоретичні дослідження на експериментальній установці, яка складалася з двох повітряно-пінних стандартних стволів СПП-2 і одного стандартного піногенератора ГПС-600 з'єднаних між собою. Результати експериментальних досліджень при різних умовах ($p = 5, 7, 10$ ат. і $\Theta = 30^\circ; 45^\circ$) були порівняні з результатами рішення системи диференціальних рівнянь (2) (після підстановки відповідних значень) методом Рунге-Кутта в програмному середовищі MATLAB.

Таблиця 2

Теоретичні дослідження дальності польоту струменя при $\Theta = 30^\circ$

v_{00} ; (м/с)	10,53	12,45	14,88
v_{01} ; (м/с)	29,84	35,33	42,2
L_0 ; (м)	13,67	15,59	17,68
L_1 ; (м)	13,82	15,77	17,90
$L_1 - L_0$; (м)	0,15	0,18	0,22
$(L_1 + L_0) / 2$; (м)	13,75	15,68	17,79
Експер. L (м)	14,10	16,20	18,5
δ , (%)	2,48	3,21	3,84
$\delta_{\text{сер}}$, (%)	3,18		

Отримані результати (середнє значення похибки становить 3,18%) доводять, що теоретичні дослідження процесу транспортування струменя повітряно-механічної піни середньої кратності струменем (струменями) такої ж піни низької кратності слід проводити за системою нелінійних диференціальних рівнянь (2) з початковими умовами (3) і умовами

існування фази взаємодії між струменями (3). Коефіцієнт α , який характеризує взаємодію струменів з повітрям, слід визначати за формулою (1). При цьому $\beta = 64$.

Визначимо оптимальну конструктивну схему розташування струменів. Аналогічно (2) складаємо рівняння для одного центрального струменя піни середньої кратності і чотирьох струменів піни низької кратності, що взаємодіють з центральним:

$$\begin{aligned}
 & \mathbb{H} + \alpha_0 \cdot \mathbb{E} \cdot (\mathbb{E} + \mathbb{E})^{1/2} + \beta_1 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} + \\
 & + \beta_2 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} + \beta_3 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} + \\
 & + \beta_4 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} = 0 \\
 & \mathbb{H} + \alpha_0 \cdot \mathbb{E} \cdot (\mathbb{E} + \mathbb{E})^{1/2} + \beta_1 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} + \\
 & + \beta_2 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} + \beta_3 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} + \\
 & + \beta_4 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} = -g \\
 & \mathbb{H} + \alpha_1 \cdot \mathbb{E} \cdot (\mathbb{E} + \mathbb{E})^{1/2} - \beta_1 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} = 0 \\
 & \mathbb{H} + \alpha_1 \cdot \mathbb{E} \cdot (\mathbb{E} + \mathbb{E})^{1/2} - \beta_1 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} = -g \\
 & \mathbb{H} + \alpha_2 \cdot \mathbb{E} \cdot (\mathbb{E} + \mathbb{E})^{1/2} - \beta_2 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} = 0 \\
 & \mathbb{H} + \alpha_2 \cdot \mathbb{E} \cdot (\mathbb{E} + \mathbb{E})^{1/2} - \beta_2 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} = -g \\
 & \mathbb{H} + \alpha_3 \cdot \mathbb{E} \cdot (\mathbb{E} + \mathbb{E})^{1/2} - \beta_3 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} = 0 \\
 & \mathbb{H} + \alpha_3 \cdot \mathbb{E} \cdot (\mathbb{E} + \mathbb{E})^{1/2} - \beta_3 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} = -g \\
 & \mathbb{H} + \alpha_4 \cdot \mathbb{E} \cdot (\mathbb{E} + \mathbb{E})^{1/2} - \beta_4 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} = 0 \\
 & \mathbb{H} + \alpha_4 \cdot \mathbb{E} \cdot (\mathbb{E} + \mathbb{E})^{1/2} - \beta_4 \cdot (\mathbb{E} - \mathbb{E}) \cdot ((\mathbb{E} - \mathbb{E})^2 + (\mathbb{E} - \mathbb{E})^2)^{1/2} = -g
 \end{aligned} \tag{5}$$

Вибираємо три різні варіанти розташування струменів (рис. 1):

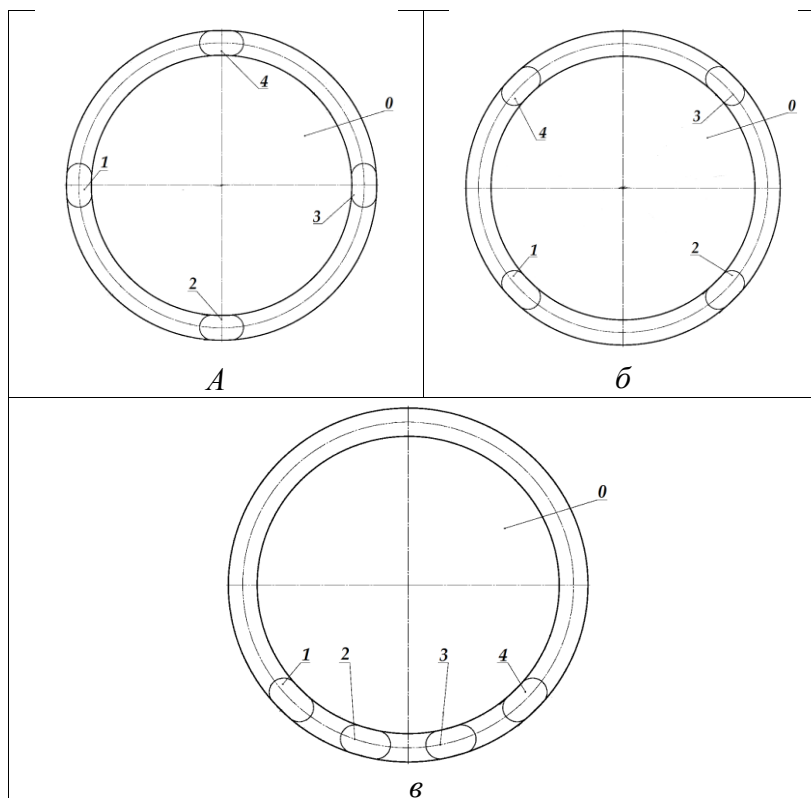
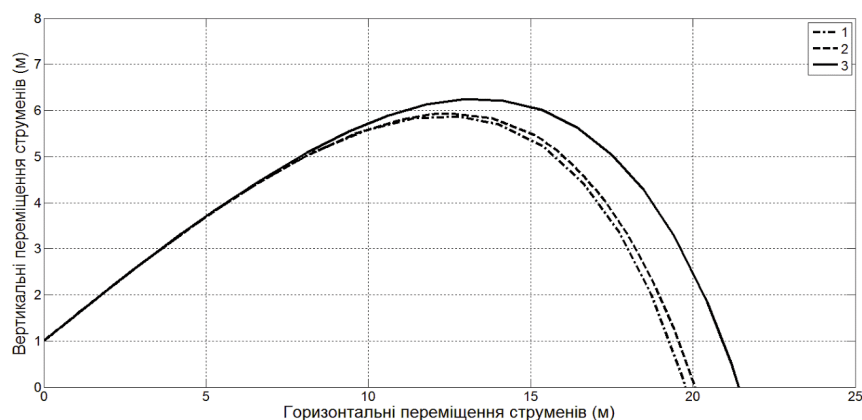


Рис. 1. Варіанти конструктивних схем розміщення струменів:

а – підтримуючі струмені розміщені через кожні 90°; *б* – підтримуючі струмені розміщені через кожні 90° зі зміщенням 45°; *в* – підтримуючі струмені розміщені знизу, де 0 – нульовий струмінь піни середньої кратності; 1, 2, 3, 4 – підтримуючі струмені піни низької кратності

На основі рішення системи рівнянь було проведено аналіз траєкторій переміщення струменів, режимів спільного руху струменів, процесів вирівнювання швидкостей. Встановлено, що найбільш ефективною з точки зору дальності польоту є третя схема (рис. 2), а ефективність двох попередніх схем практично однаковою.



Горизонтальні переміщення струменів (м)

Рис. 2. Траєкторії переміщення струменів пінної середньої кратності:

1 – використання конструктивної схеми *a* (рис. 1); 2 – використання конструктивної схеми *б* (рис. 1); 3 – використання конструктивної схеми *в* (рис. 1)

Необхідно також дослідити вплив вітру на траєкторію узагальненого струменя. При зустрічному вітрі в систему рівнянь (5) введемо швидкість вітру V в горизонтальну складову швидкості струменів і отримаємо систему рівнянь (6)

$$\begin{aligned}
 & \ddot{x} + \alpha_0 \cdot (\dot{x} + k \cdot V) \cdot ((\dot{x} + k \cdot V)^2 + \dot{y}^2)^{1/2} + \beta_1 \cdot (\dot{x} - \dot{x}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} + \\
 & + \beta_2 \cdot (\dot{x} - \dot{x}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} + \beta_3 \cdot (\dot{x} - \dot{x}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} + \\
 & + \beta_4 \cdot (\dot{x} - \dot{x}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} = 0 \\
 & \ddot{y} + \alpha_0 \cdot \dot{y} \cdot ((\dot{x} + k \cdot V)^2 + \dot{y}^2)^{1/2} + \beta_1 \cdot (\dot{y} - \dot{y}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} + \\
 & + \beta_2 \cdot (\dot{y} - \dot{y}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} + \beta_3 \cdot (\dot{y} - \dot{y}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} + \\
 & + \beta_4 \cdot (\dot{y} - \dot{y}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} = -g \\
 & \ddot{x} + \alpha_1 \cdot (\dot{x} + k \cdot V) \cdot ((\dot{x} + k \cdot V)^2 + \dot{y}^2)^{1/2} - \beta_1 \cdot (\dot{x} - \dot{x}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} = 0 \\
 & \ddot{x} + \alpha_1 \cdot \dot{y} \cdot ((\dot{x} + k \cdot V)^2 + \dot{y}^2)^{1/2} - \beta_1 \cdot (\dot{y} - \dot{y}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} = -g \\
 & \ddot{x} + \alpha_2 \cdot (\dot{x} + k \cdot V) \cdot ((\dot{x} + k \cdot V)^2 + \dot{y}^2)^{1/2} - \beta_2 \cdot (\dot{x} - \dot{x}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} = 0 \\
 & \ddot{x} + \alpha_2 \cdot \dot{y} \cdot ((\dot{x} + k \cdot V)^2 + \dot{y}^2)^{1/2} - \beta_2 \cdot (\dot{y} - \dot{y}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} = -g \\
 & \ddot{x} + \alpha_3 \cdot (\dot{x} + k \cdot V) \cdot ((\dot{x} + k \cdot V)^2 + \dot{y}^2)^{1/2} - \beta_3 \cdot (\dot{x} - \dot{x}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} = 0 \\
 & \ddot{x} + \alpha_3 \cdot \dot{y} \cdot ((\dot{x} + k \cdot V)^2 + \dot{y}^2)^{1/2} - \beta_3 \cdot (\dot{y} - \dot{y}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} = -g \\
 & \ddot{x} + \alpha_4 \cdot (\dot{x} + k \cdot V) \cdot ((\dot{x} + k \cdot V)^2 + \dot{y}^2)^{1/2} - \beta_4 \cdot (\dot{x} - \dot{x}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} = 0 \\
 & \ddot{x} + \alpha_4 \cdot \dot{y} \cdot ((\dot{x} + k \cdot V)^2 + \dot{y}^2)^{1/2} - \beta_4 \cdot (\dot{y} - \dot{y}) \cdot ((\dot{x} - \dot{x})^2 + (\dot{y} - \dot{y})^2)^{1/2} = -g
 \end{aligned} \tag{6}$$

Вирішивши цю систему для кожного з 3 варіантів розміщення струменів, отримаємо переміщення і швидкості струменів при впливі зустрічного вітру. Можна зробити висновок, що вітер швидкістю 5 м/с є серйозною перешкодою для пінних струменів, проте дальність польоту 12 м при 3 варіантах все ж вказує на можливість ефективного використання установки для гасіння пожеж в умовах зустрічного вітру. Конструктивні схеми 1 і 2 мають меншу стійкість при зустрічному вітрі, а схема 2 (два струмені внизу під центральним) є ефективнішою за схему 1 (один струмінь) – 11,5 м і 11 м відповідно.

Для врахування дії бічного вітру в систему рівнянь 6 слід ввести ще одну координату – координату Z, що призведе до зростання кількості рівнянь, а вітер V тепер буде діяти саме по цій координаті. Виконавши ці перетворення отримаємо систему диференціальних рівнянь 7.

$$\begin{aligned}
& \ddot{x}_0 + \alpha_0 \cdot \dot{x}_0 \cdot (\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2 + (\dot{z}_0 + k \cdot V)^2)^{1/2} + \beta_1 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_1) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_1)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_1)^2 + (z_0 - z_1)^2)^{1/2} + \\
& + \beta_2 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_2) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_2)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_2)^2 + (z_0 - z_2)^2)^{1/2} + \\
& + \beta_3 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_3) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_3)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_3)^2 + (z_0 - z_3)^2)^{1/2} + \\
& + \beta_4 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_4) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_4)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_4)^2 + (z_0 - z_4)^2)^{1/2} = 0 \\
& \ddot{y}_0 + \alpha_0 \cdot \dot{y}_0 \cdot (\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2 + (\dot{z}_0 + k \cdot V)^2)^{1/2} + \beta_1 \cdot (\dot{y}_0 - \dot{y}_1) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_1)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_1)^2 + (z_0 - z_1)^2)^{1/2} + \\
& + \beta_2 \cdot (\dot{y}_0 - \dot{y}_2) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_2)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_2)^2 + (z_0 - z_2)^2)^{1/2} + \\
& + \beta_3 \cdot (\dot{y}_0 - \dot{y}_3) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_3)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_3)^2 + (z_0 - z_3)^2)^{1/2} + \\
& + \beta_4 \cdot (\dot{y}_0 - \dot{y}_4) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_4)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_4)^2 + (z_0 - z_4)^2)^{1/2} = -g \\
& \ddot{z}_0 + \alpha_0 \cdot (\dot{z}_0 + k \cdot V) \cdot (\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2 + (\dot{z}_0 + k \cdot V)^2)^{1/2} + \beta_1 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_1) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_1)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_1)^2 + (z_0 - z_1)^2)^{1/2} + \\
& + \beta_2 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_2) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_2)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_2)^2 + (z_0 - z_2)^2)^{1/2} + \\
& + \beta_3 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_3) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_3)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_3)^2 + (z_0 - z_3)^2)^{1/2} + \\
& + \beta_4 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_4) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_4)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_4)^2 + (z_0 - z_4)^2)^{1/2} = 0 \\
& \ddot{x}_1 + \alpha_1 \cdot \dot{x}_1 \cdot (x_1^2 + \dot{y}_1^2 + (\dot{z}_1 + k \cdot V)^2)^{1/2} - \beta_1 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_1) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_1)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_1)^2 + (z_0 - z_1)^2)^{1/2} = 0 \\
& \ddot{y}_1 + \alpha_1 \cdot \dot{y}_1 \cdot (x_1^2 + \dot{y}_1^2 + (\dot{z}_1 + k \cdot V)^2)^{1/2} - \beta_1 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_1) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_1)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_1)^2 + (z_0 - z_1)^2)^{1/2} = -g \\
& \ddot{z}_1 + \alpha_1 \cdot \dot{z}_1 \cdot (x_1^2 + \dot{y}_1^2 + (\dot{z}_1 + k \cdot V)^2)^{1/2} - \beta_1 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_1) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_1)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_1)^2 + (z_0 - z_1)^2)^{1/2} = 0 \\
& \ddot{x}_2 + \alpha_2 \cdot \dot{x}_2 \cdot (x_2^2 + \dot{y}_2^2 + (\dot{z}_2 + k \cdot V)^2)^{1/2} - \beta_2 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_2) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_2)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_2)^2 + (z_0 - z_2)^2)^{1/2} = 0 \\
& \ddot{y}_2 + \alpha_2 \cdot \dot{y}_2 \cdot (x_2^2 + \dot{y}_2^2 + (\dot{z}_2 + k \cdot V)^2)^{1/2} - \beta_2 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_2) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_2)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_2)^2 + (z_0 - z_2)^2)^{1/2} = -g \\
& \ddot{z}_2 + \alpha_2 \cdot (\dot{z}_2 + k \cdot V) \cdot (x_2^2 + \dot{y}_2^2 + (\dot{z}_2 + k \cdot V)^2)^{1/2} - \beta_2 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_2) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_2)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_2)^2 + (z_0 - z_2)^2)^{1/2} = 0 \\
& \ddot{x}_3 + \alpha_3 \cdot \dot{x}_3 \cdot (x_3^2 + \dot{y}_3^2 + (\dot{z}_3 + k \cdot V)^2)^{1/2} - \beta_3 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_3) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_3)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_3)^2 + (z_0 - z_3)^2)^{1/2} = 0 \\
& \ddot{y}_3 + \alpha_3 \cdot \dot{y}_3 \cdot (x_3^2 + \dot{y}_3^2 + (\dot{z}_3 + k \cdot V)^2)^{1/2} - \beta_3 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_3) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_3)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_3)^2 + (z_0 - z_3)^2)^{1/2} = -g \\
& \ddot{z}_3 + \alpha_3 \cdot (\dot{z}_3 + k \cdot V) \cdot (x_3^2 + \dot{y}_3^2 + (\dot{z}_3 + k \cdot V)^2)^{1/2} - \beta_3 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_3) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_3)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_3)^2 + (z_0 - z_3)^2)^{1/2} = 0 \\
& \ddot{x}_4 + \alpha_4 \cdot \dot{x}_4 \cdot (x_4^2 + \dot{y}_4^2 + (\dot{z}_4 + k \cdot V)^2)^{1/2} - \beta_4 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_4) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_4)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_4)^2 + (z_0 - z_4)^2)^{1/2} = 0 \\
& \ddot{y}_4 + \alpha_4 \cdot \dot{y}_4 \cdot (x_4^2 + \dot{y}_4^2 + (\dot{z}_4 + k \cdot V)^2)^{1/2} - \beta_4 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_4) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_4)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_4)^2 + (z_0 - z_4)^2)^{1/2} = -g \\
& \ddot{z}_4 + \alpha_4 \cdot (\dot{z}_4 + k \cdot V) \cdot (x_4^2 + \dot{y}_4^2 + (\dot{z}_4 + k \cdot V)^2)^{1/2} - \beta_4 \cdot (\dot{x}_0 - \dot{x}_4) \cdot ((\dot{x}_0 - \dot{x}_4)^2 + (\dot{y}_0 - \dot{y}_4)^2 + (z_0 - z_4)^2)^{1/2} = 0 \quad (7)
\end{aligned}$$

Як і в попередньому випадку, рішеннями системи рівнянь 7 при початкових умовах будуть переміщення і швидкості струменів при впливі бічного вітру в координатах X-Y-Z. Можна зробити висновок, що бічний вітер зі швидкістю 5 м/с зносить струмені в бік (по Z) на величину близько 7 м при всіх трьох варіантах розміщення струменів. Трохи далі зносить струмінь пінні середньої кратності, а струмені пінні низької кратності зносяться трохи менше, що цілком закономірно.

Отже, схема з нижнім розташуванням струменів піни низької кратності є ефективною. Але при використанні 4 таких струменів відбувається зниження загальної кратності піни комбінованого струменя, також підвищується витрата піноутворювача. Тому ми провели порівняльні розрахунки для варіантів з нижнім розміщенням трьох і двох струменів піни низької кратності. Було встановлено, що використання трьох струменів піни низької кратності замість чотирьох призводить до зменшення дальності польоту лише на 3% (0,7 м), але значно покращує загальну кратність піни узагальненого струменя. Подальше зменшення кількості струменів (до двох) призводить до більш помітного зменшення ефективності (5,3%; 1,1 м) і при цьому не призводить до покращення кратності піни узагальненого струменя.

Отже, з огляду на вплив струменів піни низької кратності на загальну кратність піни узагальненого струменя, найбільш доцільною є третя схема розташування з трьома струменями – три струмені повітряно-механічної піни низької кратності, підтримують знизу по колу один струмінь піни середньої кратності.

Проведено також експериментальні дослідження з виявлення порівняльної ефективності застосування піни низької, середньої та комбінованої кратності у разі гасіння модельних вогнищ 1А та 55В. Піну середньої кратності генерували з 6%-го робочого розчину піноутворювача загального призначення для гасіння пожеж “Альпен” виробництва ТОВ “Альхім” (Україна) за ТУ У 24.6-32740136-001:2006.

Аналіз результатів експериментальних досліджень з визначення ефективності гасіння модельного вогнища 1А свідчить про те, що:

– за умови подавання піни середньої кратності на гасіння модельного вогнища 1А з густиною подавання піни на одиницю поверхні модельного вогнища 3,95 кг/м², припинення горіння не досягається, тобто за таких умов піна середньої кратності не є ефективною;

– за умови подавання піни низької кратності на гасіння модельного вогнища 1А досягнуто позитивний результат гасіння з показником вогнегасної ефективності 0,75 кг/м²;

– за умови подавання піни низької кратності на гасіння модельного вогнища 1А з показником вогнегасної ефективності 1,0 кг/м² досягнуто позитивний результат гасіння;

– при гасінні модельного вогнища пожежі класу А, піна середньої кратності, для даних умов випробування, неефективна.

Результати експериментальних досліджень з визначення ефективності гасіння модельного вогнища 55В наведено у таблицях 3, 4, 5.

Таблиця 3

Результати експериментальних досліджень з визначення ефективності застосування двох генераторів піни низької кратності з витратою (0,066±0,003) л/с кожний у разі гасіння модельного вогнища 55В піноутворювачем “Альпен” [7]

№ досл іду	тип генеро ване піни	Маси випробуван ьних пристроїв з піноутворю вачем, кг		Витрачені маси робочого розчину піноутворювача, кг			Результат гасіння, тривалість подавання піни, с		Показник вогнегасної ефективності кг/м ²	
		до гасін ня	післ я гасін ня	розді льна	загал ьна	усеред нене значен ня	фактичні значення	усеред нене значен ня	факт ичні значення	усеред нене значен ня
1	ПНК	15,83	10,57	5,26	12,10		не погашено, вог негасник вийшов з ладу 103,6		не визначено	
		15,86	9,02	6,84						
2	ПНК	15,87	10,67	8,81	17,71	17,67±0,02	погашен о 133,5	Погаш ено	10,26	10,24±0,01

		15,84	10,68	8,88				132,9		
3	ПНК	15,81	10,67	8,80	17,64		погашено	132,2	10,23	
		15,86	10,76	8,84						

Таблиця 4

Результати експериментальних досліджень з визначення ефективності застосування двох генераторів піни середньої кратності з витратою (0,066±0,003) л/с кожний у разі гасіння модельного вогнища 55В піноутворювачем “Альпен”

№ досліду	тип генеро-ваної піни	Маси випробувальних пристроїв з піноутворювачем, кг		Витрачені маси робочого розчину піноутворювача, кг		Результат гасіння, тривалість подавання піни, с		Показник вогнегасної ефективності, кг/м ²		тривалість до повторного займання, с
		до гасіння	після гасіння	роздільна	загальна	фактичне значення	усереднене значення	фактичне значення	усереднене значення	
1	ПСК	15,76	12,23	3,43	6,92	Погашено	55,9	4,0	4,0±0,1	31,2
	ПСК	15,84	12,35	3,49						
2	ПСК	15,82	12,40	3,42	6,75	Погашено	55,3	3,9	4,0±0,1	32,0
	ПСК	15,80	12,47	3,33						
3	ПСК	15,73	12,32	3,41	7,09	Погашено	56,4	4,1	4,0±0,1	34,1
	ПСК	15,81	12,13	3,68						

Таблиця 5

Результати експериментальних досліджень з визначення ефективності застосування двох генераторів піни низької (ПНК) та середньої кратності (ПСК) з витратою (0,066±0,003) л/с кожний у разі гасіння модельного вогнища 55В піноутворювачем “Альпен”

№ досліду	тип генеро-ваної піни	Маси випробувальних пристроїв з піноутворювачем, кг		Витрачені маси робочого розчину піноутворювача, кг		Результат гасіння, тривалість подавання піни, с		Показник вогнегасної ефективності, кг/м ²		тривалість до повторного займання, с
		до гасіння	після гасіння	роздільна	загальна	фактичне значення	усереднене значення	фактичне значення	усереднене значення	
1	ПСК	15,78	13,14	2,64	5,36	43,6	45,2±1,5	3,1	3,3±0,1	32

	ПНК	15,97	13,2 5	2,72					
2	ПСК	15,85	12,8 9	2,86	6,06	47,0	3,5		31
	ПНК	15,89	12,6 9	3,20					
3	ПСК	15,78	13,0 6	2,74	5,88	45,1	3,4		29
	ПНК	15,97	12,9 8	3,14					

На рис. 3 у графічному вигляді наведені узагальнені результати експериментальних досліджень з виявлення впливу виду повітряно-механічної піни, згенерованої із робочих розчинів піноутворювача для гасіння пожеж загального призначення, на ефективність гасіння модельного вогнища 55В.

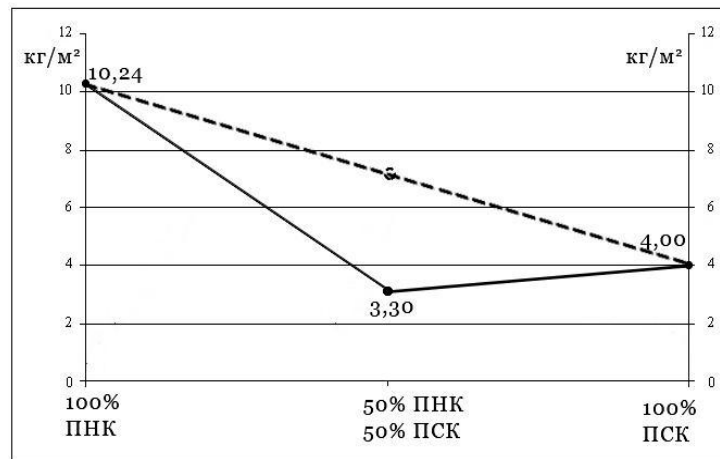


Рис. 3. Значення маси піни на одиницю площі горіння модельного вогнища 55В для піни низької, середньої кратності, а також комбінованої піни

За результатами експериментальних досліджень у полігонних умовах виявлено ефект синергізму ефективності припинення горіння легкозаймистих та горючих рідин у разі взаємодії поверхні їх горіння із комбінованою піною, який проявляється у тому, що значення показника вогнегасної здатності комбінованої піни є нижчим (3,30 кг/м²) за значення кожного окремого її компонента (10,24 кг/м² та 4,00 кг/м² відповідно для піни низької та середньої кратності)

Висновки

У даній роботі було досліджено взаємодію струменів повітряно-механічної піни різної кратності. На основі теоретичних і експериментальних досліджень визначено оптимальне розташування струменів піни, яке дозволяє досягти максимального значення дальності подачі піни при мінімальних втратах кратності. На основі експериментальних досліджень у полігонних умовах виявлено ефект синергізму ефективності припинення горіння легкозаймистих та горючих рідин у разі взаємодії поверхні їх горіння із комбінованою піною. Результати даного дослідження в подальшому будуть застосовані для розробки дослідного зразка піногенератора.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ковалишин В.В., Васильєва О.Е., Козяр Н.М. Пінне гасіння // Навч. посібник. – Львів: ЛДУ БЖД, 2007. – 168 с.

2. ДСТУ 3789-89. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробувань.
3. ДСТУ 2802-94. Стволи пожежні лафетні комбіновані.
4. Луц В.І. Підвищення ефективності гасіння пожеж легкозаймистих та горючих речовин комбінованими пінними струменями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 2007. – 20 с.
5. Ковалишин В.В. Дослідження залежності кратності повітряно-механічної піни від геометричних параметрів піногенератора / В.В. Ковалишин, Е.М. Улинець, О.В. Грушовінчук, В.В. Кавецький // Науковий вісник УкрНДПБ. – 2011. – № 2 (24). – С. 74-79.
6. Ольшанский В.П., Халипа В.М., Дубовик О.А. Приближенные методы расчета гидравлических пожарных струй. – Харьков: Митець, 2004. – 113 с.
7. Ковалишин В. В. Дослідження з визначення вогнегасної ефективності піни різної кратності генерованої з 6% розчину піноутворювача «Альпен») / В. В. Ковалишин, О. В. Грушовінчук // Пожежна безпека : теорія і практика : зб. наук. праць. – Черкаси : АПБУ, 2015. – № 25. – С. 45-52.