

УДК 664.013.8:614.84,614.84
КП
№ держреєстрації 0125U002412
Інв. №

Державна служба України з надзвичайних ситуацій
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності
(ЛДУБЖД)
79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35;
тел. (032) 233-24-79; 233-14-97; факс 233-00-88;
e-mail: ldubzd.lviv@dsns.gov.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор Львівського державного
університету безпеки життєдіяльності
генерал-майор служби
цивільного захисту
Дмитро БОНДАР
12 2025 року



ПРО ВИКОНАННЯ РОБОТИ
«РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ «ПІДШАРОВОГО» ГАСІННЯ ЗА
ДОПОМОГОЮ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ»
(«ПІДШАРОВЕ ГАСІННЯ»)
(остаточний)

Науковий керівник НДР
професор кафедри ЕТЗтаПРТ
доктор технічних наук, професор  Василь КОВАЛИШИН

Рукопис закінчено 10.12.2025

Результати роботи розглянуто Вченою радою Львівського державного університету безпеки життєдіяльності протоколом від 17.12. 2025р. № 5.

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник роботи –

Професор кафедри експлуатації транспортних засобів та пожежно-рятувальної техніки навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки Львівського державного університету безпеки життєдіяльності

доктор технічних наук, професор



Василь КОВАЛИШИН

Відповідальний виконавець –

Докторант денної форми навчання докторантури-ад'юнктури Львівського державного університету безпеки життєдіяльності

кандидат технічних наук, доцент

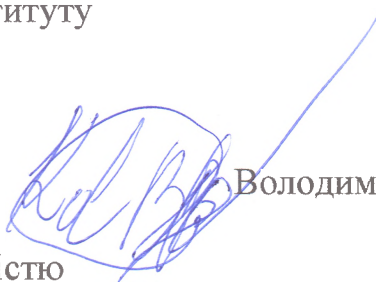


Володимир МАРИЧ

Виконавці:

Начальник кафедри управління діяльністю підрозділів цивільного захисту інституту післядипломної освіти Львівського державного університету безпеки життєдіяльності

кандидат технічних наук



Володимир КОВАЛИШИН

Доцент кафедри управління діяльністю підрозділів цивільного захисту інституту післядипломної освіти Львівського державного університету безпеки життєдіяльності

доктор філософії



Назарій ВЕЛИКИЙ

РЕФЕРАТ

У рамках проведеного дослідження здійснено детальний огляд та аналіз наукової, технічної та нормативної літератури, що стосується проблематики гасіння пожеж на об'єктах нафтової промисловості. Цей огляд охопив широкий спектр джерел, включаючи вітчизняні та міжнародні публікації, стандарти безпеки, звіти спеціалізованих організацій (ДСНС України, NFPA та API), а також наукові статті з журналів, присвячених пожежній безпеці та нафтогазовій галузі.

Встановлено, що підприємства нафтової промисловості належать до категорії пожежонебезпечних об'єктів через специфіку матеріалів та технологічних процесів. Пожежі на таких об'єктах характеризуються швидким розвитком: час від займання до повного охоплення може становити від кількох хвилин до години, залежно від типу нафтопродукту. Вони часто переходять у тривалі пожежі, які супроводжуються вибухами, утворенням токсичних димів і тепловим випромінюванням. Це створює критичні загрози для життя та здоров'я працівників і рятувальників. У контексті виявлених ризиків постає гостра необхідність розробки та впровадження інноваційних методів і засобів пожежогасіння, адаптованих до специфіки нафтової промисловості.

На першому етапі роботи (березень 2025 р. – квітень 2025 р.) було виконано аналіз наявної інформації та опублікованих джерел [1–14], що стосуються досліджуваної проблематики. Проведено систематизацію даних, відбір і адаптацію методик та алгоритмів, необхідних для подальшого використання в дослідженні. Сформовано аналітичну та теоретичну базу.

Під час другого періоду роботи (травень 2024 р. – серпень 2025 р.) виконано експериментальні дослідження для визначення характеристик піноутворювача, проведено випробування лабораторної установки для генерування компресійної піни та здійснено «підшарове» гасіння пожежі нафтопродукту (бензину) у макетному резервуарі ($V = 250$ л). Виконано теоретичні дослідження параметрів руху затоплених пінних струменів із

застосуванням програмного продукту SolidWorks Flow Simulations, призначеного для розв'язання прикладних задач у галузі термогідродинаміки шляхом моделювання відповідних фізичних процесів.

На третьому етапі роботи (вересень 2025 р. – грудень 2025 р.) запропоновано рекомендації щодо використання компресійної піни для ефективного гасіння пожеж легкозаймистих рідин (ЛЗР) у вертикальних сталевих резервуарах. Для резервуарів об'ємом до 5000 м³ рекомендується застосовувати компресійну піну з кратністю 10 і концентрацією піноутворювача 6% для підшарового гасіння з інтенсивністю не менше 0,08-0,09 л/с×м².

Підсумовано основні завдання та результати науково-дослідної роботи.

ЗМІСТ

Реферат.....	3
Перелік умовних скорочень.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОСТУПНОЇ ІНФОРМАЦІЇ, ОПУБЛІКОВАНИХ НАУКОВИХ ДЖЕРЕЛ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ У РЕЗЕРВУАРАХ З НАФТОПРОДУКТАМИ.....	8
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ПРИ ПІДШАРОВОМУ ГАСІННІ ТА ВЗАЄМОДІЇ З НАФТОПРОДУКТОМ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДШАРОВЕ ГАСІННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ.....	13
2.1. Схеми подавання компресійної піни в резервуар з нафтопродуктом підшаровим способом.....	13
2.2. Розроблення експериментальної установки для генерування компресійної піни та дослідження ефективності підшарового гасіння пожежі нафтопродукту у макетному резервуарі.....	15
2.3. Порівняльний аналіз розрахункових даних математичної моделі з результатами натурних випробувань підшарового гасіння компресійною піною в моделі макетного резервуара об'ємом 0,25 м ³	21
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГАСІННЯ НАФТОПРОДУКТУ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ СТАЛЕВОМУ РЕЗЕРВУАРІ ОБ'ЄМОМ 5000 М ³ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ПІДШАРОВИМ СПОСОБОМ. ЕКОНОМІЧНІ ПЕРЕВАГИ ВІД ВИКОРИСТАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ.....	26
3.1. Опис основних теоретичних положень САПР SolidWorks Flow Simulations.....	26
3.2. Моделювання прогріву палива та резервуара протягом 30 хв.....	30
3.3. Визначення об'єму для компенсації розширення бензину.....	38
3.4. Моделювання процесу подавання піни.....	39
3.5. Визначення впливу температури на процес виходу піни на поверхню горіння.....	43
3.6. Подавання піни різної кратності протягом 1500 с.....	44

3.7. Визначення кількості піни на дзеркалі горіння.....	51
3.8. Подавання піни різної інтенсивності і кратності.....	53
3.9. Визначення об'єму додаткового витіснення бензину.....	59
3.10. Економічне обґрунтування переходу на технологію гасіння компресійною піною: скорочення витрат і підвищення ефективності пожежогасіння.....	62
РОЗДІЛ 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ПРИ ГАСІННІ ПОЖЕЖ НАФТОПРОДУКТІВ У СТАЛЕВИХ ВЕРТИКАЛЬНИХ РЕЗЕРВУАРАХ ПІДШАРОВИМ СПОСОБОМ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ.....	68
ВИСНОВКИ.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	80
ДОДАТКИ.....	85
Додаток А. Фізико-механічні параметри компонентів текучого середовища моделі SolidWorks Flow Simulations.....	86
Додаток Б. Теоретичні дослідження процесу подачі пінних струменів в середовище прогрітого бензину.....	89
Додаток В. Рекомендації щодо гасіння пожеж у резервуарах з нафтопродуктами підшаровим способом за допомогою компресійної піни.....	98

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

ПУ	піноутворювач
КП	компресійна піна
ЛЗР	легкозаймисті рідини
ГР	горючі рідини
ПАР	поверхнево активні речовини
РВС	резервуар вертикальний сталевий
РР	робочий розчин
К5	кратність 5
К10	кратність 10
CAF	compressed air foam (компресійна піна)
CAFS	compressed air foam system (система отримання компресійної піни)
ГПС	генератор піни середньої кратності

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОСТУПНОЇ ІНФОРМАЦІЇ, ОПУБЛІКОВАНИХ НАУКОВИХ ДЖЕРЕЛ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ У РЕЗЕРВУАРАХ З НАФТОПРОДУКТАМИ

Метою роботи є покращення ефективності гасіння пожеж у резервуарах, призначених для зберігання нафтопродуктів, шляхом подавання КП «підшаровим» способом.

Пожежі на об'єктах нафтопереробної промисловості, особливо в резервуарах із нафтопродуктами, становлять серйозну глобальну проблему через стрімке поширення полум'я, величезні економічні й екологічні втрати та небезпеку для життя людей. У період 2020-2025 рр. в Україні зафіксовано близько 40 великих пожеж на нафтових сховищах, причому 95% з них припадає на час повномасштабної війни. Точна кількість таких інцидентів невідома через відсутність централізованої звітності в умовах бойових дій. Проте за наявними даними:

- 2022 р. - щонайменше 10 задокументованих пожеж на нафтобазах, переважно внаслідок російських ударів; найгучніші випадки - у Калинівці, Новомосковську та Кременчуку;

- 2023 р. - близько 10 пожеж, з яких дві масштабні (Одеса, Рівне);

- 2024 р. - 8 випадків, зокрема пожежа в Київській області.

Багато атак на нафтобази не розголошуються, щоб не надавати ворогу даних про ефективність ударів. Наприклад, інцидент у Київській області 2024 року офіційно назвали «пожежею на промисловому об'єкті».

Традиційні методи гасіння пожеж у резервуарах із нафтопродуктами в умовах війни в Україні є надзвичайно ризикованими через загрозу повторних обстрілів. Рятувальники зазвичай виїжджають на місце пожежі лише після сигналу «відбій повітряної тривоги», коли ракетні удари вже не загрожують. До того часу вогонь може набрати катастрофічних масштабів, що значно ускладнює ліквідацію. Для гасіння таких пожеж основним засобом є повітряно-механічна піна, яку отримують із фторвмісних піноутворювачів. Вона

ефективна, але має суттєві недоліки: екологічну шкідливість, високу ціну та складність утилізації. Це стимулює пошук альтернатив.

У світі активно вивчаються інновації методи боротьби з пожежами, зокрема компресійна піна, яка показала високу результативність у Європі та США при гасіння пожеж класу А та D, але в Україні їй приділяють недостатньо уваги.

Окрім традиційного способу гасіння резервуарів, застосовують метод підшарового пожежогасіння у резервуарах, які обладнані системою підшарового пожежогасіння.

Аналіз зарубіжного досвіду використання компресійної піни в США та Європі підтверджує низку переваг піногенеруючих систем із застосуванням компресійної піни над традиційними технологіями пожежогасіння, зокрема:

- вища ефективність (скорочення часу гасіння);
- економія води (у 2-5 разів) та піноутворювача (у 6-10 разів);
- швидке зниження температури в осередку горіння;
- мінімальні пошкодження майна через низький вміст води;
- низький гідравлічний опір у трубопроводах;
- збільшення дальності подавання піни;
- висока стабільність і адгезія піни.

За результатами аналізу встановлено, що іноземні виробники, зокрема компанія Rosenbauer, пропонують широкий асортимент систем для генерування компресійної піни. Водночас в Україні відсутнє як вітчизняне, так і імпортерне обладнання цього типу на оснащенні пожежно-рятувальних підрозділів.

Компресійну піну застосовують понад 30 років для гасіння пожеж різних класів. У США її використовують для ліквідації пожеж у житлових будинках, що дозволяє економити вогнегасні речовини та зменшувати матеріальні збитки завдяки низькому вмісту рідкої фази. Попри це, у США та країнах Європи не проводили досліджень з підшарового гасіння резервуарів із зберіганням нафтопродуктів за допомогою компресійної піни, а відповідні нормативні документи відсутні.

Компресійна піна - це однорідна дрібноструктурна піна низької кратності, отримана шляхом змішування піноутворювача, води та стиснутого повітря або азоту [15].

Основна відмінність систем CAFS (compressed air foam system) від повітряно-механічних полягає в тому, що компресійна піна створюється в спеціальних пінозмішувачах. Цей процес дозволяє подавати готову піну на значні відстані за допомогою тиску повітря від компресора або балона. Така властивість особливо цінна під час гасіння пожеж у висотних будівлях або спорудах із підвищеною поверховістю. При використанні цієї піни, завдяки низькому вмісту рідинної фази, зменшуються побічні матеріальні збитки від гасіння пожеж житлових будинків. Компресійна піна має більший відсоток дрібних бульбашок у порівнянні із звичайною повітряно-механічною піною в однаковому об'ємі піни. Також існує певна гіпотеза, що цей вид піни може використовуватись для подавання на поверхню горючої рідини, а також використовуватись для підшарового гасіння резервуарів нафти та нафтопродуктів (бензин, дизельне пальне). Використання компресійної піни підшаровим способом, як і подаванням на поверхню, не вивчене в Україні та за її межами, відсутні відповідні нормативні документи [16].

Ряд авторів відзначає, що порівняно з традиційними засобами пожежогасіння КП має такі переваги [16, 17-21]:

- формування компресійної піни відбувається безпосередньо біля насосної установки, що знижує енергетичні витрати на її транспортування до місця пожежі;

- компресійну піну можна подавати на значні відстані, включно з вертикальними (до 400 м);

- компресійна піна має високу структурну щільність, компактність і складається з численних однорідних пухирців. Співвідношення маси до поверхні сприяє ефективній теплопередачі, забезпечуючи значний охолоджувальний ефект для нагрітих поверхонь;

- завдяки формуванню піни за допомогою стисненого повітря, вона отримує додаткову енергію для доставки в осередок пожежі. На відміну від води, дрібні краплі піни не випаровуються під час транспортування, що значно підвищує ефективність використання вогнегасної речовини;

- для подавання компресійної піни не потрібні спеціальні пристрої — можна використовувати стандартні насоси, рукави та пожежні стволи. Пожежні рукави, заповнені компресійною піною, значно легші, що підвищує маневреність вогнеборця;

- компресійна піна може мати як підвищений вміст рідкої фази для посилення охолоджувального ефекту, так і знижений вміст рідкої фази, що покращує адгезію, дозволяючи використовувати її для вогнезахисту вертикальних поверхонь і гасіння електрообладнання під напругою;

- знижений вміст рідкої фази зменшує прями збитки під час гасіння пожеж у багатоповерхових будівлях і на горищах, запобігаючи затопленню нижніх поверхів.

Додатково, до недоліків такого типу піни можна віднести факт, що в практичній діяльності було зафіксовано кілька випадків руйнування рукавів, наповнених компресійною піною, у високотемпературних умовах пожежі. Це сталося через нагрівання та розширення повітря у піні [22].

Станом на сьогодні багато провідних європейських країн та США мають спеціальні пожежні автомобілі, які обладнані системою генерування та подавання компресійної піни. В Україні пожежно-рятувальними підрозділами такі системи не використовуються, тому розроблення системи підшарового гасіння резервуарів з нафтопродуктами за допомогою компресійної піни відповідає інноваційним напрямкам розвитку ДСНС України.

Порівняння підшарового способу гасіння пожеж у резервуарах з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне) за допомогою ПМП та КП

Критерій порівняння	Повітряно-механічна піна	Компресійна піна
Принцип дії	Піна подається через спеціальні пристрої (генератори) під шар пального, спливаючи на поверхню і створюючи ізолюючий шар	Піна формується в системі зі стисненим повітрям, подається під тиском під шар пального, швидко заповнює об'єм та ізолює горючий шар
Технологія генерування	Формується за допомогою змішування ПУ та води в генераторах піни	Використовує стиснене повітря, воду та ПУ для створення піни з високою щільністю і стабільністю. (не потребує спеціальних генераторів піни)
Швидкість подавання	Повільна, залежить від продуктивності генераторів і тиску в системі	Швидша, завдяки легкості піни та компактності системи
Ефективність гасіння	Ефективна для резервуарів із легкими нафтопродуктами, але може бути менш стабільною в умовах високої температури	Висока ефективність навіть в умовах високої температури, завдяки стабільності піни
Стійкість	Менш стійка до руйнування під дією високих температур	Висока стійкість через щільну структуру та менший вміст води
Витрата ПУ	Вища витрата через більший об'єм піни і меншу щільність	Нижча витрата завдяки компактності та ефективному розподілу піни
Екологічність	В основному генерується з фторвмісних плівкоутворювальних ПУ, які є шкідливими для екології	Генерується з ПУ загального призначення, які є біологічно м'якими

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ПРИ ПІДШАРОВОМУ ГАСІННІ ТА ВЗАЄМОДІЇ З НАФТОПРОДУКТОМ. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДШАРОВЕ ГАСІННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ.

2.1. Схеми подавання компресійної піни в резервуар з нафтопродуктом підшаровим способом

Підшарове подавання компресійної піни є одним із найефективніших способів гасіння пожеж у резервуарах із горючими рідинами, що дозволяє швидко локалізувати та ліквідувати пожежу шляхом введення піни безпосередньо під шар горючої речовини. Цей спосіб вирізняється високою ефективністю завдяки здатності піни ізолювати горючу поверхню, знижуючи температуру та припиняючи горіння. Для подавання компресійної піни запропоновано дві схеми: з використанням стаціонарного пінозмішувача (рис 2.1) та з використанням переносного пінозмішувача (рис 2.2);

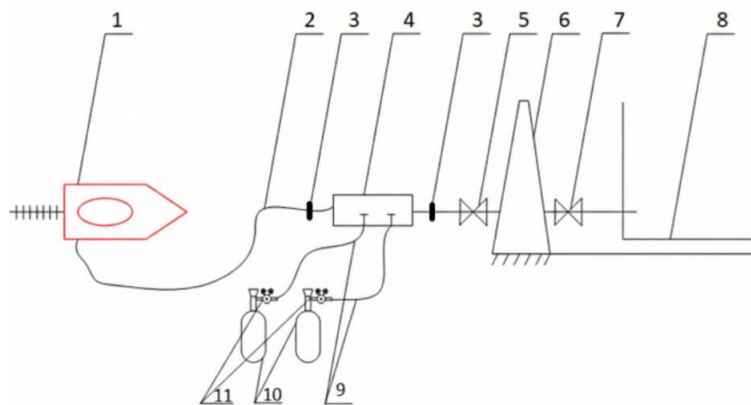


Рис. 2.1. Схема подавання компресійної піни під шар горючої речовини в резервуар з використанням стаціонарного пінозмішувача. 1) пожежна автоцистерна; 2) пожежний рукав (магістральна лінія $\varnothing 77$); 3) з'єднувальні головки; 4) генератор компресійної піни; 5) вентиль подавання; 6) обвалування; 7) наповнювальний вентиль резервуара; 8) резервуар; 9) шланги для подавання газу (повітря); 10) балони з газом (повітрям) або компресор; 11) редуктор.

Стационарний пінозмішувач забезпечує стабільну роботу завдяки фіксованій конструкції та точному налаштуванню. Запропонована схема дозволяє пожежно-рятувальним підрозділам оперативно під'єднатись до стаціонарної системи підшарового гасіння в резервуарі та швидко розпочати гасіння. Також за цією схемою можуть використовуватись пожежні автоцистерни, які обладнані системою CAFS.

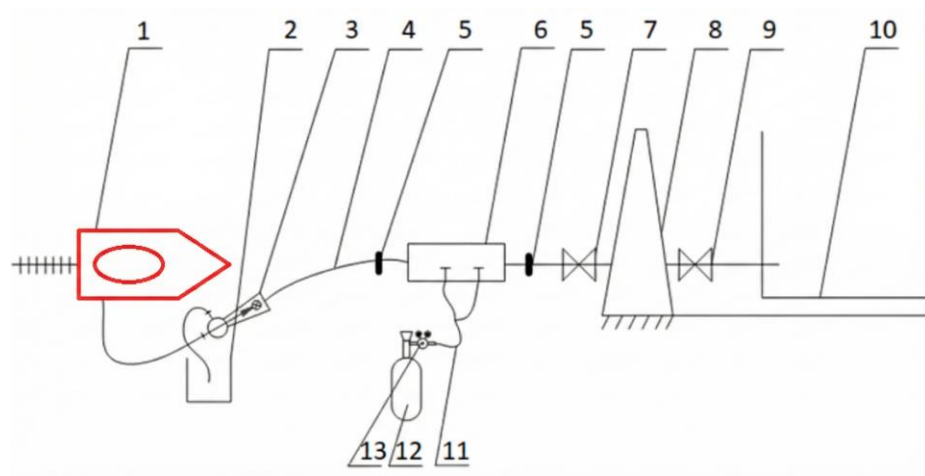


Рис. 2.2. Схема подавання компресійної піни під шар горючої речовини в резервуар з використанням переносного пінозмішувача. 1) пожежна автоцистерна; 2) стороння ємність з піноутворювачем; 3) переносний пінозмішувач; 4) пожежний рукав (магістральна лінія $\varnothing 77$); 5) з'єднувальні головки; 6) генератор компресійної піни; 7) вентиль подавання; 8) обвалування; 9) наповнювальний вентиль резервуара; 10) резервуар; 11) шланги для подавання газу (повітря); 12) балон з газом (повітрям) або компресор; 13) редуктор.

Переносний пінозмішувач зазвичай використовують коли потрібно забрати піноутворювач із сторонньої ємності. Завдяки використанню переносного пінозмішувача не відбувається забруднення насоса пожежного автомобіля піноутворювачем.

2.2. Розроблення експериментальної установки для генерування компресійної піни та дослідження ефективності підшарового гасіння пожежі нафтопродукту у макетному резервуарі

У роботі визначено ефективність підшарового гасіння резервуарів з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне) за допомогою компресійної піни в полігонних умовах на прикладі макетного резервуара об'ємом $0,25 \text{ м}^3$.

Основою для проведення дослідження з підшарового гасіння пожежі в макетному резервуарі стала самостійно розроблена установка для генерування компресійної піни (рис. 2.3) яка передбачає:

- зберігання робочого розчину піноутворювача;
- подавання робочого розчину піноутворювача в камеру змішування за допомогою повітря;
- перемішування робочого розчину піноутворювача з повітрям в камері змішування та утворення компресійної піни;
- регулювання тиску у балонах з повітрям;
- подавання готової компресійної піни на гасіння.

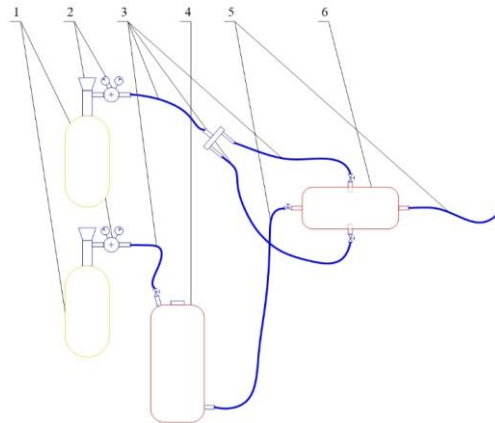


Рис. 2.3. Установка для генерування компресійної піни: 1) балони з повітрям; 2) редуктор з манометрами високого та середнього тиску; 3) міцні шланги для подавання повітря $\varnothing 10 \text{ мм}$; 4) ємність (типу вогнегасника) з робочим розчином піноутворювача ($V = 12 \text{ л}$); 5) гнучкі резинові трубопроводи для подавання робочого розчину/піни; 6) камера змішування робочого розчину із повітрям.

Значну увагу приділено забезпеченню герметичності всіх з'єднань та ретельному калібруванню клапанів, щоб гарантувати стабільну, безперебійну та ефективну роботу системи. Центральним і ключовим елементом установки є камера змішування, де відбувався процес генерування компресійної піни та подавання її на гасіння. Повітря надходило до камери змішування через два спеціально вмонтовані штуцери, до яких під'єднювалися шланги високого тиску $\varnothing 10$ мм, які забезпечували установку необхідним об'ємом повітря для:

- змішування з робочим розчином піноутворювача та утворення компресійної піни;
- подавання компресійної піни до резервуара на гасіння.

Загальний вигляд камери змішування можна побачити на рис. 2.4.

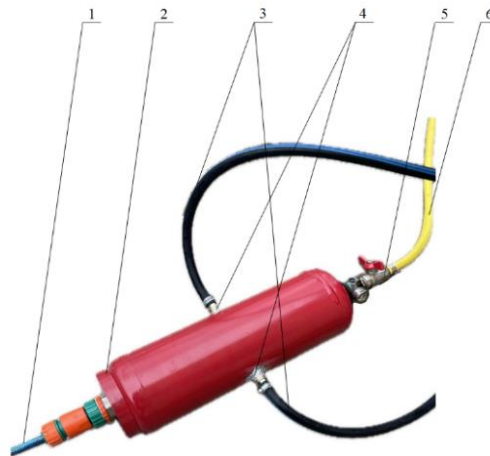


Рис. 2.4. Загальний вигляд камери змішування: 1) гнучкий резиновий трубопровід для подавання готової компресійної піни; 2) камера змішування; 3) міцні шланги для подавання повітря; 4) штуцери для подавання повітря в середину камери змішування; 5) перекиривний кран; 6) гнучкий резиновий трубопровід для подавання робочого розчину в камеру змішування.

Камеру змішування виготовлено з корпусу вогнегасника об'ємом 3 л. Цього достатньо щоб генерувати необхідну кількість компресійної піни на гасіння макетного резервуара об'ємом $0,25 \text{ м}^3$. Для генерування компресійної

піни було використано піноутворювач загального призначення «Барс S-2».

Як горючу речовину використовували бензин у кількості 100 літрів, який було залито безпосередньо в резервуар перед початком експерименту. Всього було проведено три експерименти з підшарового подавання компресійної піни. Перед кожним експериментом система наповнювалася 12 л 6% розчину піноутворювача. Для забезпечення безпеки експерименту резервуар з бензином встановлено на відкритому майданчику. Також для проведення експерименту було використано:

- ваги з межею зважування 10 кг з ціною поділки 0,005 кг;
- манометр згідно з [42] з верхньою межею вимірювання 1 МПа і ціною поділки 0,01 МПа;
- термометр згідно з [43] з діапазоном вимірювання від 0 до 100°C і ціною поділки 1°C;
- циліндр 1-500 згідно з [44] з ціною поділки 10 см³;
- секундомір з межею вимірювання 3600 с і ціною поділки 0,2 с.

Перед початком кожного експерименту готувалось 12 л робочого розчину піноутворювача та виливалось у ємність типу вогнегасника (рис. 2.3) для зберігання робочого розчину. Після цього ємність герметично закривалась та приєднувалась до балону із стиснутим повітрям та до камери змішування. Цей балон із стиснутим повітрям використовувався тільки для виштовхування робочого розчину піноутворювача з ємності для зберігання до камери змішування через гнучкі резинові трубопроводи. Утворення компресійної піни відбувалося в камері змішування, яка мала окреме джерело повітря. Перед початком дослідження установка для генерування компресійної піни була під'єднана до дна макетного резервуара об'ємом 0,25 м³ (рис. 2.5).

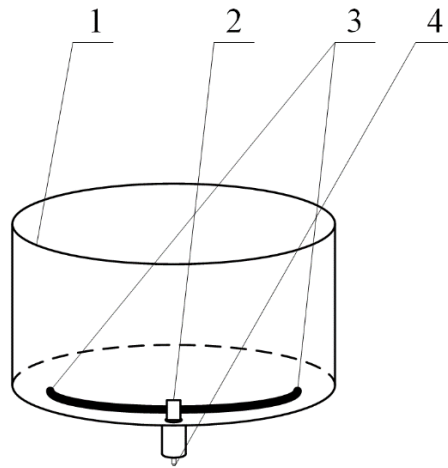


Рис. 2.5. Загальний вигляд макетного резервуара з розподільчою системою: 1) макетний резервуар ($V = 0,25 \text{ м}^3$); 2) розподільча система для подавання компресійної піни; 3) місце виходу компресійної піни; 4) місце приєднання установки для генерування компресійної піни.

Резервуар виготовлений зі сталі та має форму циліндра з герметичним дном та відкритим дахом. На дні резервуара розташована розподільча системи для подавання компресійної піни, яка забезпечує рівномірний розподіл піни під шаром горючої рідини. На початку експерименту бензин у резервуарі підпалювався відкритим полум'ям. Висота полум'я досягала 2-3 розмірів резервуара (рис. 2.6). Через 60 секунд від початку горіння подавалась компресійна піна.



Рис. 2.6. Загальний вигляд макетного резервуара після підпалу горючої рідини

Піна подавалась під шар горючої рідини через систему, змонтовану на дні резервуара. Завдяки дії повітря в камері змішування утворювалась компресійна піна з низькою кратністю, яка рівномірно розподілялася по поверхні горючої рідини. Час гасіння фіксувався секундоміром, починаючи з моменту початку подавання піни і до повного припинення горіння. Додатково проводився візуальний контроль покриття дзеркала горіння компресійною піною після гасіння, яке зображено на рис. 2.7.



Рис. 2.7. Загальний вигляд компресійної піни на поверхні горючої рідини після гасіння пожежі в макетному резервуарі.

При проведенні досліджень особлива увага приділялась стійкості піни після гасіння. Витрати розчину обчислювались шляхом вимірювання залишків після кожного експерименту. Це дозволяло оцінити ефективність системи у витратах ресурсів. У результаті проведених експериментів було отримано дані про ефективність підшарового гасіння бензину у макетному резервуарі за допомогою компресійної піни. У табл. 2.1 узагальнені основні результати досліджень.

Таблиця 2.1.

Результати підшарового гасіння бензину компресійною піною

№ Дослідду	Об'єм розчину, л	Використано розчину, л	Кратність	Тиск подавання, МПа	Час гасіння, с
1	12	3,1	10,7	4	56
2	12	2,9	10,3	4	52
3	12	3,2	10,8	4	57

Компресійна піна продемонструвала здатність ефективно ізолювати дзеркало горіння бензину. Час гасіння становив від 52-57 секунд залежно від експерименту. Це вказує на стабільну ефективність підшарового способу гасіння, який забезпечує швидке припинення горіння завдяки створенню непроникного шару піни. Система дозволила досягти ефективного гасіння при використанні 2,9-3,2 л розчину піноутворювача. Це свідчить про економічну доцільність компресійної піни, оскільки її низька кратність забезпечує щільний і стабільний шар на поверхні горючої рідини. Кратність компресійної піни становила 10,3-10,8. Завдяки цьому піна утворює густий і щільний шар, який ізолює поверхню горючої рідини та перешкоджає випаровуванню парів. Це критично важливо для запобігання повторному займанню та ефективного контролю над горінням. Використання тиску 4 МПа забезпечило рівномірний розподіл піни по поверхні бензину. Це дозволило значно зменшити час гасіння та знизити втрати горючої рідини під час пожежі. Тиск подавання виявився достатнім для створення стабільної компресійної піни. Після припинення

подавання піни, її шар утримувався на поверхні бензину протягом тривалого часу, ефективно перешкоджаючи випаровуванню горючих парів. Це підтверджує здатність компресійної піни створювати довготривалу ізоляцію, необхідну для запобігання повторному займанню.

2.3. Порівняльний аналіз розрахункових даних математичної моделі з результатами натурних випробувань підшарового гасіння компресійною піною в моделі макетного резервуара об'ємом 0,25 м³

Відповідно до проведеного дослідження з підшарового гасіння пожежі в SolidWorks Flow Simulation спроектована модель макетного резервуара (рис. 2.8). Деякі дані взято із спроектованої математичної моделі PVC-5000. Внизу резервуара розміщено джерело подавання пінного струменя, зверху резервуар відкритий. Температура дзеркала горіння встановлена 160°C. Температура країв стінки резервуара встановлено 430°C. Текуче середовище – бензин. Тривалість прогріву встановлено 60 с.

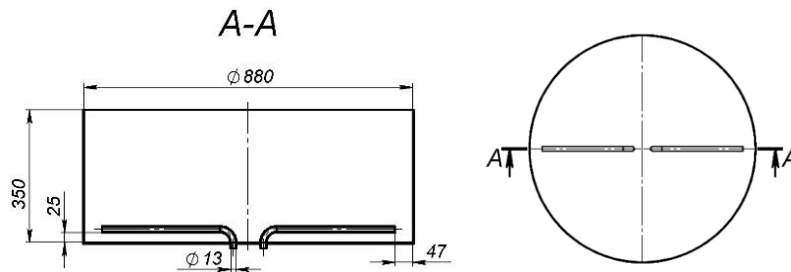


Рис. 2.8. Модель макетного резервуара

Хромограма розподілу температури країв стінок макетного резервуара та текучого середовища, що проходить через вертикальну вісь симетрії макетного резервуара представлені на рис. 2.9.

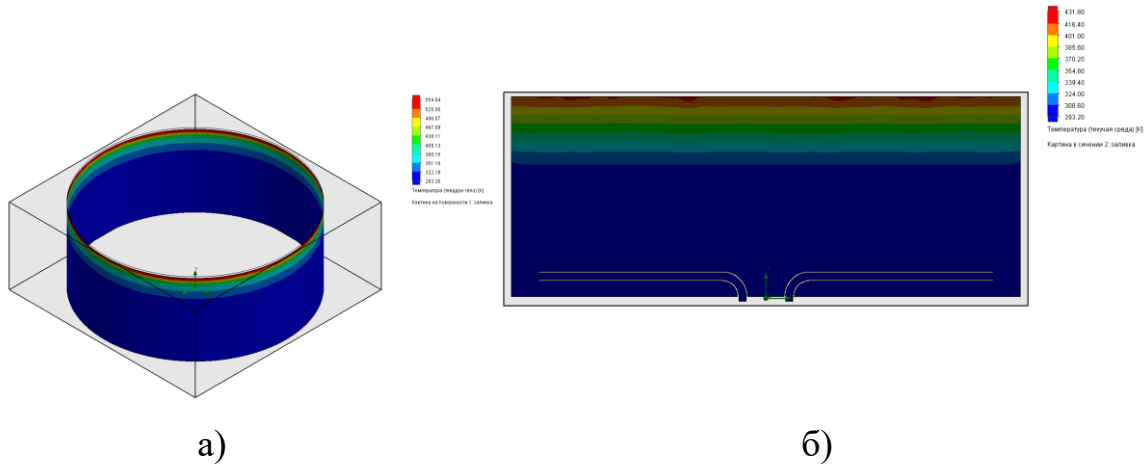


Рис. 2.9. а) температура країв стінок резервуара через 60 с прогріву; б) температура середовища на момент закінчення прогріву

Як видно із рисунка, текуче середовище макетного резервуара прогріте рівномірно.

Графічна залежність розподілу температури текучого середовища на момент закінчення прогріву за висотою макетного резервуара представлено на рис. 2.10.

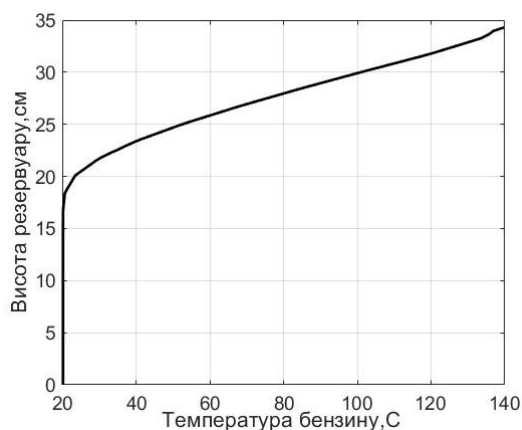


Рис. 2.10. Залежність температури бензину від висоти макетного резервуара

На рис. 2.11 представлено хромограму залежності густини бензину від його температури та графічну інтерпретацію цієї залежності вздовж вертикальної осі симетрії.

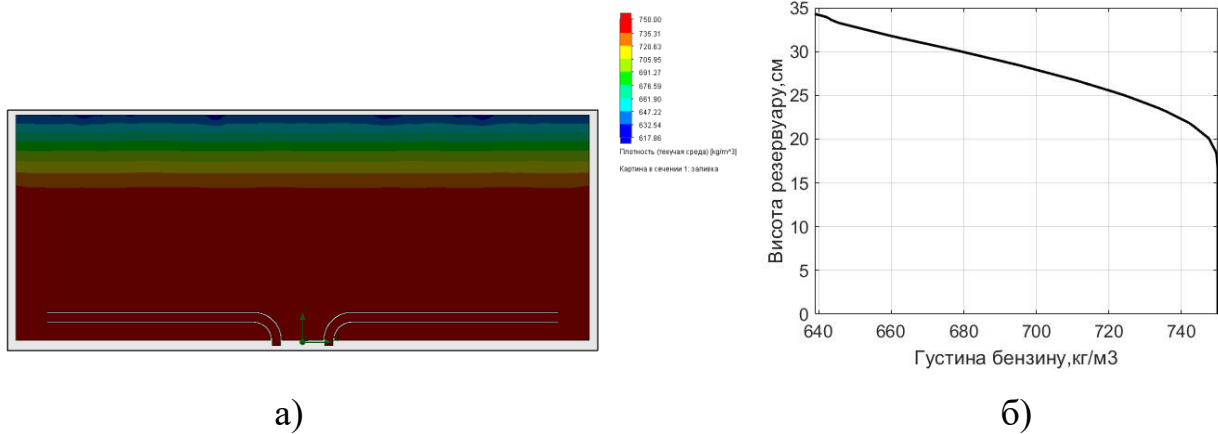


Рис. 2.11. а) густина бензину на момент закінчення прогріву; б) залежність густини бензину від координати висоти резервуара

Подавання піни здійснено із 2 сопел, які розташовані на дні макетного резервуара. Подану піну К10 продуктивністю 0,5 л/с протягом 57 с. Температуру рідини за висотою резервуара та на дзеркалі горіння після закінчення подавання піни зображено на рис. 2.12.

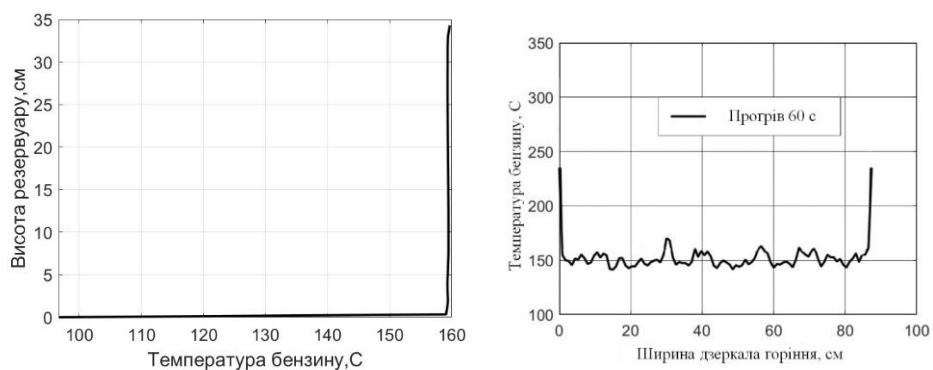


Рис. 2.12. а) Температура рідини за висотою резервуара; б) температура рідини на дзеркалі горіння

Хромограма розподілу температури на бічних поверхнях стінок макетного резервуара після закінчення подавання піни зображено на рис. 2.13.

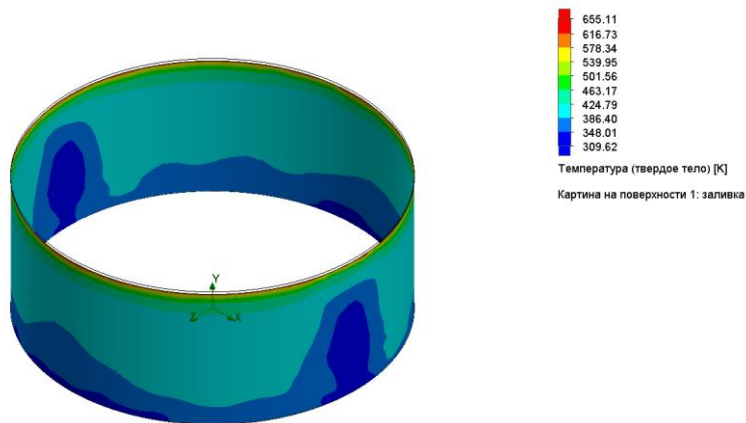


Рис. 2.13. Температура поверхні макетного резервуара після закінчення подавання піни

Як видно із рисунка температура поверхні стінок резервуара знижується з певним викривленням спектру по всій площі, що може бути викликано активним рухом текучого середовища внаслідок подавання компресійної піни підшаровим способом.

На рис. 2.14 представлено графічну залежність масових витрат піни на дзеркало горіння від часу її подавання.

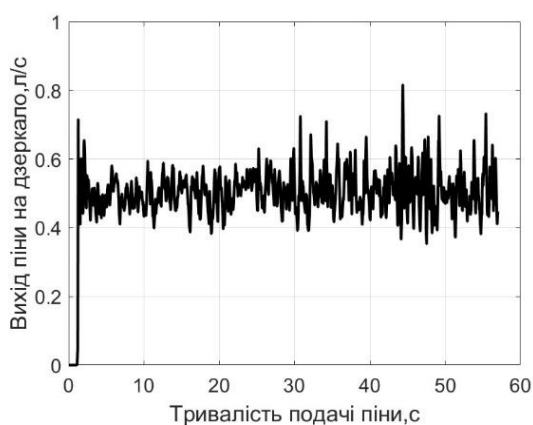


Рис. 2.14. Графічна залежність масових витрат піни на дзеркало горіння від часу її подавання

Як видно із рисунка піна виходить на поверхню дзеркала горіння рівномірно. Середнє значення продуктивності виходу піни на дзеркало горіння протягом 57 с становить 0,494 л/с без врахування руйнування піни. Об'єм піни на поверхні дзеркала становить 28,2 л. Середнє значення товщини піни на дзеркалі горіння 4,6 см.

Перевірка адекватності математичної моделі проводилась за формулою:

$$A = \frac{t_1 - t_2}{t_2} \times 100, \quad (2.1)$$

де t_1 – час гасіння у математичному моделюванні (57 с), t_2 – час гасіння встановлений під час лабораторного експерименту (55 с). Відповідно до формули (3.2) розбіжність у результатах становить майже 4%, що підтверджує адекватність отриманих результатів.

**РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГАСІННЯ
НАФТОПРОДУКТУ У ВЕРТИКАЛЬНОМУ СТАЛЕВОМУ РЕЗЕРВУАРІ
ОБ'ЄМОМ 5000 М³ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ
ПІДШАРОВИМ СПОСОБОМ. ЕКОНОМІЧНІ ПЕРЕВАГИ ВІД
ВИКОРИСТАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ**

**3.1. Опис основних теоретичних положень САПР SolidWorks Flow
Simulations**

Для теоретичних досліджень параметрів руху затоплених пінних струменів використовувався програмний продукт SolidWorks Flow Simulations [23-25], який призначений для розв'язування прикладних задач в області термогідродинаміки шляхом моделювання відповідних фізичних процесів. SolidWorks Flow Simulations є повністю інтегрованим додатком САД-системи SolidWorks і може ефективно використовуватись для розрахунків силової (стаціонарної та нестаціонарної) взаємодії між твердими тілами та потоком рідини (газу) у випадку їх взаємного руху; впливу різних фізичних факторів на рух текучого середовища; вирішення проблем теплообміну; розрахунку руху твердих і/або рідких частинок в потоці газу або рідини.

Теоретичні дослідження здійснюються з використанням даних дослідників [20, 26-34] та даних отриманих внаслідок власних досліджень, які описані в розділі 2.

Математична модель будується шляхом геометричного проектування реального об'єкта в середовищі SolidWorks [24] з подальшим автоматичним обміном необхідною інформацією між SolidWorks Flow Simulations та SolidWorks. Рух текучого середовища і теплообмін між тілами моделюється з допомогою рівнянь Нав'є-Стокса, які в нестаціонарній формі описують закони збереження маси, імпульсу та енергії.

Ця система рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії нестаціонарного просторового потоку в Декартові системі координат $(x_i, i = 1, 2, 3)$ набуває

виду:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) &= 0, \\
 \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} &= S_i, \\
 \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P) u_k + q_k - \tau_{ik} u_i) &= S_k u_k + Q_H,
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

де t – час;

u – швидкість текучого середовища;

ρ – густина текучого середовища;

S_i – зовнішні масові сили, що діють на одиничну масу текучого середовища;

E – повна енергія одиничної маси текучого середовища;

Q_H – тепло, що виділяється джерелом тепла в одиничному об'ємі текучого середовища;

τ_{ik} – тензор в'язких напружень зсуву;

q_i – дифузійний тепловий потік, нижні індекси означають підсумовування за трьома координатними напрямками.

Для ньютонівських рідин тензор напружень від дії сил в'язкості визначають таким чином:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij},
 \tag{3.2}$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості;

δ – дельта-функція Кронекера;

k – коефіцієнт турбулентної в'язкості.

Дифузійний тепловий потік моделюється з допомогою рівняння:

$$q_i = - \left(\frac{\mu_i}{Pr} + \frac{\mu_i}{\sigma_c} \right) c_p \frac{\partial T}{\partial x_k}, k = 1, 2, 3, \quad (3.3)$$

Для стискуваних середовищ (газів) використовується рівняння стану такого виду:

$$\rho = \rho(P, T, y), \quad (3.4)$$

де $y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ – вектор концентрацій компонентів текучого середовища.

Для газів використовується рівняння стану ідеального газу:

$$\rho = \frac{P}{RT}, \quad (3.5)$$

де R – газова стала модельованого газу, яка для суміші газів визначається як

$$R = R_{\text{унів.}} \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{M_i}, \quad (3.6)$$

де M_i – молекулярна маса i -го компоненту газу. Для врахування залежності від температури використовується рівняння:

$$\rho = \left[\sum_{i=1}^N \frac{y_i}{\rho_{0i}} (1 + \beta_{Ti} (T - T_0)) \right]^{-1}, \quad (3.7)$$

де β_{Ti} – коефіцієнт об'ємного теплового розширення i -го компонента;

ρ_{0i} – густина i -го компонента при деякій температурі T_0 .

Вплив гравітації моделюється з допомогою члена S_i , що входить в (3.1) як

зовнішня масова сила:

$$S_i = -\rho g_i, \quad (3.8)$$

де g_i – i -та складова (вздовж i -тої осі системи координат) вектора гравітаційного прискорення.

Значний інтерес для нашого випадку становлять багатокomпонентні течії. Зміна концентрації компонентів суміші в просторі внаслідок дифузії моделюється таким рівнянням:

$$\frac{\partial \rho y_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k y_i) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left((D_{ij} + D'_{ij}) \frac{\partial y_j}{\partial x_k} \right), i = 1, 2, \dots, N, \quad (3.9)$$

де y_i – концентрація i -го компонента суміші;

N – число компонентів;

D – коефіцієнт дифузії.

Крім цього, використовуються рівняння стану текучого середовища, а залежність теплопровідності компонентів середовища від температури описується відомими емпіричними формулами.

Для розв'язку задачі нестационарна безперервна математична модель дискретизується як за часом, так і за простором. Для цього вся розрахункова область покривається сіткою, грані чарунок якої паралельні до координатних площин Декартової системи координат. Сітка генерується автоматично з можливістю впливу на розміри чарунок для покращення точності розрахунку. Параметри руху пінних струменів в середовищі бензину визначались за допомогою методу скінченних об'ємів, який реалізовано в програмному середовищі SolidWorks Flow Simulations [25]. Бензин розглядався як рідина, а піна як газ із фізико-механічними властивостями піни. Обидва середовища нерозчинні одне в одному. Насправді повітряно-механічна піна є двофазним середовищем, в процесі руху якої можливі зміни фаз, наприклад руйнування

піни, не розглядалися. При переході від однієї піни до іншої враховувалися їхні узагальнені фізико-механічні характеристики.

Враховувався вплив гравітації та стискання піни під дією тиску бензину, а також вплив температури на фізико-механічні властивості обох середовищ.

Рух пінних струменів розглядався тільки всередині бензину, вихід піни на поверхню горіння констатувався як факт і поведінка піни на поверхні не моделювалася через обмеження моделі.

Зміна фаз піни, а саме її кипіння внаслідок дії на неї температури і тиску лише констатувалося як факт, а зміна фізико-механічних характеристик піни внаслідок її кипіння не враховувалася через обмеження моделі.

3.2. Моделювання прогріву палива та резервуара протягом 30 хв

В SolidWorks Simulations спроектована модель резервуара об'ємом 5000 м^3 із такими внутрішніми розмірами: $\text{Ø}21000$ м, а висота 16 м з сталевими стінками товщиною 10 мм (рис. 3.1). Внизу резервуара (концентрично) розмістимо джерело пінного струменя – торець пінопроводу певного діаметра, що спрямований вертикально вгору. Зроблено припущення, що в результаті вибуху зірвало дах, тому резервуар зверху відкритий. В подальшому моделювання проводились в резервуарі з відкритим дахом.

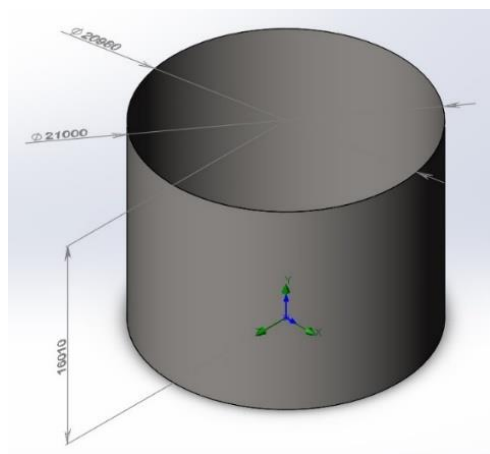


Рис. 3.1. Модель резервуара 5000 м^3 в середовищі SolidWorks Flow Simulations

Конструктивні параметри моделі:

- зовнішній діаметр 21000 мм;
- товщина стінки 10 мм;
- висота (зовнішня) 1610 мм;
- товщина днища 10 мм;
- матеріал резервуара: сталь;
- об'єм резервуара 5531 м³;
- площа поверхні дзеркала резервуара 346 м².

Початкові та граничні умови. Прийmemo температуру дзеркала горіння 433° К (160° С) що є максимально можливим значенням. Температура бортів (стінки) на рівні дзеркала горіння 650° К (377° С) встановлено експериментально [37, 38].

Температура навколишнього середовища 293° К (20° С).

Охолодження стінок резервуара – рівномірна конвекція, коефіцієнт тепловіддачі 20Вт/м²/К.

Температура над дзеркалом горіння дорівнює температурі дзеркала.

Текуче середовище – рідина (Бензин авіаційний Б70). Фізико-механічні параметри бензину, що вводились як розрахункові параметри середовища моделі, розміщені в додатку А.

Початкову температуру стін та середовища прийmemo рівною 293,2 К (за замовчуванням). Атмосферний тиск становить 101325 Па (за замовчуванням).

В загальних налаштуваннях відмітимо Нестационарність процесу, «ввімкнемо» пункти Гравітація та Теплообмін.

Параметри сітки скінченних об'ємів показано на рис. 3.2.

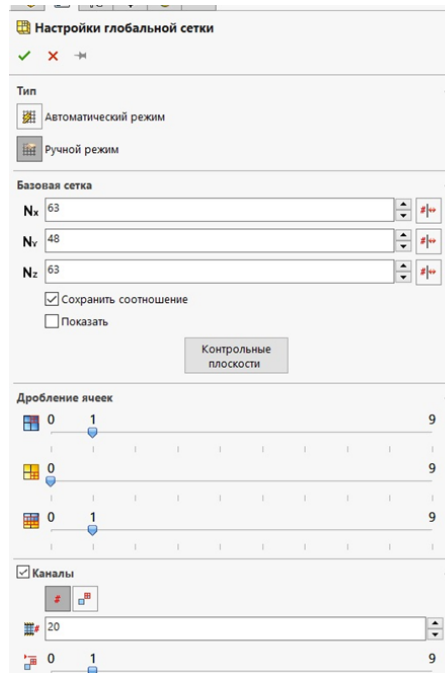


Рис. 3.2. Настроювання параметрів глобальної сітки скінченних об'ємів

Мета розрахунку визначається цілями. Ціль – це фізичний параметр, який розраховується у всій області (глобальна ціль), на заданій поверхні (повернева ціль) чи у заданій точці (точкова ціль). Значення цілі задається конкретним параметром, або описується рівнянням [23-25]. Розрахунок ведеться до тих пір, доки цей параметр (або параметри) не будуть досягнуті. У випадку нестационарності процесу визначається ще й час, протягом якого була досягнута ціль (або цілі). У нашому випадку вказуємо лише час горіння. Тривалість прогріву вибираємо максимальну – 30 хв.

Параметр	Значение
Статус	Расчет
Все ячейки	1,414,352
Ячейки в текучей среде	1,213,824
Ячейки в твердом теле	200,528
Ячейки на границе раздела твердого тела с текучей ...	72,288

Рис. 3.3. Розрахункові параметри сітки скінченних об'ємів

В результаті настроювання ми отримали сітку скінченних об'ємів з параметрами, що наведені на рис. 3.3.

Весь об'єм резервуара становить 5531 м^3 . Його розбито на 1213824 елементів, що дає нам значення об'єму одного елемента – $0,004556 \text{ м}^3$ або 4,6 л, що має забезпечити хорошу точність розрахунків [24, 39].

Хромограма розподілу температури середовища на площині, що проходить через вертикальну вісь симетрії резервуара (надалі просто площина перерізу), представлена на рис. 3.4.

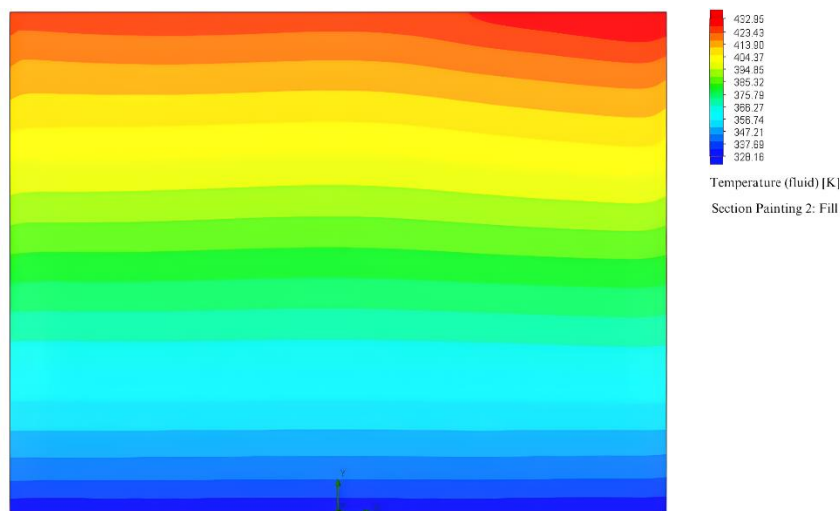


Рис. 3.4. Температура середовища на момент закінчення прогріву

Як видно із рисунка, резервуар прогрітий рівномірно, з деяким викривленням спектру біля поверхні горіння, що може бути викликане рухом середовища.

За цією хромограмою побудована графічна залежність розподілу температури середовища на момент закінчення прогріву за висотою резервуара, яку представлено на рис. 3.5.

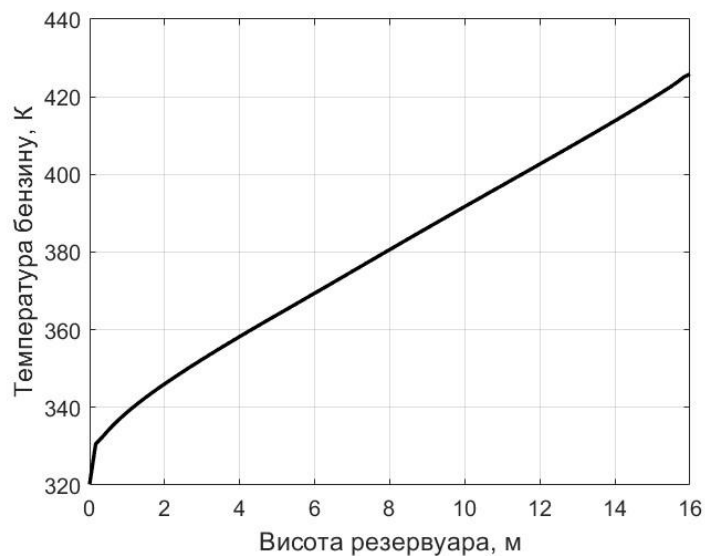


Рис. 3.5. Розподіл температури середовища на момент закінчення прогріву за висотою резервуара

Як бачимо із рисунка, резервуар погрівся повністю. Температура бензину на дні піднялась на 27°K від початкової.

Результати окремого дослідження залежності температури середовища на дні резервуара як функції від часу прогріву представлені на рис. 3.6.

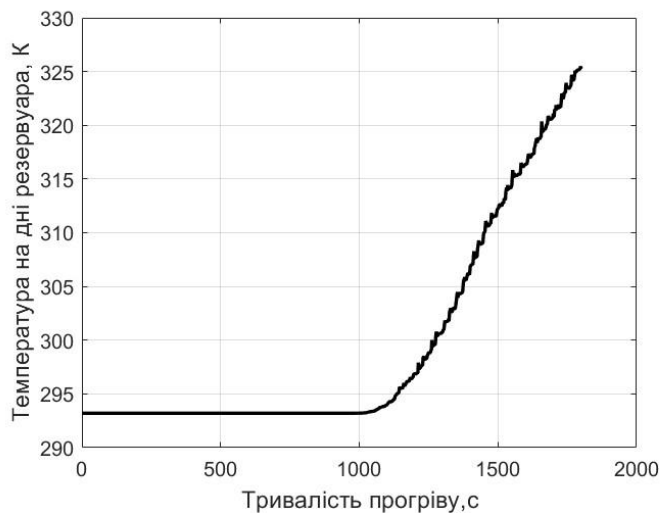


Рис. 3.6. Залежність температури на дні резервуара від часу прогріву

Як видно із рисунка, середовище на дні резервуара починає прогріватися через 17 хвилин, тому дуже важливим фактором є початок подачі піни. Чим швидше він розпочнеться, тим холодніший бензин підніметься разом з піною в зону горіння і тим ефективнішим буде процес гасіння.

На рис. 3.7 представлено хромограму вертикальної швидкості середовища на площині перерізу.

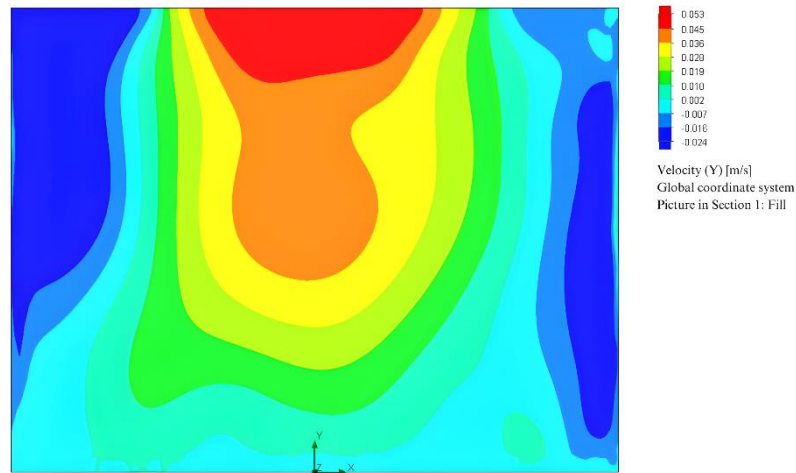


Рис. 3.7. Вертикальна швидкість прогрітого бензину

Як видно із рисунка, бензин піднімається в центрі вгору із максимальною швидкістю 5 см/с, та опускається вниз вздовж стінок резервуара із максимальною швидкістю 2,5 см/с. Тобто в процесі прогріву встановився ламінарний конвективний рух бензину, що додатково сприяє його прогріванню від пожежі та викривленню картини розподілу температури на рис. 3.4.

В процесі прогріву середовища резервуара внаслідок його горіння прогривається і сам резервуар, тобто поверхня конструкції.

У нашій моделі задана температура торця стінки на рівні дзеркала горіння значенням 650 K, що відповідає експериментально встановленим даним.

Хромограма розподілу температури на бічних поверхнях стінок резервуара представлена на рис. 3.8.

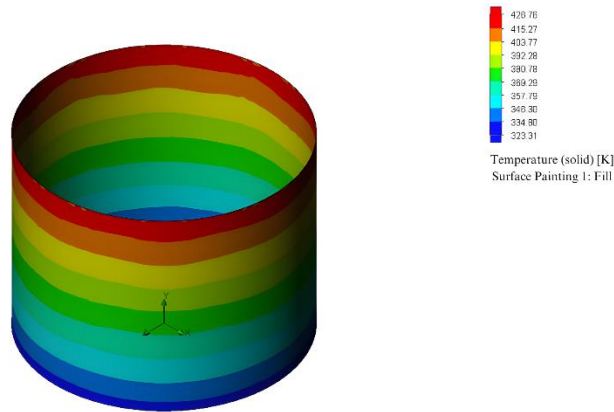


Рис 3.8. Температура стінки резервуара через 30 хв прогріву

Як видно із рисунка, стінки не прогриваються вище температури кипіння бензину, що вказує на добре охолодження стінок бензином, тобто бензин прогривається не тільки від дзеркала горіння, але і від стінок, які мають значно вищу температуру.

Як відомо, густина рідкого середовища (рідини) залежить від температури. На рис. 3.9 представлено хромограму залежності густини бензину від його температури, а на рис. 3.10 – графічну інтерпретацію цієї залежності вздовж вертикальної осі симетрії.

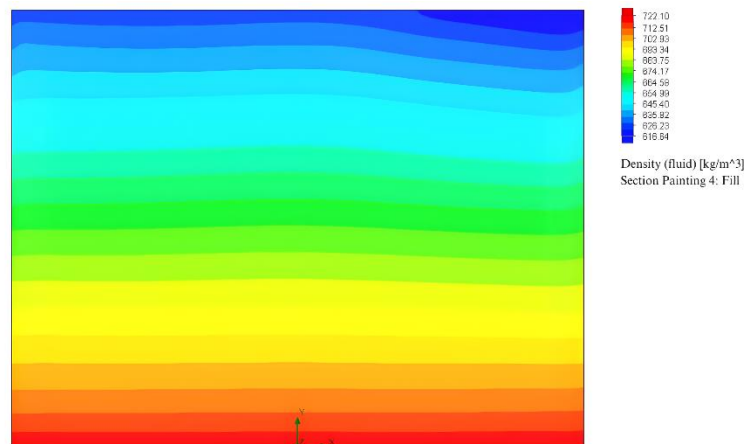


Рис. 2.9. Густина прогрітого бензину на момент закінчення прогріву.

Як видно із рисунка, густина бензину зменшується знизу в верх, тобто

більш прогріті шари палива мають меншу густину і навпаки. Це добре корелюється із хромограмою температури середовища, яка представлена на рис. 3.4.

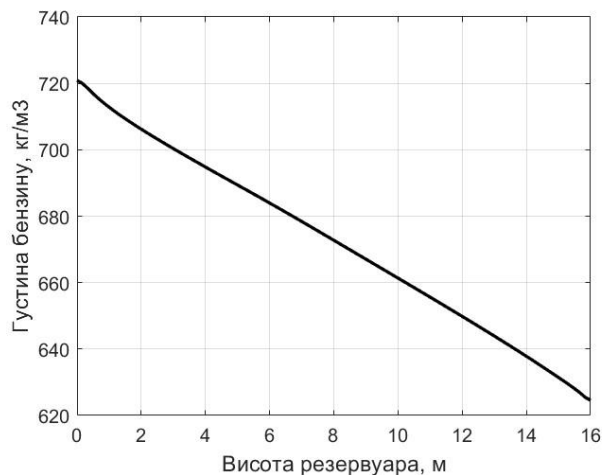


Рис. 3.10. Розподіл густини прогрітого бензину за висотою резервуара

Як видно із рисунка, початкова густина бензину (750 кг/м^3) після прогрівання змінилася від 722 внизу резервуара до 617 вгорі – в зоні горіння. Середнє значення густини бензину становить $668,5 \text{ кг/м}^3$, однак обчислення виконані за числовими результатами моделювання дають більш точне значення – $671,1 \text{ кг/м}^3$.

Як відомо, таке зменшення густини рідини призводить до збільшення її об'єму. В середовищі SolidWorks Flow Simulations [23-25] цей приріст об'єму можна визначити через масу бензину, яка витіснилася із розрахункового об'єму, тобто резервуара, оскільки об'єм резервуара у нашій моделі завжди залишається незмінним.

На рис. 3.11 представлено графічну залежність маси бензину в резервуарі від часу прогріву.

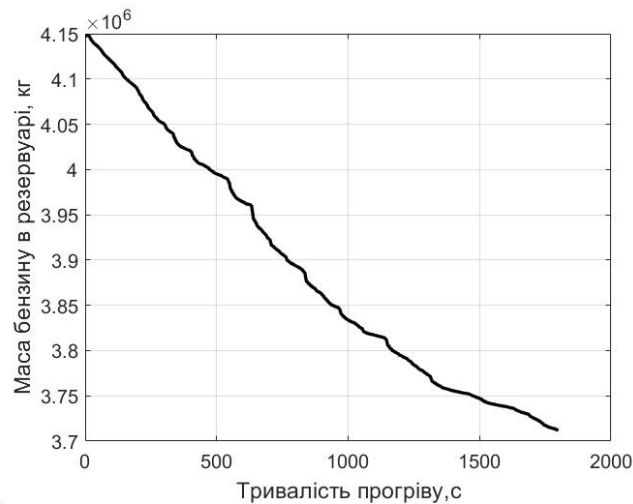


Рис. 3.11. Залежність маси бензину в резервуарі від часу прогріву

Як видно із рисунка, маса бензину в резервуарі зменшується пропорційно до його прогрівання, тобто бензин витісняється із вент заповненого резервуара, що може привести до виникнення вкрай небезпечної аварійної ситуації. Для запобігання цьому явищу, в резервуарі необхідно мати певний резервний об'єм, який і заповниться розігрітим бензином.

3.3. Визначення об'єму для компенсації розширення бензину

Об'єм резервуара в моделі визначається як $V_p = \pi D^2 / 4H$ і становить 5531 м³.

Початкова маса бензину в цьому об'ємі:

$M_1 = 4147970$ кг при значенні $\rho_1 = 750$ кг/м³.

Кінцева маса бензину на момент закінчення прогріву:

$M_2 = 3711940$ при значенні $\rho_2 = 617$ кг/м³.

Маса витісненого бензину:

$M = M_1 - M_2 = 436030$ кг

Приріст об'єму при середній густині $\rho_{\text{серед}} = 671$ кг/м³ становить:

$V_{\text{дод}} = M / \rho_{\text{серед}} = 650$ м³ (12%)

Це той об'єм бензину, на який збільшується об'єм бензину в резервуарі в результаті нагріву. Вигорання бензину становить 25 см/год [38], для нашого

резервуара площею 346 м^2 це дорівнює $87 \text{ м}^3/\text{год} =$ або 44 м^3 протягом 30 хв, тобто близько 1%, що не суттєво в порівнянні із розширенням. Тому для визначення необхідного об'єму для розміщення витісненого бензину вплив вигорання на цей об'єм враховувати не будемо.

3.4. Моделювання процесу подавання піни

Розглянемо рух пінних струменів в резервуарі із прогрітим бензином. Для цього в загальних налаштуваннях моделі до пунктів Гравітація, Теплопровідність та Нестационарність, що були відмічені на етапі прогріву, додаємо пункти Течія рідини/газу та Вільні поверхні. Останній пункт дозволяє нам розглядати сумісний рух середовищ, які не розчинні одне в іншому. Піну моделюємо як газ, що дозволяє враховувати стискання піни під дією тиску бензину. Моделювання повітряно-механічної піни як системи з бульбашок рідини і газу на сьогодні, на жаль, ще неможливе. Тому двофазну неоднорідну систему вода–повітря замінимо суцільним середовищем – газом із фізико-механічними параметрами піни. Фізико-механічні властивості піни, які використовуються в моделі, наведені в додатку А. Надалі, під текучим середовищем ми розумітимемо суміш піни та бензину.

Подавання піни будемо здійснювати із самого низу резервуара із 6 сопел (рис. 3.12), які розташовані рівномірно по кільцевому трубопроводу середнього радіуса діаметром 14 м. Насправді стволи треба відокремити від дна резервуара на певну висоту, яку ми зараз встановлювати не будемо, тому приймемо їх розміщення в самому низу конструкції.

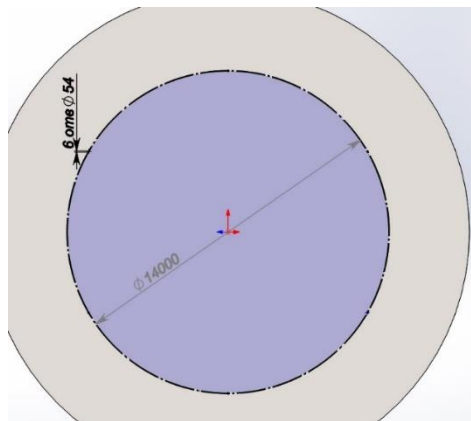


Рис. 3.12. Схема розташування пінних стволів

Для того, щоб струмені піднімалися вгору якомога швидше, рознесемо їх (6 шт.) на певну оптимальну [40] відстань.

Подавання піни кратністю 10 (К10) визначимо із необхідної інтенсивності $0,08 \text{ л/с} \times \text{м}^2$ [27], що в перерахунку на площу нашого резервуара встановлює значення масової подачі $Q_m = 28 \text{ кг/с}$, або $Q_v = 0,14 \text{ м}^3/\text{с}$ в перерахунку на піну кратністю 5, оскільки піна кратність 10 стискатиметься вдвічі від дії на неї тиску на дні резервуару.

Для верифікації моделі розглянемо подачу піни протягом короткого проміжку часу (10 с, для уникнення змішування потоків та впливу цього процесу на аналіз стану середовища).

Хромограма швидкості пінних струменів на площині перерізу через 10 с подавання піни К10 об'ємною подачею $Q=0,14 \text{ м}^3/\text{с}$ представлена на рис. 3.13.

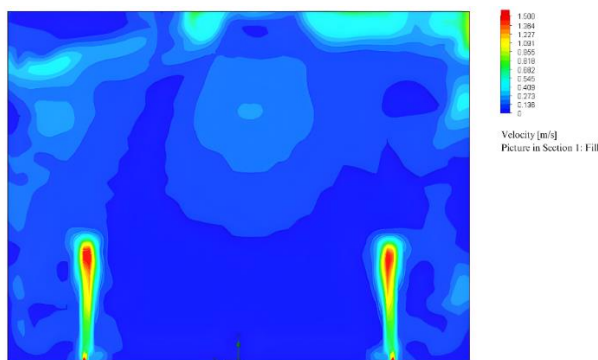


Рис. 3.13. Швидкість пінних струменів

Як бачимо, на площині перерізу, що проходить через осі двох струменів видно чітко сформовані струмені і, що важливо, кінетична енергія цих струменів передалася у верхні шари резервуара швидше від самих струменів, що характерно для пружного середовища і позитивно характеризує адекватність моделі на якісному рівні. З метою полегшення візуального аналізу хромограми, максимальні значення швидкості струменів відфільтровано до 1,5 м/с (це максимум в зоні голови струменя, а все що вище – зливається в червоному кольорі).

Насправді максимум знаходиться на виході струменів із сопла і становить 11,8 м/с. Фільтр всі вищі від 1,5 м/с значення швидкості замальовує червоним. Це дозволяє нам краще розгледіти (аналізувати) нижчі значення швидкостей.

Для визначення значення можливої похибки моделі побудуємо графічні залежності абсолютних значень швидкості на осі струменя. Епюра вертикальної швидкості струменя на виході з сопла впоперек до його осі представлена на рис. 3.14.

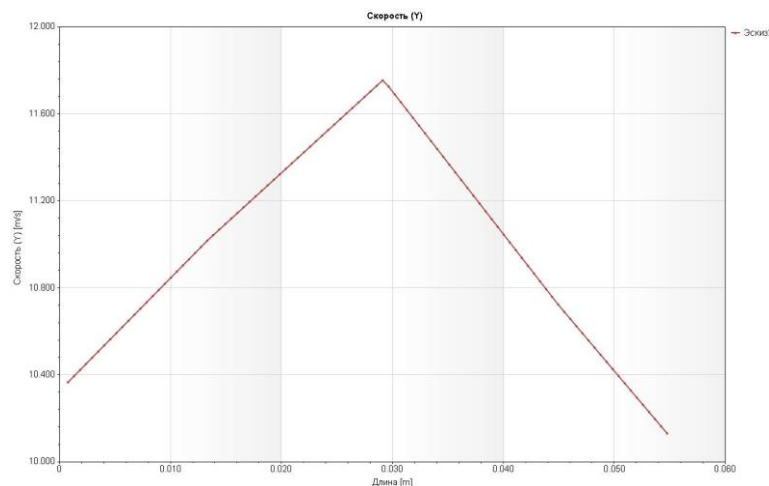


Рис. 3.14. Епюра вертикальної швидкості на виході з сопла (впоперек до осі)

Середнє значення швидкості для сопла діаметром 54 мм та об'ємними витратами рідини визначені за відомими із курсу гідравліки формулами [37] і повинні становити 10,2 м/с, а у нашому випадку це значення становить 11 м/с, тобто відносна похибка є рівною 8%. Отже, точність отриманих результатів є

досить добра.

Епюру вертикальної швидкості струменя на виході з сопла вздовж його осі представлено на рис. 3.15.

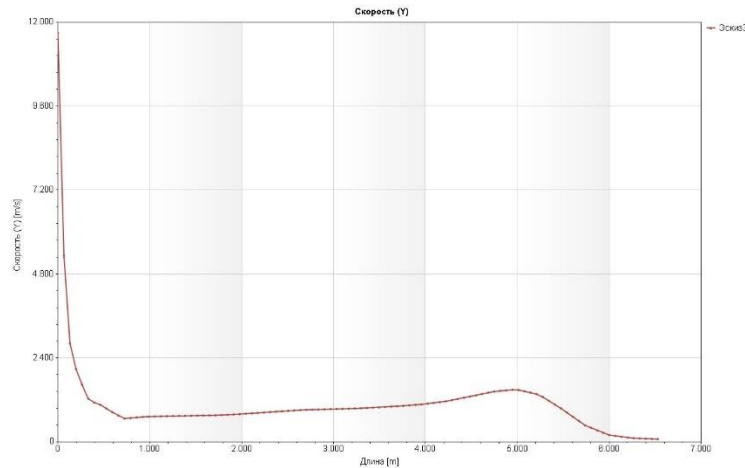


Рис. 3.15. Епюра вертикальної швидкості на виході з сопла (вздовж осі)

Як видно із рисунка, швидкість струменя від початкового значення 11,8 м/с різко зменшилася до 0,8 м/с і на довжині струменя 5 м зросла вдвічі (до 1,5 м/с), що на якісному рівні повністю підтверджується даними, наведеними в роботі [27].

Тут теж спостерігається дія сили тертя в'язкості та сили Архімеда, що теж підтверджує адекватність нашої моделі.

Хромограми на площині перерізу резервуара інших результатів моделювання, а саме: масової концентрації пінних струменів, густини та температури прогрітого текучого середовища, подані в додатку Б.

Враховуючи адекватність отриманих результатів моделювання досить короткочасного процесу, перейдемо до розгляду більш тривалого процесу подавання піни, а саме – 1 хв.

Результати моделювання процесу подавання піни протягом 60 секунд подано в додатку Б.

Як показали проведені теоретичні дослідження процесу подачі пінних струменів в середовище прогрітого бензину, ламінарний рух струменів в

середовищі триває лише протягом незначного проміжку часу і переходить в турбулентний.

Піна акумулюється в середовищі бензину в середній частині резервуара і лише через певний проміжок часу (55 с) виходить на поверхню у вигляді окремих частин.

Піна перед виходом на поверхню перегрівається, руйнується (закипає) і виходить на поверхню горіння у вигляді водяної пари та повітря.

При цьому спостерігається локальне охолодження ділянок дзеркала горіння у зоні виходу пари.

3.5. Визначення впливу температури на процес виходу піни на поверхню горіння

Для визначення впливу зміни густини прогрітого текучого середовища на силу Архімеда, розглянемо рух пінних струменів в холодному і гарячому середовищі.

На рисунку 3.16 наведено графічну залежність масових витрат піни на виході із резервуара (на дзеркалі горіння) від тривалості її подавання та температури середовища.

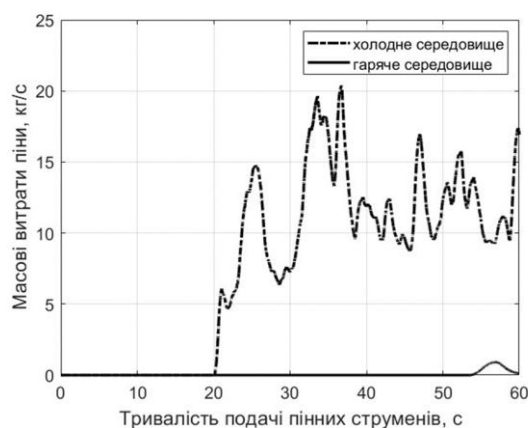


Рис. 3.16. Графічна залежність масових витрат піни на виході із резервуара від часу подавання та температури середовища

Як видно, у випадку холодного середовища піна виходить на поверхню горіння через 20 с подачі, і досягає максимального значення 20 кг/с через 35 с.

Надалі масові витрати зменшуються і їх середнє значення близьке до половини масових витрат піни на вході в резервуар, а саме – 14 кг/с. Тобто відбувається певне накопичення піни в резервуарі. У випадку гарячого середовища піна виходить на 57-ій секунді і її масові витрати становлять 0,9 кг/с, тобто вся піна, яка була подана протягом 1 хв, знаходиться в резервуарі.

На рис. 3.17 представлено проінтегровану залежність 3.16 – кількість піни яка вийшла на поверхню горіння за одиницю часу.

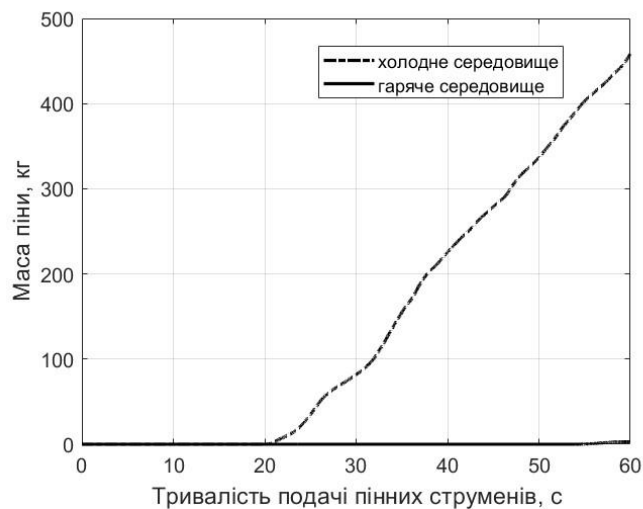


Рис. 3.17. Графічна залежність маси піни на виході із резервуара від часу подавання та температури

Як видно із рис. 3.17, у випадку холодного середовища протягом 60 с на поверхню піднялося 450 кг піни, а у випадку гарячого середовища – лише 3 кг, що в 150 раз менше. Слід відмітити, що подано було 1680 кг протягом 60 с.

Отже, температура текучого середовища не випускає піну на поверхню шляхом зменшення підйомної сили через падіння густини середовища.

3.6. Подавання піни різної кратності протягом 1500 с

Практичний досвід підшарового гасіння вказує на те, що тривалість подавання піни не перевищує 25 хв. Виходячи з цього, змодельємо процес

подавання піни різної кратності (K5 і K10) з мінімально необхідною інтенсивністю подавання. Піна K10 $Q = 0,14 \text{ м}^3/\text{с}$ (28 кг/с) та піна K5 $Q = 0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ (28 кг/с). Результати моделювання процесу подачі піни представлено на рис. 3.18 – 3.24.

На рис. 3.18 представлено графічну залежність масових витрат піни на дзеркало горіння від часу її подавання.

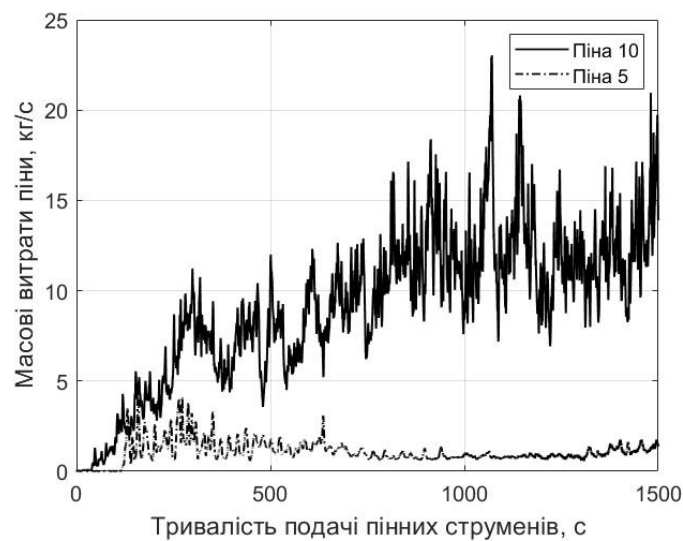


Рис. 3.18. Графічна залежність масових витрат піни на дзеркалі горіння від часу подавання

Як видно із графіка, піна K10 як і піна K5 піднімаються на поверхню дзеркала горіння нерівномірно, із значними коливаннями продуктивності. Масові витрати піни K10 є значно вищими від витрат піни K5, що призводить до різної кількості поданої на дзеркало піни, (рис. 3.19).

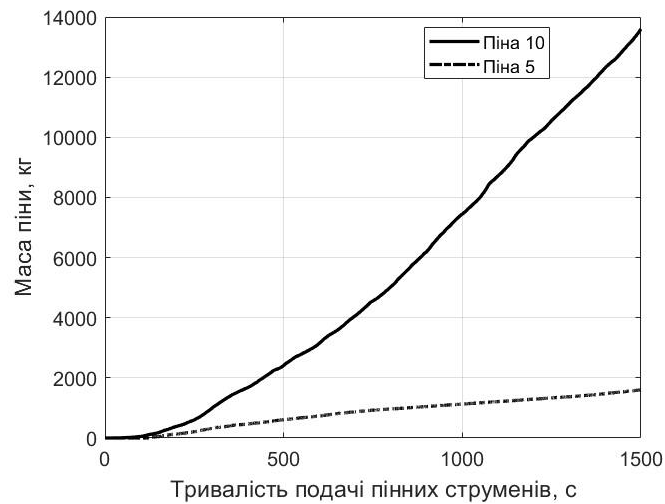


Рис. 3.19. Графічна залежність виходу маси піни на дзеркалі горіння від часу подавання

Як видно із графіка, маса піни К10 на дзеркалі горіння є у 8 разів більшою від маси піни К5. Тобто піни К5 в резервуарі має бути значно більше.

На рис. 3.20. представлено графічну залежність об'єму піни К5 і К10 в резервуарі від часу її подавання.

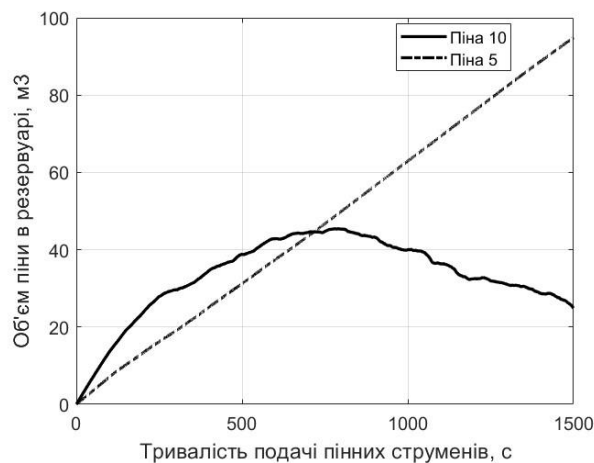


Рис. 3.20. Графічна залежність об'єму піни в резервуарі від часу її подавання

Як видно із графіка, об'єм піни 5 зростає пропорційно до часу подавання, в той же час об'єм піни 10 зростає непропорційно і через половину часу (750 с)

починає зменшуватися, тобто піна K10 більш інтенсивно покидає резервуар і на момент закінчення часу подавання піни K10 залишається приблизно 25 м^3 . Об'єм піни K5 в резервуарі становить 95 м^3 .

На рис. 3.21 – 3.22 представлено хромограми масової концентрації піни різної кратності (K10 і K5) на момент часу 600 с.

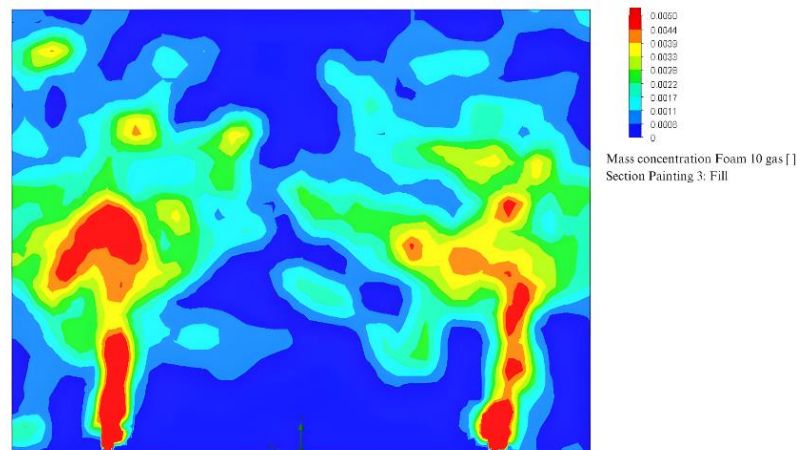


Рис. 3.21. Хромограма концентрації піни 10 на 600 с подавання

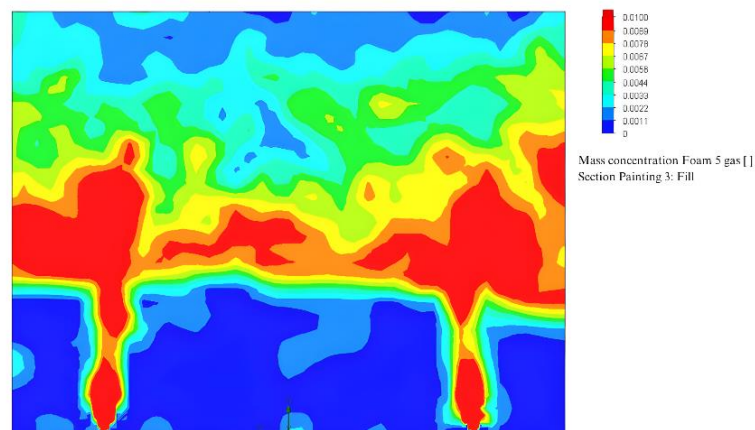


Рис. 3.22. Хромограма концентрації піни 5 на 600 с подавання

Як видно із рисунків, піна K10 збирається в меншу хмару і її струмені майже не зливаються. Піна K5 практично зливається в одну хмару.

Подальше зависання піни K5 зображено на рис. 3.23.

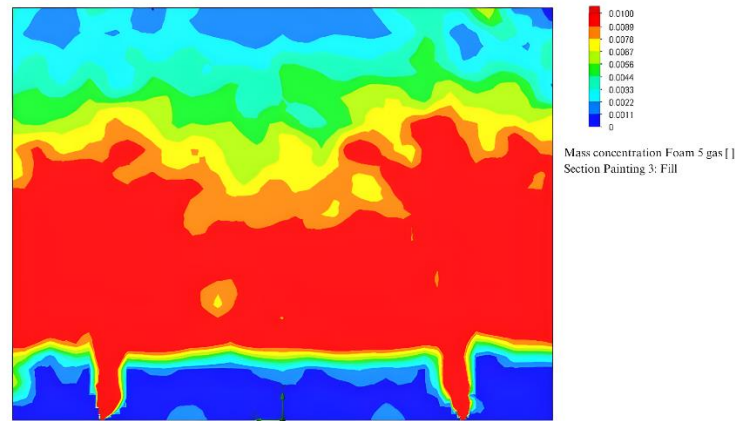


Рис. 3.23. Хромограма концентрації піни 5 на 900 с подавання

Як видно із хромограм піна у всіх випадках виходить на поверхню дзеркала горіння окремими фрагментами, причому фрагментарність виходу піни K10 є значно вищою, що також видно і на рис. 3.18.

На рис. 3.24 представлено графічну залежність температури на дзеркалі горіння від часу подачі пінних струменів (мінімальні значення).

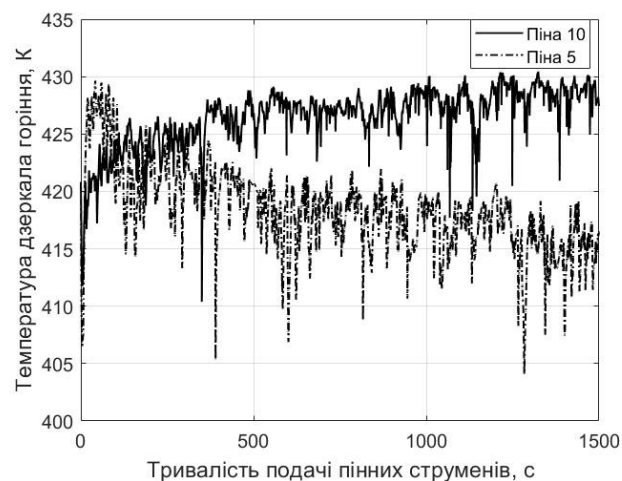


Рис. 3.24. Графічна залежність мінімальної температури на дзеркалі горіння від часу подавання піни

Як видно із графіка швидкий підйом піни K10 не охолоджує дзеркало горіння (температура росте), а зависання піни K5 призводить до доброго

теплообміну з бензином і температура на дзеркалі горіння падає.

Однак, як показують отримані результати дослідження математичної моделі, виходу піни на поверхню протягом 25 хв не спостерігається. Лише пара. Однак практичний досвід вказує на те, що 25 хв подачі і не потрібно, адже пожежа гаситься швидше.

Висновок. Те що ми не враховуємо впливу водяної пари на полум'я призводить до неадекватної моделі, в якій піна не пробивається на поверхню дзеркала горіння протягом 25 хв.

Насправді, водяна пара, пробиваючись на поверхню горіння змішується із парою бензину, що погіршує його горіння. Також охолодження середовища на дзеркалі зменшує пароутворення бензину, що теж погіршує процес горіння.

Тобто, для успішного моделювання цілого процесу підшарового гасіння нам потрібна ще одна модель – газова за дзеркалом. Щоб компенсувати її відсутність і покращити адекватність наявної моделі, зробимо таке припущення: подавання 28 кг/с піни K10 протягом 5 хв приводить до зменшення температури на дзеркалі горіння зі 160°C до 100°C.

Результати моделювання процесу подавання пінних струменів піни K10 із примусовим охолодженням дзеркала горіння від температури 433 К до 373 К представлені на рис. 3.25 – 3.29.

На рис. 3.25 представлено графічну залежність масових витрат піни K10 на дзеркалі горіння від часу її подавання. Час подавання піни триває 420 с, тобто перші 5 хв температура опускається, а дві наступні хвилини, протягом яких температура не змінюється потрібні для спостереження за процесом виходу піни на поверхню дзеркала горіння.

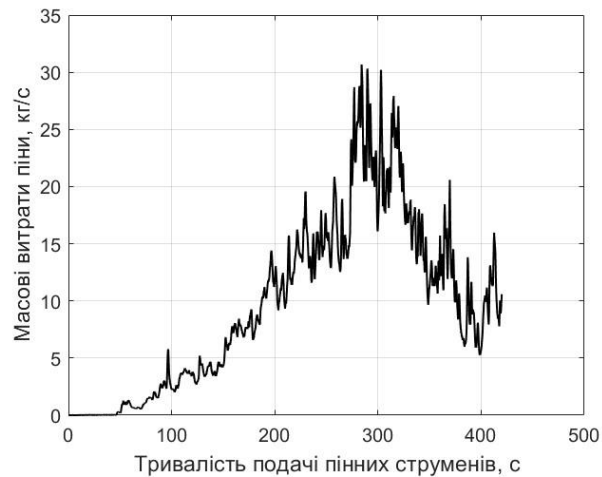


Рис. 3.25. Графічна залежність масових витрат піни К10 на дзеркалі горіння від часу її подавання

Як видно із графіка, піна досить інтенсивно виходить на охолоджену поверхню. Пікові витрати становлять 30 кг/с при вхідному подаванні 28 кг/с. Відбувається своєрідний розряд акумулятора, після якого масові витрати піни зменшуються.

Графічну залежність маси піни, що вийшла на поверхню від часу подавання пінних струменів, представлено на рис. 3.26.

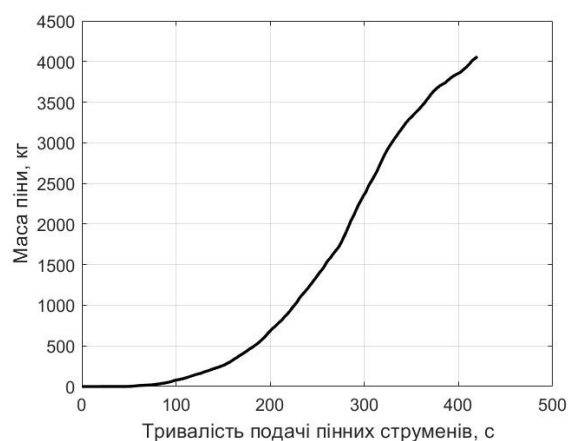


Рис. 3.26. Графічна залежність виходу маси піни на дзеркалі горіння від часу подавання

Як видно із рисунка, протягом перших п'яти хвилин виходить 2,5 тони

піни, а протягом наступних 2 хвилин виходить 1,5 тони, що можна пояснити зменшенням температурного впливу на силу Архімеда.

На рис. 3.27 представлено графічну залежність температури середовища на дзеркалі горіння від часу подавання пінних струменів. На графіку представлено як мінімальне, так і середнє значення температури потоку.

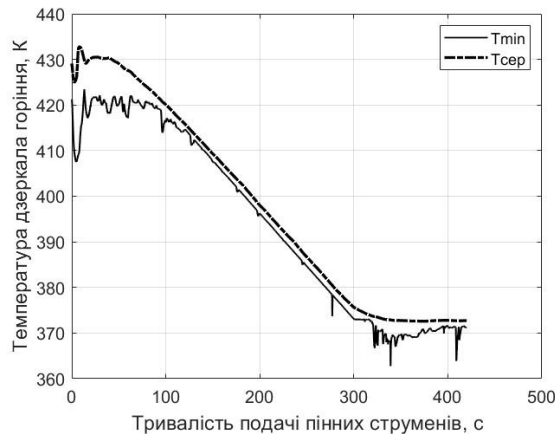


Рис. 3.27. Графічна залежність температури на дзеркалі горіння від часу подачі піни

Як видно із графіка – зниження температури із 433 К до 373 К призводить до дещо інерційного зниження середньої температури середовища, тому на поверхню виривається пара, а не піна. Піна, як видно із графіка, починає виходити на 322 секунді ($T_{\min} = 367\text{K}$), тобто із затримкою в 20 с.

3.7. Визначення кількості піни на дзеркалі горіння

Піна K10 (кратність на вході 5, на виході без впливу температури 10, із підігрівом 12,5). Початок з 322 с до 420 с. Вийшло (рис. 3.26) $M=4060-2900=1160$ кг (K12,5).

$$\text{Отже } Q_m = (1160 / (420 - 322)) = 11,8 \text{ кг/с};$$

$$Q_v = Q_m \times K = 11,8 \times 12,5 = 148 \text{ л/с}$$

Час умовного гасіння (досягнення товщини 100 мм на дзеркалі, $V=35 \text{ м}^3$)

становить: $35/0,148=237$ с

Повний час гасіння $322+237=559 = 560$ с

На рис. 3.28 представлено залежність конвективного теплового потоку від тривалості подавання піни в резервуар.

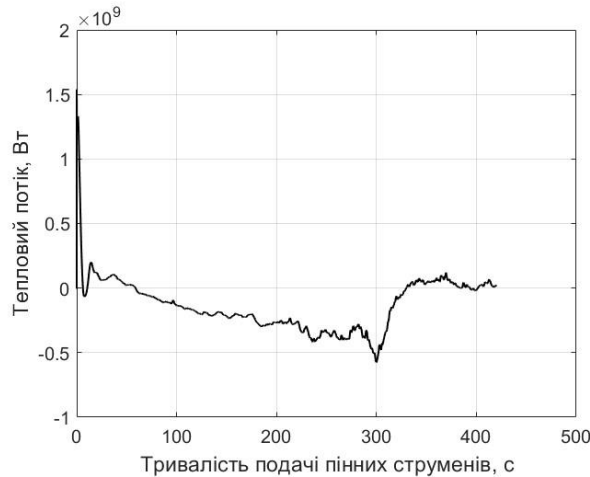


Рис. 3.28. Графічна залежність конвективного теплового потоку від часу

Конвективний тепловий потік на кінцевому етапі прогріву становить 244 МВт. В процесі подавання піни відбувається певне збурення, після якого він спадає, коливаючись в міру охолодження дзеркала горіння в діапазоні від 0 до 500 МВт, тобто відбувається зменшення температури. Вихід пари призводить до різкого охолодження, піковою потужністю 0,1 ГВт. Подальше піднімання температури викликане штучним підтримуванням поверхні горіння на рівні 373 К (100 °С).

На рис. 3.29 зображено проінтегровану попередню залежність – енергію теплового потоку на дзеркалі горіння.

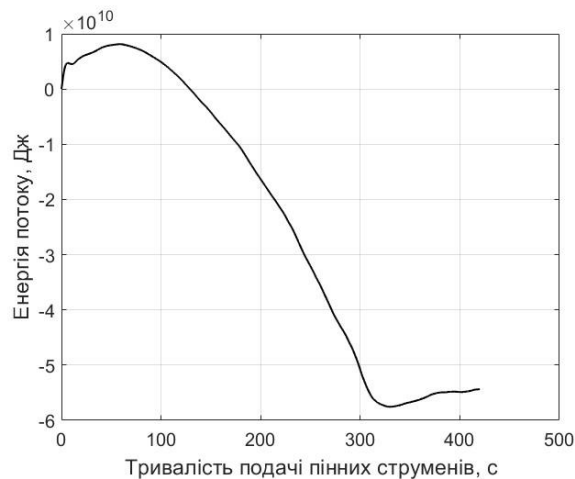


Рис. 3.29. Графічна залежність енергії потоку від часу

Як видно із графіка, в процесі подачі піни відбувається піднімання гарячих верхніх шарів бензину із подальшим нагрівом текучого середовища від його горіння, а енергія охолодження підводиться із запізненням на 130 с. Енергія охолодження становить близько 60 ГДж. Подальший підйом енергії в бік нагріву пов'язаний із недостатньою адекватністю моделі, тому що температура дзеркала залишається на рівні 100°C , що не відповідає дійсності.

3.8. Подавання піни різної інтенсивності і кратності

Необхідна мінімальна інтенсивність подавання піни в резервуар для підшарового гасіння становить 28 кг/с, резервуар діаметром 16 м. З урахуванням гідростатичного тиску ця піна подається під тиском 2 атм на виході із сопла. Збільшивши напір до зростання тиску в 3 атм, отримаємо 42 кг/с, відповідно, в 4 атм – 56 кг/с. Тобто ми так збільшимо мінімальну необхідну інтенсивність подачі в 1,5 та 2 рази.

На рис. 3.30 зображено графічну залежність маси піни K10 на дзеркалі горіння від часу її подавання та тиску.

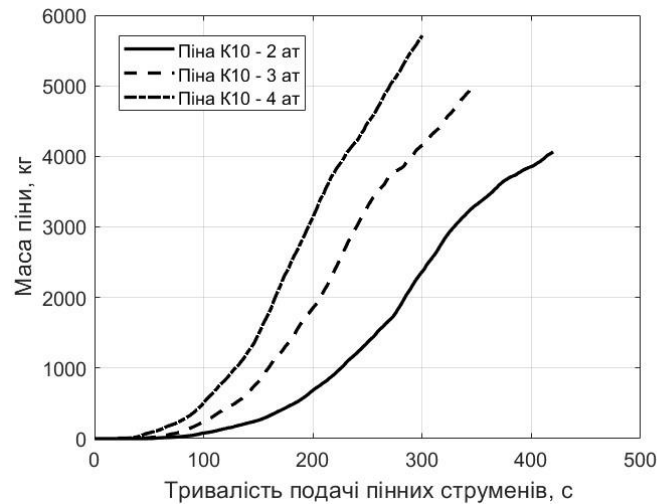


Рис. 3.30. Графічна залежність маси піни на дзеркалі горіння від часу її подавання та тиску

Як видно із графіка, маса пари від піни яка подається під тиском 2 атм та виходить на поверхню горіння протягом 5 хвилин, приблизно дорівнює 2500 кг. Піна, що подається під тиском 3 атм досягає цього рівня протягом 220 с, а піна, що подається під тиском 4 атм – протягом 180 с. Отже, як видно із рисунка, чим більший тиск подаванні піни, тим швидший її вихід. Тобто температуру дзеркала горіння слід перемкнути із 160 °С до 100 °С швидше, пропорційно до виходу маси піни значенням 2500 кг. Для тиску 3 атм це буде 220 с, а для тиску 4 атм – 180 с. Також слід збільшити тривалість дослідження моделі після скидання температури, оскільки, як показали дослідження, спочатку іде викид пари, а потім, в міру зменшення середньої температури, вже іде піна. Для визначення продуктивності виходу піни на поверхню горіння встановимо часовий проміжок 120 с після виходу піни

Це ж саме проробимо з піною кратністю 5.

На рис. 3.31 зображено графічну залежність маси піни K5 на дзеркалі горіння від часу її подавання та тиску.

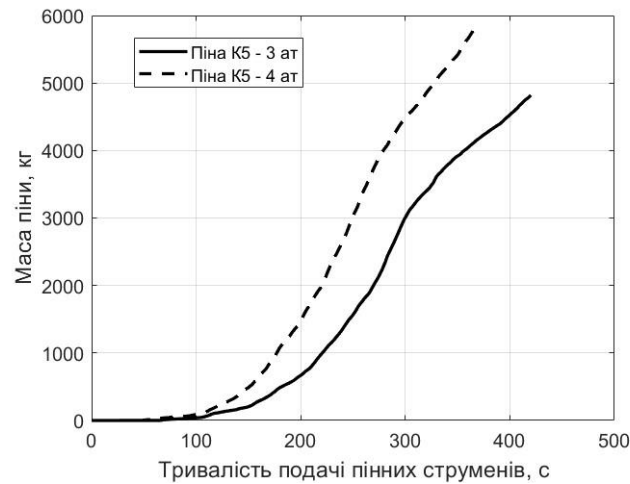


Рис. 3.31. Графічна залежність маси піни К5 на дзеркалі горіння від часу її подавання та тиску

На рисунку 3.31 не подано піну К5 під тиском 2 ат, оскільки вона не пробивається на поверхню протягом 5 хвилин.

Виходячи з цього, подальші дослідження процесу підшарового гасіння проведемо для таких параметрів піни:

1. Піна К10-3 атм 220 с+120 с;
2. Піна К10-4 атм 180 с+120 с;
3. Піна К5-3 атм 285 с+120 с;
4. Піна К5-4 атм 245 с+120 с.

Результати моделювання представлені на рис. 3.32 – 3.38.

Графічна залежність масових витрат піни К10 і пари на виході з резервуара від часу при тиску подачі 3 атм зображена на рис. 3.32.

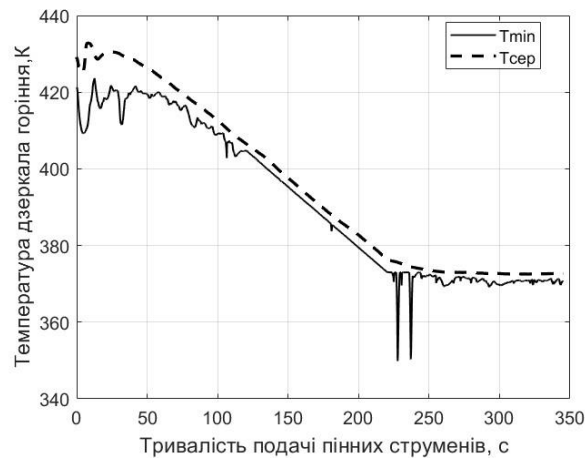


Рис. 2.32. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна K10, 3 атм).

Вихід піни K10 (кратність на вході 5, на виході без впливу температури 10, із підігрівом 12,5) при тиску 3 атм із 225 с до 340 с (рис. 3.30) становить:

$$4335 - 2590 = 1745 \text{ кг (K12,5);}$$

$$Q_m = 15,2 \text{ кг/с;}$$

$$Q_v = 190 \text{ л/с;}$$

Q_m – масова витрата піни, кг/с;

Q_v – об'ємна витрата піни, л/с.

Час умовного гасіння (досягнення висоти шару піни 100 мм на дзеркалі, $V = 35 \text{ м}^3$) становить: $35/0,19 = 184 \text{ с}$.

Повний час гасіння: $225 + 184 = 409 \text{ с}$.

Графічна залежність масових витрат піни K10 і пари на виході резервуара від часу при тиску подачі 4 атм зображена на рис. 3.33.

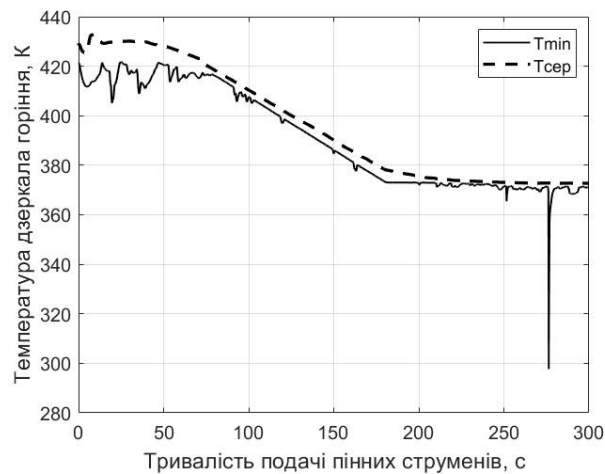


Рис. 3.33. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна K10, 4 атм)

Вихід піни K10 (кратність на вході 5, на виході без впливу температури 10, із підігрівом 12,5) при тиску 4 атм із 200 с до 300 с (рис. 3.30) становить:

$$5688 - 3142 = 2546 \text{ кг (K12,5);}$$

$$Q_m = 25.5 \text{ кг/с;}$$

$$Q_v = 318 \text{ л/с.}$$

Час умовного гасіння (досягнення висоти шару піни 100 мм на дзеркалі, $V=35 \text{ м}^3$) становить: $35/0,32 = 110 \text{ с.}$

$$\text{Повний час гасіння: } 200 + 110 = 310 \text{ с.}$$

Графічна залежність масових витрат піни K5 і пари на виході резервуара від часу при тиску подачі 3 атм зображена на рис. 3.34.

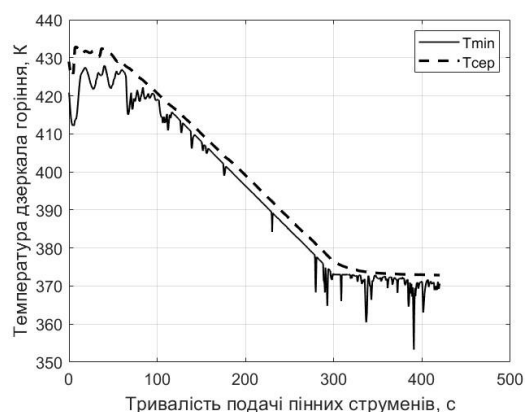


Рис. 3.34. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна K5, 3 атм)

Вихід піни К5 (кратність на вході 2,5, на виході без впливу температури 5, із підігрівом 6,25) при тиску 3 атм із 280 с до 420 с (рис. 3.31) становить:

$$4800 - 2341 = 2459 \text{ кг (К6,25);}$$

$$Q_m = 17,6 \text{ кг/с;}$$

$$Q_v = 110 \text{ л/с.}$$

Час умовного гасіння (досягнення висоти шару піни 100 мм на дзеркалі, $V = 35 \text{ м}^3$) становить: $35/0,110 = 318 \text{ с.}$

$$\text{Повний час гасіння: } 280 + 318 = 598 \text{ с.}$$

Графічна залежність масових витрат піни К5 і пари на виході резервуара від часу при тиску подачі 4 атм зображена на рис. 3.35.

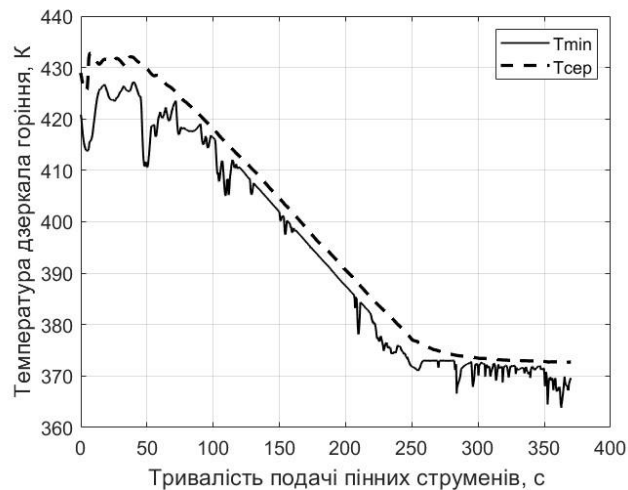


Рис. 3.35. Температура середовища на дзеркалі горіння (піна К5, 4 атм)

Вихід піни К5 (кратність на вході 2,5, на виході без впливу температури 5, із підігрівом 6,25) при тиску 4 атм із 250 с до 370 с (рис. 3.31) становить:

$$5893 - 3000 = 2893 \text{ кг (К6,25);}$$

$$Q_m = 24,1 \text{ кг/с;}$$

$$Q_v = 150,7 \text{ л/с.}$$

Час умовного гасіння (досягнення висоти шару піни 100 мм на дзеркалі, $V = 35 \text{ м}^3$) становить: $35/0,151 = 232 \text{ с.}$

$$\text{Повний час гасіння: } 250 + 232 = 482 \text{ с.}$$

Результати, отримані внаслідок моделювання, представлені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Результати дослідження моделі

Піна	Час подачі до гасіння, с	Витрати піни, кг	Витрати піноутворювача, кг
K10 - 3 ат	410	17220	1377
K10 - 4 ат	310	17360	1389
K5 - 3 ат	598	25116	4019
K5 - 4 ат	482	26992	4319

Виходячи з отриманих даних, робимо висновок, що подавання піни K5 займає більше часу ніж подавання піни K10 та є економічно не вигідним.

3.9. Визначення об'єму додаткового витіснення бензину

Додаткове витіснення бензину, крім його розширення від прогріву, відбувається ще й через об'єм піни, яка знаходиться в резервуарі.

На рис. 3.36 представлено графічну залежність об'єму піни в резервуарі від кратності піни, тиску та часу її подавання.

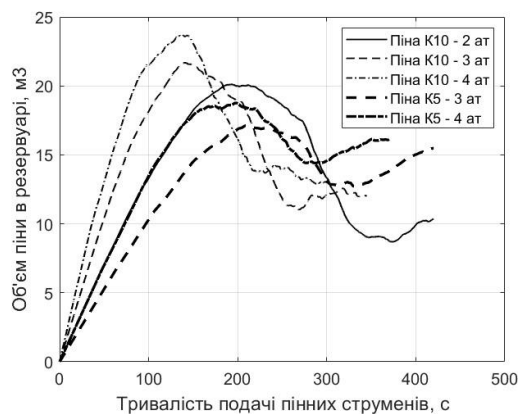


Рис. 3.36. Графічна залежність об'єму піни в резервуарі від кратності піни, тиску та часу її подавання

Як бачимо, максимальне значення об'єму піни в резервуарі становить 20 - 24 м³ у випадку піни K10 та 17 – 19 м³ у випадку піни K5. Тобто вплив різниці в об'ємах піни на витискання бензину – незначний. Однак різна охолоджувальна здатність піни з різними параметрами теж впливатиме на об'єм витіснення бензину.

На рис. 3.37, представлено енергію конвективного теплового потоку для піни з різними параметрами залежно від тривалості подавання струменів.

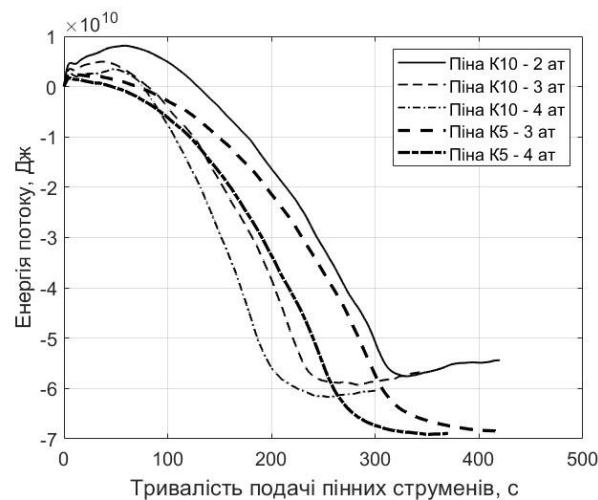


Рис. 3.37. Залежність енергії конвективного теплового потоку від кратності піни, тиску та часу її подавання

Як видно із рис. 3.37 охолоджувальна здатність пінних струменів є різною. Вона залежить від параметрів піни, продуктивності та тривалості подачі. Слід відмітити, що охолоджувальна здатність піни K5 є кращою за K10.

На рис. 3.38 представлено залежність маси бензину в резервуарі від тривалості подачі пінних струменів із різними параметрами.

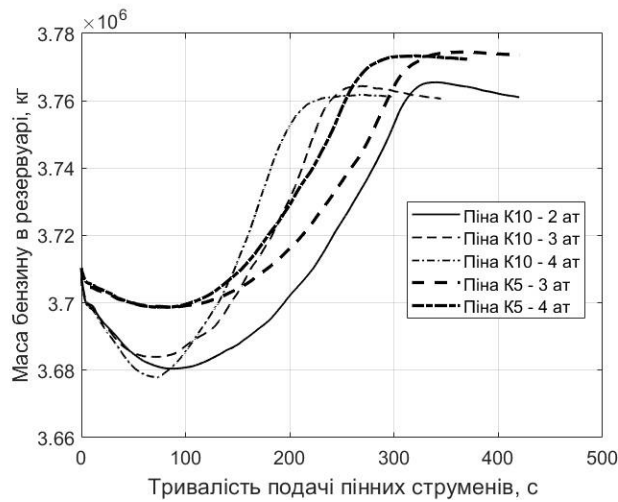


Рис. 3.38. Графічна залежність маси бензину в резервуарі від кратності піни, тиску та часу її подавання

Як видно із рисунка, маса бензину в резервуарі зменшується лише протягом перших 100 с і залежить від кратності піни. В подальшому часі весь витіснений бензин повертається до попереднього рівня внаслідок його охолодження. Із рисунка видно вплив кратності піни на витіснення бензину. Чим вища кратність піни, тим більше бензину витісняється з резервуара.

Додатковий об'єм, який варто виділити в процесі гасіння пожежі, визначаємо за формулою:

$$V_{\text{дод}} = \frac{M_1 - M_2}{\rho_{\text{сер}}}, \quad (3.10)$$

де M_1 – кінцева маса бензину на момент закінчення прогріву, кг

M_2 – нижнє значення маси бензину при подаванні протягом перших 100 с при різних значеннях кратності, кг.

Для піни К10 значення M_2 становить 3677950 кг, а для піни К5 значення M_2 – 3698730 кг, згідно з рис. 3.38;

$\rho_{\text{сер}}$ – середнє значення густини бензину, кг/м³.

1. У випадку використання піни К10 $V_{\text{дод}}$ становить 51 м³;

2. У випадку використання піни К5 $V_{\text{дод}}$ становить 20 м³.

Отже, з урахуванням попереднього прогріву бензину під час його горіння протягом 30 хв необхідний резервний об'єм становить:

$$V_{\text{рез}} = V_1 + V_{\text{дод}}. \quad (3.11)$$

1. У випадку гасіння піною К10 $V_{\text{рез}}$ становить 701 м³ (12,7%);
2. У випадку гасіння піною К5 $V_{\text{рез}}$ становить 670 м³ (12,1%).

Із цього робимо висновок, що використання піни К5 для підшарового гасіння пожежі в резервуарах із паливом є недоцільне.

Піна К10 повинна подаватися з максимально можливою продуктивністю, оскільки її подача визначає як час гасіння, так й об'єм додаткового витіснення бензину.

3.10. Економічне обґрунтування переходу на технологію гасіння компресійною піною: скорочення витрат і підвищення ефективності пожежогасіння

Для аналізу економічної ефективності використання компресійної піни для підшарового гасіння нафтопродуктів (бензин) у резервуарах розглянуто розрахунки для резервуара РВС-5000, змодельованого в середовищі SolidWorks Flow Simulations. Площа дзеркала горіння становить 346 м². Рекомендована інтенсивність подавання піни для підшарового гасіння, згідно з [40] становить 0,08 л/м³×с. Усі розрахунки виконано на основі цієї інтенсивності.

Геометричні параметри резервуарів та необхідна кількість стволів для охолодження резервуарів і генераторів піни для гасіння нафтопродуктів в них

Геометричні параметри резервуарів				Кількість водяних стволів для охолодження резервуара:		Кількість генераторів піни для гасіння резервуара, де зберігається:	
об'єм ($V_{рез}$), м ³	діаметр ($D_{рез}$), м	висота ($H_{рез}$), м	площа дзеркала горіння ($S_{рез}$), м ²	що горить	сусіднього	бензин, гас	дизпаливо
				А або аналог/ лафетні			
100	4,7	6	17,3	3/-	2/-	1/-	1/-
200	6,6	6	34,2	3/-	2/-	1/-	1/-
300	7,6	7,5	45,3	3/-	2/-	1/-	1/-
400	8,5	7,5	56,7	3/-	2/-	1/-	1/-
700	10,4	9	84,9	4/-	2/-	2/-	1/-
1 000	10,4	12	84,9	4/-	2/-	2/-	1/-
2 000	15,2	12	181,4	6/3	2/2	3/1	2/1
3 000	19	12	283,4	7/3	2/2	4/2	3/1
5 000	21	15	346,2	-/3	-/2	5/2	3/1
10 000	28,5	18	637,6	-/4	-/2	9/3	6/2
20 000	40	18	1256	-/5	-/2	17/5	11/4
30 000	45,6	18	1632,3	-/6	-/2	22/7	14/5
40 000	56,9	18	2541,5	-/8	-/2	34/11	22/7
50 000	60,7	18	2892,3	-/8	-/2	39/12	25/8

Згідно табл. 3.2 [41] необхідна кількість ГПС-600 для гасіння нафтопродуктів для РВС-5000 становить 5 шт.

Орієнтовний час подавання піни при гасінні бензину взято з табл. 3.3. [41]

Таблиця 3.3

Орієнтовний час подавання піни для гасіння нафтопродуктів в резервуарах

Вид та засоби подавання піни	Розрахунковий час (хв.) гасіння:		
	бензин, гас	дизпаливо	мазут
Піна середньої кратності (ГПС-600, ГПС-2000)	50	30	25
Піна низької кратності (ПЛС, СПП)	60	50	35

В табл. 3.4 зазначено необхідну кількість ГПС-600 для поверхневого гасіння пожежі [38].

Необхідне число ГПС для поверхневого гасіння пожежі

Площа пожежі, м ²	Необхідне число пінних генераторів для поверхневого гасіння пожеж					
	ГПС-200		ГПС-600		ГПС-2000	
	При подачі розчину, л/(м ³ ·с)					
	0,05	0,08	0,05	0,08	0,05	0,08
1	2	3	4	5	6	7
до 25	1	1	1	1	-	-
40	1	2	1	1	-	-
75	2	3	1	1	-	-
100	3	4	1	2	-	-
120	3	5	1	2	-	-
150	4	6	2	2	-	-
180	5	8	2	3	-	-
200	5	8	2	3	1	1
250	7	10	3	4	1	1
300	8	-	3	4	1	2
350	9	-	3	5	1	2
400	10	-	4	6	1	2
450	-	-	4	6	2	2
500	-	-	5	7	2	2
600	-	-	5	8	2	3
700	-	-	6	10	2	3
800	-	-	7	11	2	4
900	-	-	8	12	3	4
1000	-	-	9	14	3	4
1100	-	-	10	15	3	5
1200	-	-	10	16	3	5
1300	-	-	11	18	4	6
1400	-	-	12	19	4	6
1500	-	-	13	20	4	6
1600	-	-	14	-	4	7
1700	-	-	15	-	5	7
1800	-	-	15	-	5	8
1900	-	-	16	-	5	8
2000	-	-	17	-	5	8

Згідно з табл. 3.4 для гасіння пожежі площею 346 м² при інтенсивності подавання піни 0,08 л/м³·с необхідно забезпечити роботу 5 ГПС-600, що збігається з даними табл. 3.2.

В табл. 3.5 [38] зазначено необхідну кількість стволів типу СПП для гасіння за встановленою площею пожежі.

Необхідне число повітряно-пінних стволів для поверхневого гасіння пожежі

Площа пожежі, м ²	Необхідне число пінних генераторів для поверхневого гасіння пожеж								
	СПП			СПП-4 (СППЄ - 4)			СПП-8 (СППЄ-8)		
	При подачі розчину, л/(м ³ ·с)								
	0,1	0,12	0,15	0,1	0,12	0,15	0,1	0,12	0,15
до 25	1	1	1	1	1	1	1	1	1
40	1	1	1	1	1	1	1	1	1
50	1	1	2	1	1	1	1	1	1
60	1	2	2	1	1	2	1	1	1
80	2	2	2	1	2	2	1	1	1
90	2	2	3	2	2	2	1	1	1
100	2	2	3	2	2	2	1	1	1
120	2	3	3	2	2	3	1	1	2
160	3	4	4	2	3	3	1	2	2
180	3	4	4	3	3	4	2	2	2
200	4	4	5	3	4	4	2	2	2
220	4	5	6	3	4	5	2	2	2
240	4	5	6	3	4	5	2	2	3
260	5	6	7	4	4	5	2	2	3
280	5	6	7	4	5	6	2	3	3
300	5	6	8	4	5	6	2	3	3
320	6	7	8	4	5	6	2	3	3
350	6	7	9	5	6	7	3	3	4
400	7	8	10	5	7	8	3	3	4
450	8	9	12	6	7	9	3	4	5
500	9	10	13	7	8	10	4	4	5

Згідно табл. 3.5 необхідна кількість стволів типу СПП становить:

- СПП – 6 шт;
- СПП-4 – 5 шт;
- СПП-8 – 3 шт;

Також, згідно [38, 41] при розрахунку сил та засобів для гасіння пожеж необхідно враховувати запас вогнегасних засобів від розрахункової кількості вогнегасних речовин на гасіння. У табл. 3.6 зазначено запас вогнегасних засобів, який враховується при розрахунку сил та засобів для гасіння пожежі.

Запас вогнегасних засобів, який враховується при розрахунку сил та засобів для гасіння пожежі

Вид пожежі, вогнегасна речовина	Коефіцієнт запасу K_3 від розрахункової кількості ВР на гасіння	Розрахунковий час запасу T_3 , год T
Більність пожеж:		
вода на період гасіння	5	-
вода на період догашування (розбирання конструкцій, проливання місця горіння та ін.)	-	3
Пожежі для об'ємного гасіння яких застосовують:		
Діоксид вуглецю, інші газові вогнегасні речовини	1,3	-
Пожежі на судах (піноутворювач для гасіння в МКВ, трюмах і надбудовах)	3	-
Пожежі нафти і нафтопродуктів в резервуарах:		
піноутворювач	3	-
вода для гасіння піною	5	-
вода на охолодження наземних резервуарів:		
пересувними засобами	-	6
стаціонарними засобами	-	3
вода на охолодження підземних резервуарів	-	3
Пожежі на технологічних установках переробки нафти і нафтопродуктів (піноутворювач)	3	-
Пожежі в підвалах і інших заглиблених приміщеннях при об'ємному гасінні пінами середньої та високої кратності (піноутворювач)	2...3	-

Згідно даних із табл. 3.6 для гасіння пожеж нафти і нафтопродуктів в резервуарах необхідно забезпечити трикратний запас піноутворювача.

Загальну витрату по піноутворювачу вираховуємо за формулою:

$$W_{\text{заг}}^{\text{ПУ}} = N_{\text{пр}}^{\text{г}} \times q_{\text{пр}} \times 60 \times \tau_{\text{р}} \times K_3, \quad (3.12)$$

де $W_{\text{заг}}^{\text{ПУ}}$ – загальна витрата піноутворювача, л; $N_{\text{пр}}^{\text{г}}$ – необхідна кількість технічних приладів подавання вогнегасної речовини (СПП, ГПС); $q_{\text{пр}}$ – подавання (витрата) вогнегасної речовини, що визначається із технічного приладу подавання, л/с; $\tau_{\text{р}}$ – розрахунковий час гасіння пожежі, хв; K_3 –

коефіцієнт запасу вогнегасної речовини.

Відповідно до формули (3.12) та згідно даних з табл. 3.2, 3.3, 3.4 та 3.6 загальна витрата піноутворювача для ГПС-600 становить:

$$W_{\text{заг}}^{\text{ПУ}} = 5 \times 0,36 \times 60 \times 50 \times 3 = 16200 \text{ л}$$

Загальні витрати піноутворювача для стволів СПП, СПП-4 та СПП-8 визначаємо за тією ж формулою. Дані по кількості необхідних СПП взято з табл. 3.5. Для СПП витрати ПУ становлять 15552 л; для СПП-4 – 25920 л; для СПП-8 – 31104 л.

Для підшарового гасіння за допомогою КП, при використанні піни К5 та К10 при тиску 4 МПа значення витрат піноутворювача взято з табл. 3.1. Для піни К10 витрата піноутворювача на гасіння становить 1389 кг, а для піни К5 4319 кг. З урахуванням трикратного запасу загальні витрати становлять 4167 кг та 12957 кг відповідно.

Згідно отриманих даних прораховано вартість гасіння пожежі в РВС-5000 при використанні різних технічних приладів подавання піни. Вартість ПУ «Барс S-2» становить 40 грн/кг (станом на 01 червня 2025 р).

Таблиця 3.7

Результати проведених розрахунків

Технічний прилад	ГПС-600	СПП	СПП-4	СПП-8	КП К10	КП К5
Витрата, л	16200	15552	25920	31104	4167	12957
Вартість, грн	648000	622080	1036800	1244160	166680	518280

Згідно отриманих даних можна зробити висновок: гасіння пожежі в РВС-5000 компресійною піною К10 підшаровим способом майже в 4 рази дешевше, ніж традиційними засобами.

РОЗДІЛ 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОВУВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ПРИ ГАСІННІ ПОЖЕЖ НАФТОПРОДУКТІВ У СТАЛЕВИХ ВЕРТИКАЛЬНИХ РЕЗЕРВУАРАХ ПІДШАРОВИМ СПОСОБОМ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ

Підшаровий спосіб гасіння пожеж нафтопродуктів у резервуарах є спеціалізованою технологією, яка застосовується для ефективної ліквідації пожеж ЛЗР, таких як бензин чи дизельне пальне у вертикальних сталевих резервуарах. Цей спосіб базується на принципі подавання піни низької кратності безпосередньо в нижню частину резервуара, під шар палаючої рідини. Завдяки меншій густині піни порівняно з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне), вона спливає крізь рідину досягаючи поверхні, де утворює стійкий пінний шар. Цей шар ізолює дзеркало горіння не даючи горючим парам потрапити в зону горіння, тим самим перериває процес горіння, а також частково охолоджує поверхню нафтопродукту (бензин, дизельне пальне) знижуючи температуру до рівня нижчого за температуру спалаху. Такий підхід дозволяє гасити пожежу без прямого контакту з відкритим полум'ям, що значно знижує ризики для пожежних та забезпечує швидке припинення горіння. Для реалізації підшарового гасіння резервуари повинні бути обладнані відповідною інфраструктурою, яка забезпечує надійне подавання піни та її рівномірний розподіл. Основним елементом є система пінопроводів, яка складається з трубопроводів, виготовлених із корозійно стійких матеріалів, щоб витримувати агресивне середовище нафтопродуктів (бензин, дизельне пальне) і піноутворювачів. Ці пінопроводи прокладаються до нижньої частини резервуара, щоб піна надходила безпосередньо під шар нафтопродукту (бензин, дизельне пальне). На кінці пінопроводів встановлюються спеціальні розподільні пристрої або пінні насадки, які забезпечують рівномірне введення піни та запобігають її змішуванню з рідиною на етапі подавання.

Традиційний спосіб підшарового гасіння із застосуванням повітряно-

механічної піни є ефективними, але має певні обмеження, зокрема високе споживання ресурсів та вплив на екологічну безпеку. Компресійна піна, завдяки низькому споживанню води та піноутворювача, високій стійкості та ефективній ізоляції поверхні горіння, є перспективною альтернативою для підшарового гасіння. На основі експериментальних даних з гасіння пожеж в макетних резервуарах, а також досліджень вогнегасних властивостей компресійної піни розроблено рекомендації щодо її застосування під час гасіння пожеж в резервуарах з ЛЗР підшаровим способом.

Вогнегасна ефективність компресійної піни для підшарового гасіння визначається її кратністю, властивостями та вмістом піноутворювача. Рекомендована кратність компресійної піни – 10, при використанні 6% робочого розчину піноутворювача. Кратність піни суттєво впливає на ефективність підшарового гасіння. Результати експериментів і моделювання свідчать, що піна K10 утворює щільніший і стійкіший ізоляційний шар, ефективно ізолюючи поверхню горіння та запобігаючи повторному займанню.

Рекомендації враховують специфіку пожеж на об'єктах нафтової промисловості, де пожежі характеризуються швидким розвитком, високим тепловим навантаженням, утворенням токсичних продуктів згорання та ризиком вибухонебезпечних сумішей. Оптимальна компресійна піна з кратністю 10 і концентрацією піноутворювача 6% забезпечує вищу вогнегасну ефективність завдяки щільнішій структурі бульбашок, кращій стійкості до термічної деструкції та ефективній ізоляції поверхні горіння, запобігаючи дифузії горючих парів у зону горіння. Інтенсивність подавання розчину (вода + піноутворювач) рекомендується на рівні 0,08–0,09 л/с·м² для резервуарів об'ємом до 5000 м³, з масштабуванням для більших об'ємів з урахуванням коефіцієнта теплового розширення ЛЗР та необхідності компенсації об'ємного збільшення рідини (до 13% резервного об'єму для тривалого горіння понад 30 хвилин).

Підшаровий спосіб гасіння пожеж компресійною піною є інноваційною технологією, призначеною для ефективної ліквідації пожеж легкозаймистих

рідин (ЛЗР) у вертикальних сталевих резервуарах (РВС). Цей спосіб базується на гідродинамічному принципі подаванні піни низької кратності безпосередньо в нижню зону резервуара, під шар палаючої рідини, через спеціалізовану систему пінопроводів з корозійно-стійких матеріалів. Завдяки меншій густині піни порівняно з ЛЗР відбувається підйом піни крізь шар рідини, з кінетикою спливання, що залежить від в'язкості середовища та розміру бульбашок. На поверхні піна утворює стійкий ізоляційний шар товщиною, який блокує дифузію горючих парів до зони горіння, перериває ланцюгову реакцію окислення та забезпечує конвективне й випарне охолодження поверхні ЛЗР, знижуючи температуру до рівня нижче температури спалаху.

Експериментальні дані з моделювання в SolidWorks Flow Simulations підтверджують, що ефективність залежить від кратності піни, яка визначає структурну щільність і стійкість: для K10 піна утворює щільніший шар з меншим гідравлічним опором у трубопроводах порівняно з повітряно-механічною піною, забезпечуючи рівномірний розподіл і запобігаючи повторному займанню. Порівняно з традиційним способом гасіння повітряно-механічною піною, компресійна піна демонструє вищу вогнегасну ефективність з меншим споживанням ресурсів: скорочення витрат води в 2-5 разів за рахунок нижчого вмісту рідкої фази, піноутворювача в 6-10 разів завдяки оптимальній концентрації поверхнево-активних речовин. Екологічні переваги включають використання біологічно розкладних піноутворювачів без фторвмісних сполук, що зменшує забруднення ґрунтових вод.

Обмеження методу: необхідність стаціонарної інфраструктури, ризик фазових перетворень піни, що призводить до утворення пари та зниження охолоджувального ефекту. Для резервуарів об'ємом понад 5000 м³ рекомендується збільшити інтенсивність подавання на 20-30%. Безпека забезпечується моніторингом теплового випромінювання і токсичних випарів, з використанням дронів для візуальної розвідки та термографії..

Дії Керівника гасіння пожежі.

Керівник гасіння пожежі є ключовою фігурою в оперативному управлінні, відповідальною за інтеграцію тактичних рішень, оцінку ризиків і координацію ресурсів у реальному часі. Його дії базуються на принципах пожежної тактики, з урахуванням динаміки розвитку пожежі і потенційних вторинних загроз, зокрема детонація вибухових предметів у воєнних умовах.

КГП зобов'язаний:

- встановити периметр безпеки на відстані 50-150 м від зони обвалування, залежно від об'єму резервуара для мінімізації ризиків від теплового випромінювання чи фрагментарних уражень;

- огородити зону стрічками або бар'єрами, евакуювати цивільний персонал і призначити пости спостереження для моніторингу напрямку вітру з метою уникнення поширення токсичних парів та вторинних загроз, таких як поширення полум'я на суміжні резервуари;

- провести візуальну та інструментальну розвідку: використовувати безпілотні літальні апарати для оцінки об'єму резервуара, типу ЛЗР, тривалості горіння, наявності пошкоджень (зірваний дах, витік, деформація стінок через термічне розширення). Визначити запас піноутворювача, доступність водоймищ та гідрантів, перевірити цілісність стаціонарної системи підшарового гасіння. Якщо система пошкоджена - перейти до альтернативного плану, наприклад, поверхневого гасіння;

- організувати постійний моніторинг безпекової ситуації, включаючи газоаналіз для виявлення вибухонебезпечних концентрацій і термометрію;

- встановити радіозв'язок з представниками Збройних Сил України, територіальної оборони або правоохоронних органів для реального часу оцінки повітряної небезпеки чи ризику детонації вибухових предметів;

- у разі надходження інформації про повітряну загрозу або розпорядження старшої посадової особи підрозділу ДСНС - подати сигнал оповіщення для термінового відведення особового складу та техніки до заздалегідь визначених пунктів збору й укриття;

- постійно контролювати аспекти, пов'язані з ризиком повторних обстрілів

та небезпекою детонації, вживаючи заходів для відведення й укриття при погіршенні обстановки, з доповіддю до Оперативно-координаційного центру;

- провести розрахунок необхідної кількості вогнегасних речовин - води, піноутворювача - відповідно до площі дзеркала горіння, з урахуванням інтенсивності і тривалості подавання;

- організувати охолодження горючого резервуара та суміжних за допомогою водяних стволів, кількість яких визначається таблицею 3.2;

- довести до особового складу детальний план пінної атаки: чіткі завдання, послідовність дій кожного пожежного розрахунку, обов'язкові заходи безпеки, сигнали початку та завершення подавання піни, сигнал негайного відходу з небезпечної зони та місце укриття при викиді нафтопродукту, а також порядок дій при повторному обстрілі чи повітряній тривозі;

- після гасіння - провести моніторинг на предмет повторного займання, з використанням пожежних тепловізорів для виявлення гарячих точок. Організувати очищення території від залишків піни та ЛЗР, звітувати про витрати ресурсів і ефективність оперативних дій до ДСНС.

Система компресійної піни (CAFS, Compressed Air Foam System) інтегрує генерування піни безпосередньо в пожежній автоцистерні, забезпечуючи низький гідравлічний опір і високу дальність подавання.

Порядок дій при підшаровому гасінні за допомогою пожежної автоцистерни, обладнаною системою подавання компресійної піни (CAFS):

- встановити АЦ на стабільному вододжерелі для забезпечення безперервного подавання води з витратою;

- провести розрахунок витрат ресурсів та підготувати запас вогнегасних речовин (табл. 4.1 і 4.2);

- під'єднати магістральну лінію до стаціонарної системи підшарового гасіння за межами зони обвалування, забезпечуючи герметичність з'єднань для уникнення втрат тиску;

- активувати CAFS: змішати воду, піноутворювач і стиснене повітря від компресора для генерування піни K5 або K10, з контролем тиску для

оптимального змішування в камері;

- забезпечити охолодження резервуарів водяними стволами (табл. 3.2);
- при охолодженні резервуара слідкувати, щоб вода не потрапляла в резервуар і не руйнувала піну;
- розпочати подавання піни під шар ЛЗР через пінопроводи, з моніторингом швидкості спливання за допомогою безпілотних літальних апаратів;
- подавання піни з інтенсивністю 0,08-0,09 л/с·м² робочого розчину, до повного гасіння, з урахуванням динаміки руху затоплених струменів;
- моніторити рівномірний розподіл піни і вихід на поверхню, коригуючи тиск для запобігання кипінню і фазовим перетворенням;
- при сигналі повітряної тривоги відвести особовий склад, зберігаючи тиск у системі для швидкого відновлення;
- зупинити подавання компресійної піни після досягнення температури на борті резервуара нижче температури спалаху нафтопродукту. Температуру спалаху контролювати за допомогою пірометра;
- після припинення горіння здійснювати подавання піни не менше 5 хв для зменшення температури бортів і дзеркала горіння;
- після припинення подавання компресійної піни організувати спостереження за температурою бортів резервуара та руйнуванням шару піни.

У разі відсутності CAFS використовується окрема мобільна установка для генерації компресійної піни, що вимагає додаткової координації для забезпечення стабільного тиску і потоку.

Порядок дій при підшаровому гасінні за допомогою пожежної автоцистерни, не обладнаною системою подавання компресійної піни (CAFS):

- встановити АЦ на вододжерело, розрахувати витрати ресурсів (див. таблиці нижче);
- провести розрахунок витрат ресурсів та підготувати запас вогнегасних речовин (табл. 4.1 і 4.2);

- встановити генератор компресійної піни на безпечній відстані перед зоною обвалування, під'єднати магістральну лінію від АЦ до генератора компресійної піни;

- забезпечити охолодження резервуарів водяними стволами (табл. 3.2);

- при охолодженні резервуара слідкувати, щоб вода не потрапляла в резервуар і не руйнувала піну;

- під'єднати до генератора компресійної піни компресор, який може забезпечити подавання повітря під тиском з продуктивністю 150-200 л/с;

- змішати робочий розчин: вода + 6% піноутворювача, додати повітря для досягнення бажаної кратності;

- розпочати подавання компресійної піни через стаціонарну систему підшарового гасіння з інтенсивністю 0,08-0,09 л/с·м² робочого розчину, до повного гасіння, з урахуванням динаміки руху затоплених струменів;

- моніторити тиск і потік, за потреби коригувати для оптимальної ефективності;

- моніторити рівномірний розподіл піни і вихід на поверхню, коригуючи тиск для запобігання кипінню і фазовим перетворенням;

- при сигналі повітряної тривоги відвести особовий склад, зберігаючи тиск у системі для швидкого відновлення;

- зупинити подавання компресійної піни після досягнення температури на борті резервуара нижче температури спалаху нафтопродукту. Температуру спалаху контролювати за допомогою пірометра;

- після припинення горіння здійснювати подавання піни не менше 5 хв для зменшення температури бортів і дзеркала горіння;

- після припинення подавання компресійної піни організувати спостереження за температурою бортів резервуара та руйнуванням шару піни.

Схема розгортання при проведенні підшарового гасіння за допомогою пожежного автомобіля, не обладнаного системою компресійної піни зображено на рис. 4.1.

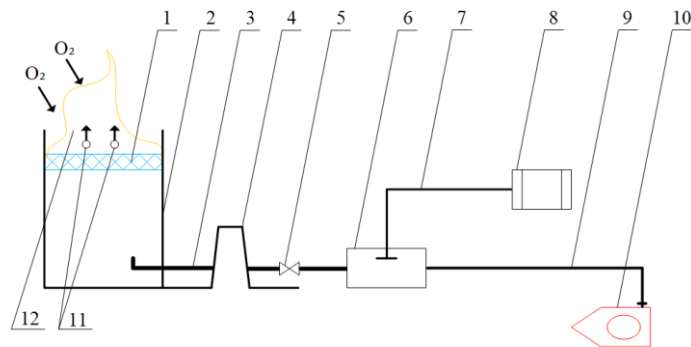


Рис. 4.1. Схема розгортання при проведенні підшарового гасіння за допомогою пожежного автомобіля, не обладнаного системою компресійної піни. 1) компресійна піна; 2) резервуара; 3) трубопровідна система; 4) зона обвалування; 5) засувка; 6) генератор компресійної піни; 7) гнучкі трубопроводи для подавання повітря; 8) джерело повітря (компресор); 9) рукавна лінія; 10) пожежна автоцистерна; 11) горючі пари; 12) зона горіння.

При моделюванні час гасіння не перевищував 25 хв (1500 с). Тому розрахунки витрат вогнегасних речовин проведено для тривалості гасіння 25 хвилин (1500 секунд). Кількість повітря визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{пов}} = Q_{\text{рр}} \times (K - 1) \text{ л/с}, \quad (4.1)$$

де, $Q_{\text{пов}}$ - кількість повітря, л/с;

$Q_{\text{рр}}$ - кількість робочого розчину, л/с;

Площі дзеркала горіння базуються на стандартних геометричних параметрах (табл. 4.1).

Необхідну кількість робочого розчину визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{рр}} = S \times I, \quad (4.2)$$

де, S – площа дзеркала горіння, м^2 ;

I – інтенсивність, $\text{л/с} \cdot \text{м}^2$ ($0,08 \text{ л/с} \cdot \text{м}^2$).

Необхідну кількість піноутворювача (для 6% робочого розчину) визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{пу}} = Q_{\text{рр}} \times 0,06, \quad (4.3)$$

де, $Q_{\text{пу}}$ – кількість піноутворювача, л/с.

Необхідну кількість води (для 6% робочого розчину) визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{води}} = Q_{\text{рр}} \times 0,94, \quad (4.4)$$

де, $Q_{\text{води}}$ – кількість води, л/с.

Загальний об'єм витрат води визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{води (заг)}} = Q_{\text{води}} \times 1500, \quad (4.5)$$

де, $Q_{\text{води (заг)}}$ – загальний об'єм використаної води, л.

Загальний об'єм витрат піноутворювача визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{пу (заг)}} = Q_{\text{пу}} \times 1500, \quad (4.6)$$

де, $Q_{\text{пу (заг)}}$ – загальний об'єм використаного піноутворювача, л.

Загальний об'єм витрат повітря визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{пов (заг)}} = Q_{\text{пов}} \times 1500, \quad (4.7)$$

де, $Q_{\text{пов (заг)}}$ – загальний об'єм використаного повітря, л;

Витрати вогнегасних речовин при підшаровому гасінні за допомогою
компресійної піни кратністю 5

об'єм резервуара (м ³)	площа дзеркала горіння (м ²)	к-сть повітря Q _{пов} (л/с)	к-сть РР Q _{рр} (л/с)	к-сть ПУ Q _{пу} (л/с)	к-сть води Q _{води} (л/с)	загальна к-сть повітря (л)	загальна к-сть ПУ (л)	загальна к-сть води (л)	об'єм піни (м ³)
2000	181	57,92	14,48	0,86	13,62	86880	1290	20430	108,6
3000	261	83,52	20,88	1,25	19,63	125280	1875	29445	156,6
5000	346	110,72	27,68	1,66	26,02	166080	2490	39030	207,6
10000	637	203,84	50,96	3,05	47,91	305760	4575	71865	382,2
20000	917	293,44	73,36	4,4	68,96	440160	6600	103440	550,2
30000	1632	522,24	130,56	7,83	122,73	783360	11745	184095	979,2
50000	2902	928,64	232,16	13,9	218,26	1292960	20850	327390	1641,2

Таблиця 4.2

Витрати вогнегасних речовин при підшаровому гасінні за допомогою
компресійної піни кратністю 10

об'єм резервуара (м ³)	площа дзеркала горіння (м ²)	к-сть повітря Q _{пов} (л/с)	к-сть РР Q _{рр} (л/с)	к-сть ПУ Q _{пу} (л/с)	к-сть води Q _{води} (л/с)	Загальна к-сть повітря (л)	Загальна к-сть ПУ (л)	Загальна к-сть води (л)	об'єм піни (м ³)
2000	181	127,62	14,48	0,86	13,62	191430	1290	20430	213,15
3000	261	187,92	20,88	1,25	19,63	281880	1875	29445	313,2
5000	346	249,12	27,68	1,66	26,02	373680	2490	39030	415,2
10000	637	458,64	50,96	3,05	47,91	687960	4575	71865	764,4
20000	917	660,24	73,36	4,4	68,96	990360	6600	103440	1100,4
30000	1632	1175,04	130,56	7,83	122,73	1762450	11745	184095	1958,25
50000	2902	2089,44	232,16	13,9	218,26	3134160	20850	327390	3482,4

Ці рекомендації створюють практичну основу для впровадження інноваційної технології, сприяючи вдосконаленню практики пожежної безпеки в Україні.

ВИСНОВКИ

1. Вивчено інформацію, що стосується досліджуваної проблематики.
2. Розроблено схеми подавання компресійної піни підшаровим способом у резервуар з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне) із застосуванням переносного і стаціонарного пінозмішувачів. Також передбачено використання пожежних автомобілів, оснащених системою CAFS.
3. Розроблена лабораторна установка для генерування КП та проведено «підшарове» гасіння бензину в макетному резервуарі. КП показала хороші показники кратності та добре розтікалась по поверхні дзеркала горіння. Піна повністю покрила поверхню бензину, тривалий час трималась на поверхні та не руйнувалась, таким чином не давши горючим парам потрапити в зону горіння. За результатами математичного моделювання встановлено, що розбіжність між даними експерименту в полігонних умовах на макетному резервуарі та математичною моделлю становить приблизно 4%, що свідчить про адекватність отриманих результатів.
4. Модель, яка створена в програмному середовищі SolidWorks Flow Simulations адекватно описує рух пінних струменів в резервуарі із рідким горючим паливом. Ефективність «підшарового» способу гасіння пожежі в резервуарі залежить від температури прогрітого бензину, чим швидше розпочнеться подавання піни, тим вищою буде ефективність гасіння.
5. Встановлено, що для «підшарового» гасіння пожежі застосування компресійної піни з кратністю 10 є значно ефективніше ніж при застосуванні піни кратністю 5. Чим вища продуктивність подавання і кратність піни, тим вищою буде ефективність гасіння: для K10 час подавання піни в 1.55 рази менший, а кількість використаного піноутворювача у 3.1 рази менше ніж K5. Резервуар з нафтопродуктом не можна заповнювати повністю. Визначено, що необхідний резервний об'єм резервуара, який у випадку тривалості горіння більше 30 хв має становити не менше 13% об'єму резервуару. При умові подавання піни кратністю 10 продуктивність подавання піни становить 56 кг/с.
6. На основі отриманих даних встановлено, що гасіння пожежі в PBC-5000

із використанням компресійної піни K10 підшаровим способом є майже вчетверо економнішим порівняно з традиційним способом гасіння (166 680 грн проти 648 000 грн).

7. Запропоновано рекомендації щодо використання компресійної піни для ефективного гасіння пожеж легкозаймистих рідин (ЛЗР) у вертикальних сталевих резервуарах. Для резервуарів об'ємом до 5000 м³ рекомендується застосовувати компресійну піну з кратністю 10 і концентрацією піноутворювача 6% для підшарового гасіння з інтенсивністю не менше 0,08-0,09 л/с×м².

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Amuay tragedy. English Wikipedia. [Електронний ресурс]. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Amuay_tragedy (дата звернення: 23.10.2024);
2. Внаслідок вибуху нафтопроводу в Мексиці загинули десятки людей. BBC News Україна. [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/news-46933867> (дата звернення: 23.10.2024);
3. A huge fire at a Texas chemical plant is out, 4 days after it started. CNN. [Електронний ресурс]. – URL: <https://edition.cnn.com/2019/03/20/us/deer-park-itc-plant-fire-wednesday/index.html> (дата звернення: 23.10.2024);
4. На Кубі вирує масштабна пожежа на нафтобазі. Постраждали понад 100 осіб. Главком. [Електронний ресурс]. – URL: <https://glavcom.ua/world/observe/na-kubi-viruje-masshtabna-pozhezha-na-naftobazi-postrazhdali-ponad-100-osib-866194.html> (дата звернення: 24.10.2024);
5. Пожежа на нафтобазі у Василькові. Wikipedia. [Електронний ресурс]. – URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%B6%D0%B0_%D0%BD%D0%B0_%D0%BD%D0%B0%D1%84%D1%82%D0%BE%D0%B1%D0%B0%D0%B7%D1%96_%D1%83_%D0%92%D0%B0%D1%81%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D1%96 (дата звернення: 24.10.2024);
6. Пожежа на нафтобазі у Васильківському районі. Wikipedia. [Електронний ресурс]. – URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%B6%D0%B0_%D0%BD%D0%B0_%D0%BD%D0%B0%D1%84%D1%82%D0%BE%D0%B1%D0%B0%D0%B7%D1%96_%D1%83_%D0%92%D0%B0%D1%81%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BA%D1%96%D0%B2%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D1%83_%D1%80%D0%B0%D0%B9%D0%BE%D0%BD%D1%96 (дата звернення: 25.10.2024);
7. Нафтобазу в Харкові гасять майже добу після удару РФ "шахедами" 9 лютого. Суспільне Харків. [Електронний ресурс]. – URL: <https://susplne.media/kharkiv/681554-naftobazu-v-harkovi-gasat-majze-dobu-pisla-udaru-rf-sahedami-9-lutogo/> (дата звернення: 25.10.2024);

8. Горіла майже тиждень. У мережі показали фото знищеної нафтобази у Феодосії. РБК – Україна. [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.rbc.ua/rus/news/gorila-mayzhe-tizhden-merezhi-pokazali-foto-1728907362.html> (дата звернення: 07.11.2024);

9. Casal J. Evaluation of the Effect and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants / Joaquim Casal. – Industrial Safety Series. – V. 8. – Elsevier, 2008. – 117 p.;

10. Person H. Tank fire review of fire incidents 1951-2003 / H. Persson A. Lonnermark // Brandforsk Project 513-021. – Boras: Swedish National Testing and Research Institute. – 2004.;

11. Бабенко Ю. В., Савельєв І. В., Боровиков В. О. та ін. Протипожежний захист складів нафти і нафтопродуктів. К.: УкрНДІПБ, 2002. 142 с.;

12. Степаненко С. Г., Яник Я. М., Тимошук Ю. Т. Дослідження пожеж: довідково-методичний посіб. Київ: УкрН-ДІПБ МВС України, 1998. 233 с;

13. Isner M. S. Tank farm fire at Denver. Fire Fight. Can. 1991. v. 35, № 9. P. 22;

14. ВБН В.2.2-58.1-94 Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. (1994);

15. Вілінський Р.В. Гаврилюк А.Ф. Аналіз використання компресійної піни. *Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності* : зб. наук. праць XV Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, курсантів та студентів. Львів, 2020. С.16-17;

16. Velykyi, N., Kovalyshyn, V., Voitovych, T., & Pastukhov, P. (2023). ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА КРАТНОСТІ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ. *Пожежна безпека*, 43, 34-40. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.43.2023.05>;

17. Ларін О.М., Баркалов В.Г., Виноградов С.А. та ін. Пожежні машини : навч. посіб. Харків, НУЦЗУ: МПБП «Гордон», 2016. 288 с;

18. Robert G. Taylor (1998) Technical Report 98: Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions / Robert G. Taylor - Morristown Fire Bureau

- Morristown, New Jersey – pp. 75-112;

19. Compressed Air Foam Systems [Електронний Ресурс] / Neal Brooks. – Режим доступу: <http://compressedairfoamsystem.com>;

20. Colletti, D. J. (1994). Compressed air foam mechanics. *Fire Engineering*, 147. March. pp. 61-65;

21. Li Huiqing. (2000). Experimental study of foam generated by compressed air foam system [D]. Beijing: Beijing Forestry University. pp. 105-111;

22. Виноградов С.А., Шахов С.М. Технологія та переваги використання компресійної піни. *Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту* : матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ, 2017. – 482 с.;

23. Kurowski, P. (2016). *Engineering analysis with SOLIDWORKS Simulation 2016*. SDC Publications;

24. Пустюльга С.І., Самостян В.Р., Клак Ю.В. Інженерна графіка в SolidWorks : навч. посіб. Луцьк : Вежа, 2018. 172 с.;

25. Плашихін, С. В. Параметричне моделювання технологічних процесів. Розділ 2. Моделювання фізичних процесів в CAD/CAE системі SolidWorks : навч. посіб. Електрон. мережне навч. вид. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 125 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/52105/1/Parametrychne_modeliuvannia_tekhnolohichnykh_protsesiv_2.pdf

26. Ковалишин, В. В., Васильєва, О. Е., Козяр, Н. М. Пінне гасіння: навч. посіб. Львів: Сполом, 2007. 168 с;

27. Войтович, Т. М., Ковалишин, В. В., Новіцький, Я. М., Войтович, Д. П., Пастухов, П. В., Фірман, В. М. (2020). Вплив параметрів руху затоплених пінних струменів на “підшарове” гасіння пожеж в резервуарах з нафтопродуктами. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 3, 10(105), 6-17. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206032>;

28. Voitovych, T., Kovalyshyn, V., & Chernetskyi, V. (2019). ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ І РОЗРАХУНКУ СИСТЕМИ «ПІДШАРОВОГО»

<https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.34.2019.04>;

29. Антонов А. В., Боровиков В. О., Орел В. П., Жартовський В. М., Ковалишин В. В. Вогнегасні речовини : Навчальний посібник. Київ : Пожінформтехніка, 2004. 176 с.;

30. Боровиков В. (2015). Гасіння пожеж у резервуарах для зберігання нафти та нафтопродуктів. Пожежна та техногенна безпека. 2015. – №11(26). – С. 28-29.;

33. Chen, Y., Chen, T., Hu, C., Fu, X. C., Bao, Z. M., Zhang, X. Z., & Xia, J. J. (2017). The research of press drop of compressed air foam flow through the bend. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 81, 012118. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/81/1/012118>;

34. Chen, Y., Chen, T., Fu, X. C., Bao, Z. M., & Hu, C. (2021). The research of compressibility of compressed air foam. Journal of Physics: Conference Series, 1820(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1820/1/012021>;

35. Su, L., Wang, L., Wang, Z., Zhang, J., Tian, Y., & Yan, Y. (2012). Investigation on compressed air foams fire-extinguishing model for oil pan fire. Procedia Engineering, 45, 663–668. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.219>;

36. Rie, D.-H., Lee, J.-W., & Kim, S. (2016). Class B fire-extinguishing performance evaluation of a compressed air foam system at different air-to-aqueous foam solution mixing ratios. *Applied Sciences*, 6(7), 191. <https://doi.org/10.3390/app6070191>;

37. П.П. Ключ, В.Г. Палюх, А.С. Пустовой, Ю.М. Сенчихін, В.В. Сировой. Пожежна тактика: Підруч. – Х.: Основа, 1998.;

38. Довідник керівника гасіння пожеж / За загальною редакцією В.С. Кропивницького. – К.: ТОВ «Літера-Друк», 2016. – 320 с;

39. Звіт про ДКР «Розроблення технічного засобу пожежогасіння компресійною піною та дослідження його характеристик («піна–засіб»)). Доступ: <https://dsns.gov.ua/upload/1/3/2/5/0/2021-7-9-pina-zasib-rozdil-6.pdf>.

40. Войтович Т.М. Вдосконалення технології «підшарового» пожежогасіння в резервуарах з нафтопродуктами : дис. ... д-ра філос. : 21.06.02. Львів, 2020. 216 с.;

41. Методичні рекомендації щодо організації оперативних дій підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів, що сталися внаслідок обстрілів в умовах ведення бойових дій. Наказ ДСНС України В-269 від 23.05.2022 р.;

42. ДСТУ 7224:2011. (2011). Метрологія. Манометри, мановакуумметри, вакуумметри, напороміри, тягонапороміри, тягоміри з пневматичними вихідними сигналами. Методика повірки (калібрування). Київ: Міністерство економічного розвитку і торгівлі України;

43. ДСТУ OIML R 133:2019. (2019). Термометри рідинні скляні (OIML R 133:2002, IDT). Київ: Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»);

44. ДСТУ ISO 1042:2005. (2005). Посуд лабораторний скляний. Колби мірні з однією позначкою (ISO 1042:1998, IDT). Київ: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики;

ДОДАТКИ

Фізико-механічні параметри компонентів текучого середовища моделі
SolidWorks Flow Simulations

1. Фізико-механічні властивості повітряно-механічної піни

Элементы	Свойства элемента	Таблицы и графики
Свойство		Значение
Имя		Піна 5 газ
Комментарии		
Показатель адиабаты (Cp/Cv)		1.27
Молекулярная масса		4.8 kg/mol
Динамическая вязкость		0.0135 Pa*s
Удельная теплоемкость (Cp)		1640 J/(kg*K)
Коэффициент теплопроводности		0.026 W/(m*K)

Рис. А1. Властивості піни кратністю 5

Элементы	Свойства элемента	Таблицы и графики
Свойство		Значение
Имя		Піна 10 газ
Комментарии		
Показатель адиабаты (Cp/Cv)		1.27
Молекулярная масса		2.4 kg/mol
Динамическая вязкость		0.0135 Pa*s
Удельная теплоемкость (Cp)		1325 J/(kg*K)
Коэффициент теплопроводности		0.026 W/(m*K)

Рис. А2. Властивості піни кратністю 10

2. Фізико-механічні властивості авіаційного бензину Б70

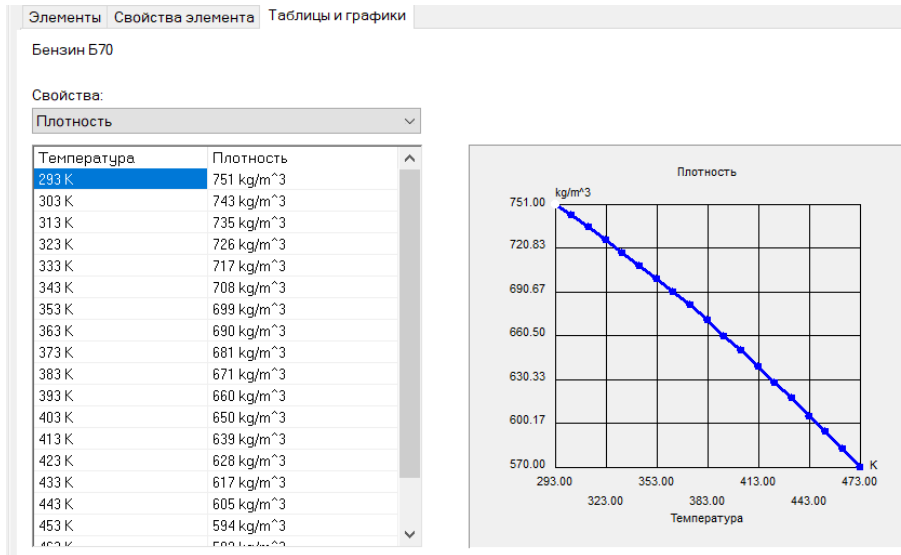


Рис. А.3. Залежність густини бензину від його температури

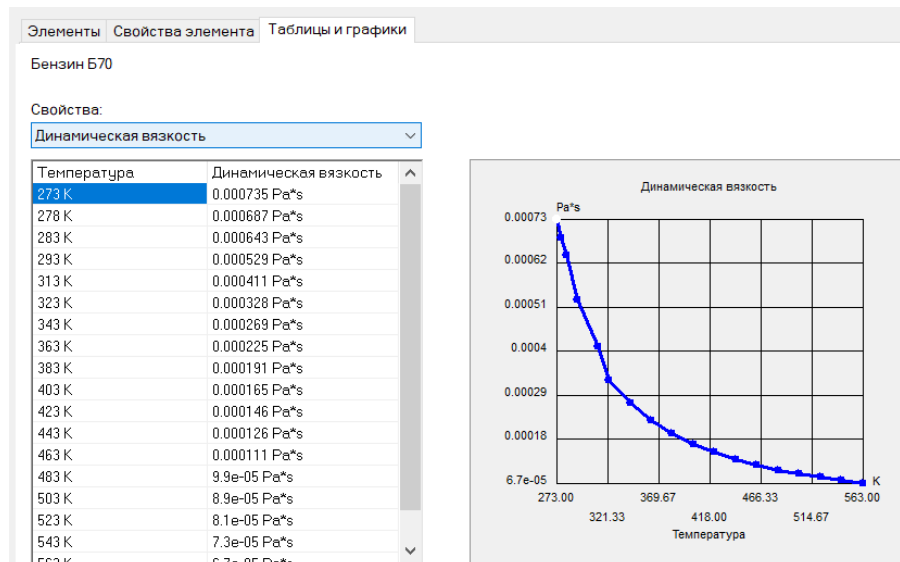


Рис. А.4. Залежність динамічної в'язкості бензину від його температури

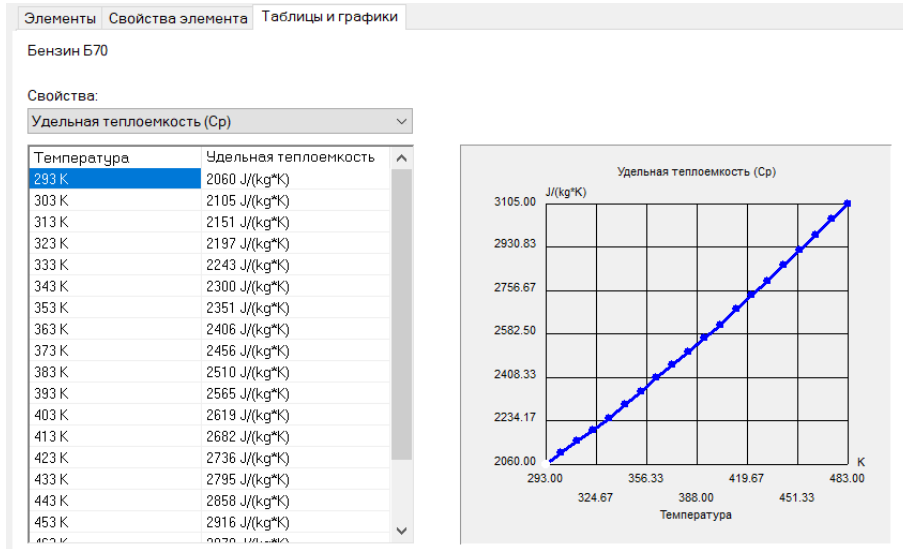


Рис. А.5. Залежність питомої теплоємкості бензину від його температури

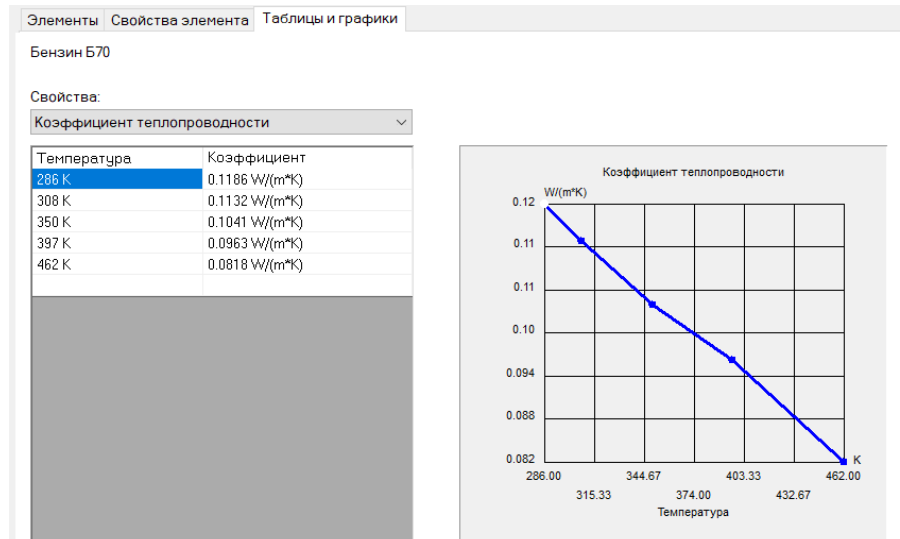


Рис. А.6. Залежність теплопровідності бензину від його температури

1. Хромограми на площині перерізу резервуара масової концентрації пінних струменів, густини та температури прогрітого текучого середовища.

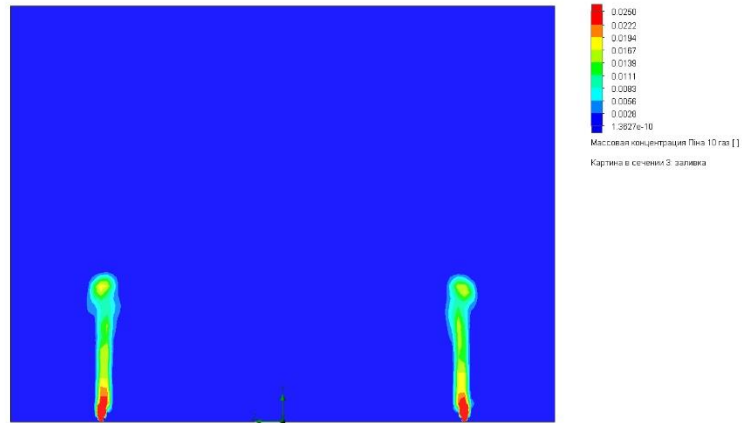


Рис. Б.1.1. Масова концентрація пінних струменів (фільтр >2.5%)



Рис. Б.1.2. Густина прогрітого текучого середовища

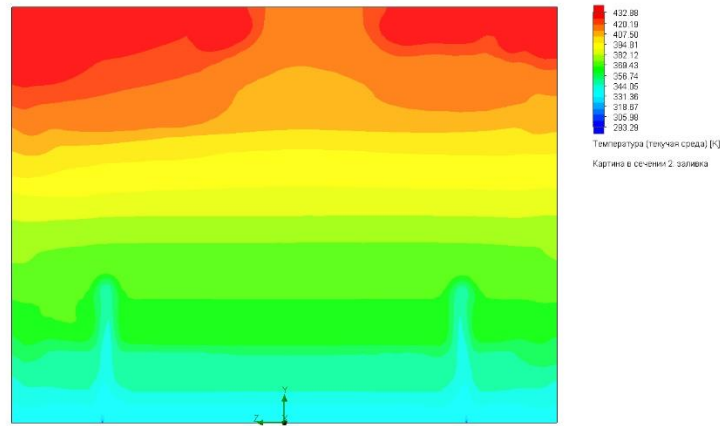


Рис. Б.1.3. Температура прогрітого текучого середовища

Як показує аналіз рисунків Б.1.1 – Б.1.3, в текучому середовищі резервуару, протягом перших 10-ти секунд, спостерігається яскраво виражена структурованість за масовою концентрацією, густиною та температурою.

2. Результати моделювання процесу подавання піни протягом 60 секунд подано в додатку Б.

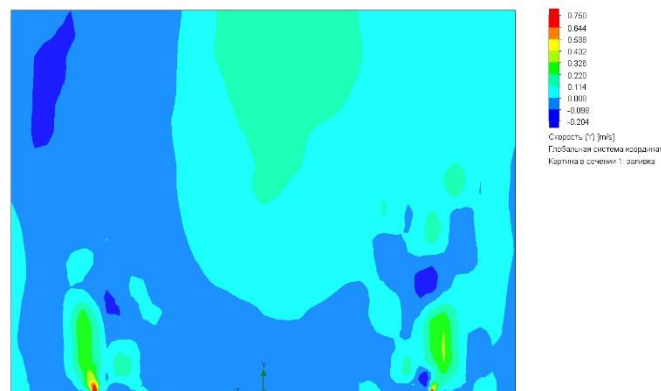


Рис. Б.2.1. Вертикальна швидкість середовища через 60с подачі піни

Як видно із рисунка, текуче середовище після 60 с подавання піни закамутилося, тобто встановлюються процеси глобального перетікання рідини, як наслідок тривалого впливу кінетичної енергії струменів та в'язкості рідини.

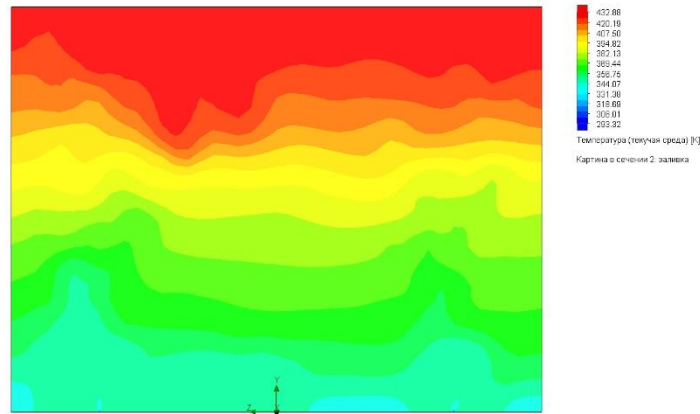


Рис. Б.2.2. Хромограма температури текучого середовища

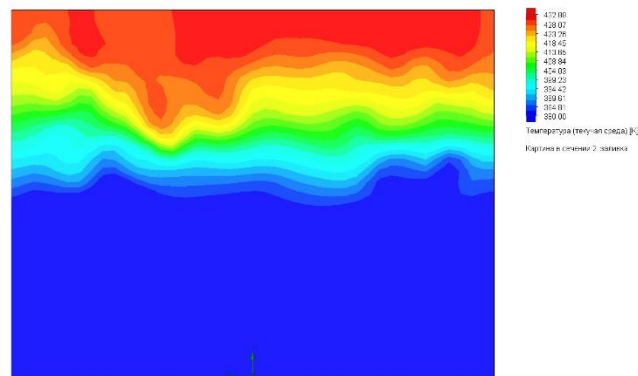


Рис. Б.2.3. Температура середовища через 60 с після подачі палива.

Відфільтровано значення нижче 380 °К

Як видно з рис. Б.2.3 температура вище синього кольору (380 К) це зона кипіння палива під тиском верхніх шарів палива. В цій зоні вода палива перетворюється в пару. Пара піднімається швидше від палива, але охолодження бензину буде відбуватися вдвічі повільніше (теплоємність пари вдвічі менша за теплоємність води). На жаль фазові перетворення води в цій моделі не враховуються, тому рух пари і охолодження паром врахувати неможливо. Єдине, що можливо, це відслідкувати вихід палива або пари на поверхню дзеркала горіння в залежності від мінімального значення температури поверхні дзеркала в даному місці.

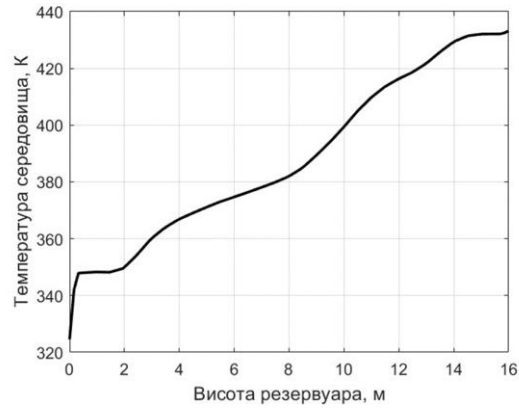


Рис. Б.2.4. Розподілу температури текучого середовища за висотою резервуара



Рис. Б.2.5. Густина середовища через 60 с після подачі піни

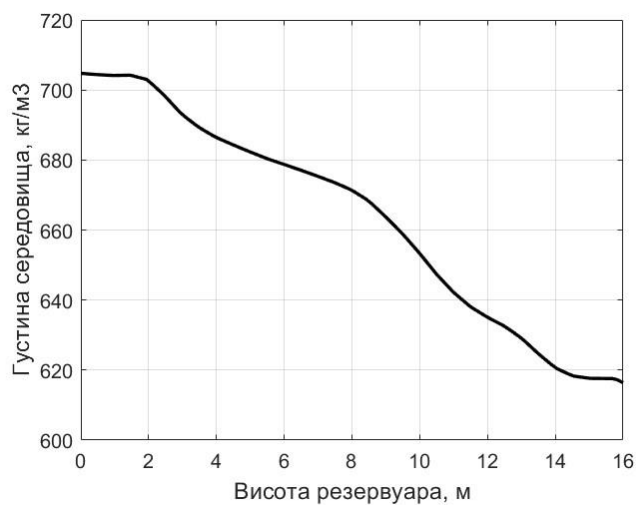


Рис. Б.2.6. Графічна залежність густини середовища від висоти резервуара.

Як видно із порівняння графіків густини після прогріву (рис. 2.5; рис. 2.10) і рис. Б.2.6, температура середовища продовжує підніматися. Густина верхніх шарів зменшилася ще на 20 кг/м^3 .

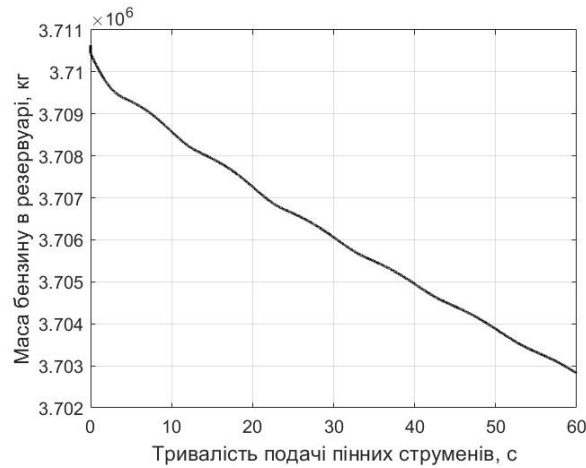


Рис. Б.2.7. Графічна залежність маси бензину в резервуарі від часу подавання піни

Як показує аналіз рисунка, протягом 1 хв подавання піни витіснилось із резервуара 8 тон бензину, а протягом такого ж часу прогріву резервуара без подавання піни (рис. 2.11) витіснилося 15 тон бензину. Отже, витіснення бензину в часі носить нелінійний характер. Можливо це вплив охолодження середовища на його густину.

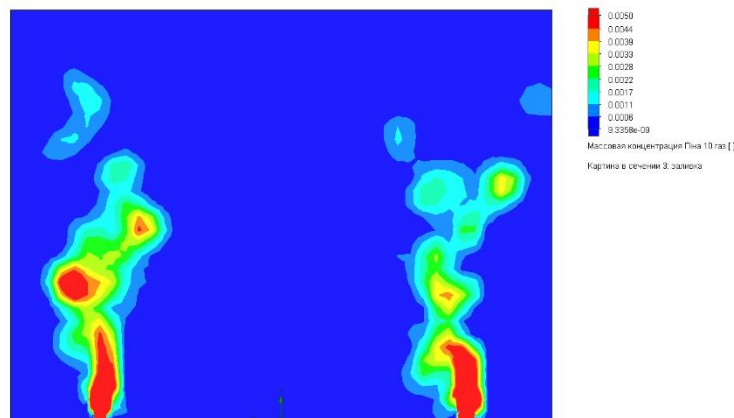


Рис. Б.2.8. Масова концентрація піни через 60 с після її подачі. Відфільтровано

нижче 0,005 (0,5 %)

Як бачимо із рисунка, рух піни сповільнюється внаслідок її пригнічування низькою густиною і, як наслідок, поганою підйомною силою, від хмароподібного масиву піни відриваються окремі частини. Тобто суцільного потоку піни через 60 с вже не спостерігається.

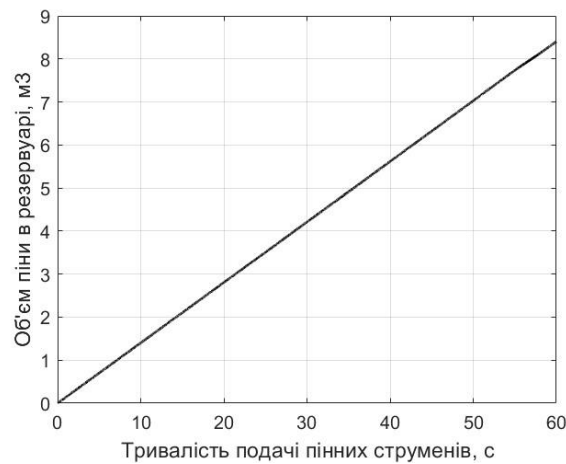


Рис. Б.2.9. Графічна залежність об'єму піни в резервуарі від часу її подачі.

Як видно із рисунка, піна прибуває рівномірно. При подаванні піни продуктивністю $0,14 \text{ м}^3/\text{с}$ протягом 60 с, об'єм піни визначиться як добуток $0,14 \times 60 = 8,4 \text{ м}^3$, що і зображено на графіку. Тобто вся піна, яка подається в резервуар протягом 60 с в ньому і залишається.

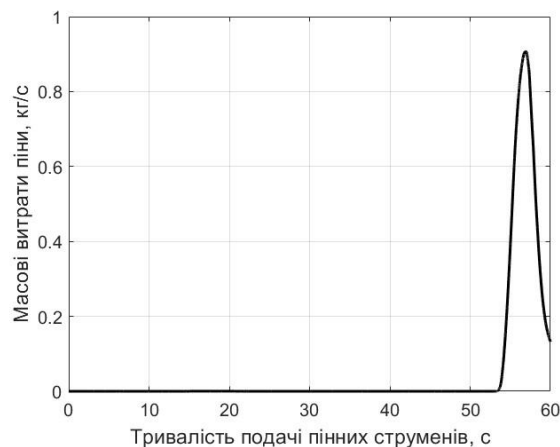


Рис. Б.2.10. Графічна залежність масових витрат піни на виході резервуара від часу її подачі.

Як видно із рисунка, на 54-тій секунді спостерігається вихід піни на дзеркало горіння. Власне, перший проміжок часу протягом якого виконується детальний аналіз і був пов'язаний з тривалістю подавання піни в резервуар до її виходу на дзеркало горіння. Витрати піни на виході резервуара становлять $0,9 \text{ м}^3/\text{с}$ і тривають лише 5 с. Тобто це вихід окремого куска піни, що і зображено на рис. Б.2.8.

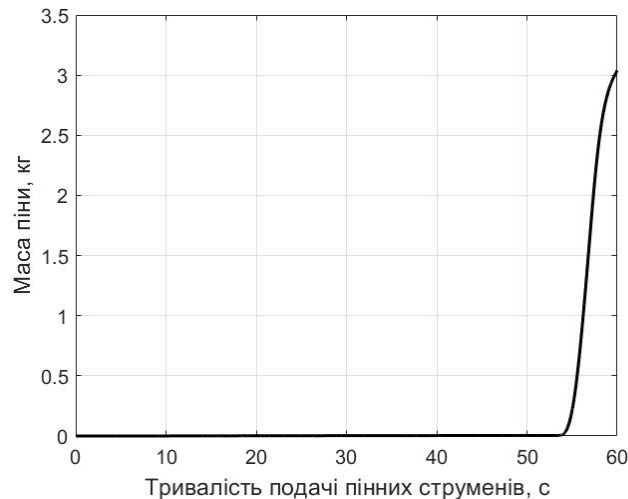


Рис. Б.2.11. Графічна залежність маси піни на виході від часу її подавання.

Рис. Б.2.11. це проінтегрована попередня графічна залежність (рис. Б.2.10). Як видно із графіка, протягом 60-ти секунд подавання піни на поверхню вийшло 3 кг.

На рис. Б.2.12 зображено залежність мінімального значення температури дзеркала горіння від часу подавання піни. Температура на дзеркалі горіння у нас стабільна 433 К. (вона задана в початкових умовах). Для можливості аналізу температури конвективного потоку, який виходить на поверхню дзеркала горіння розміщено додаткову площину під дзеркало горіння на

відстані 5 см і температуру дзеркала горіння виміряно на цій площині. Тобто під самим дзеркалом.

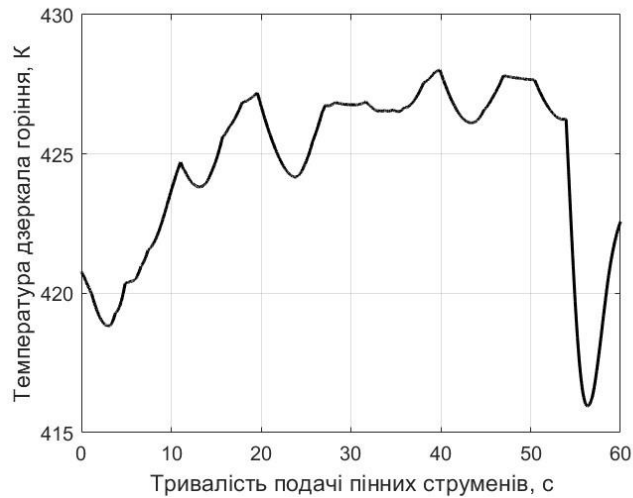


Рис. Б.2.12. Графічна залежність мінімального значення температури на дзеркалі горіння від часу подачі піни.

Як видно із графіка, протягом 54 с мінімальні значення температури на дзеркалі горіння коливалися в міру піднімання струменями холоднішого бензину і піднімалися вгору у зв'язку із дією тепла від дзеркала горіння. На 55-ій секунді температура на дзеркалі короткочасно опустилася на 10 градусів. Тобто відбулося охолодження верхніх шарів середовища у місці виходу піни. Детальніший аналіз температури та тиску вказує на те, що на поверхню дзеркала вийшла пара, а не піна.

Отже, як показали проведені теоретичні дослідження процесу подавання пінних струменів в середовище прогрітого бензину, ламінарний рух струменів в середовищі триває лише протягом незначного проміжку часу і переходить в турбулентний.

Піна акумулюється в середовищі бензину в середній частині резервуара і лише через певний проміжок часу (55 с) виходить на поверхню у вигляді окремих частин.

Піна перед виходом на поверхню перегрівається, руйнується (закипає) і

виходить на поверхню горіння у вигляді водяної пари та повітря.

При цьому спостерігається локальне охолодження ділянок дзеркала горіння у зоні виходу пари.

Державна служба України з надзвичайних ситуацій
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

РЕКОМЕНДАЦІЇ

**ЩОДО ГАСІННЯ ПОЖЕЖ У РЕЗЕРВУАРАХ З НАФТОПРОДУКТАМИ
ПІДШАРОВИМ СПОСОБОМ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПРЕСІЙНОЇ
ПІНИ**

Львів
2025 рік

1. ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ

Рекомендації щодо гасіння пожеж у резервуарах з нафтопродуктами підшаровим способом за допомогою компресійної піни призначені для працівників Державної служби України з надзвичайних ситуацій для застосування під час гасіння пожеж нафтопродуктів у резервуарах, а також під час здійснення організаційно-підготовчих заходів (підготовка особового складу, розробка планів пожежогасіння, проведення пожежно-тактичних навчань та ін.).

2. НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

1. ВБН В.2.2-58.1-94* (1999). Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. Зі зміною № 1 (затвердженою наказом Держнафтогазпрому України від 24.12.1999 № 136а). Державний комітет нафтової, газової та нафтопереробної промисловості України (Держнафтогазпром);

2. Методичні рекомендації щодо організації оперативних дій підрозділів ДСНС під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів, що сталися внаслідок обстрілів в умовах ведення бойових дій. Наказ ДСНС України В-269 від 23.05.2022 р.;

3. НАПБ А.01.001-2014. (2014). Правила пожежної безпеки в Україні. Міністерство внутрішніх справ України;

4. ДСТУ 3789-2015. Пожежна безпека. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробувань;

5. ДСТУ EN 1568-1:2018 Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 1. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин піною середньої кратності, що подається на поверхню (EN 1568-

1:2018, IDT);

6. ДСТУ EN 1568-2:2018 Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 2. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин піною високої кратності, що подається на поверхню (EN 1568-2:2018, IDT);

7. ДСТУ EN 1568-3:2018 Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 3. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин піною низької кратності, що подається на поверхню (EN 1568-3:2018, IDT);

8. ДСТУ EN 16327:2018. Пожежогасіння. Напірні пінозмішувачі (PPPS) та системи пожежогасіння компресійною піною (CAFS) (EN 16327:2014, IDT);

9. Наказ МВС України від 26.04.2018 №340 «Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж»;

10. Наказ МНС України від 07.05.2007 №312 «Правила безпеки праці в органах і підрозділах МНС України».

3. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМІНІВ

У цих Рекомендаціях вживаються такі терміни та визначення:

Інтенсивність подавання вогнегасної речовини – витрата об'єму (маси) вогнегасної речовини за одиницю часу на одиницю площі;

Кратність піни – відношення об'єму піни до об'єму робочого розчину піноутворювача, з якого вона отримана;

Компресійні піна – це однорідна дрібноструктурна піна низької кратності, отримана шляхом змішування піноутворювача, води та стиснутого повітря;

Система пожежогасіння компресійною піною (compressed air foam system «CAFS») – система, де піноутворювач і повітря під тиском безперервно

подаються до води, що надходить із відцентрового пожежного насоса»;

Підшарове гасіння резервуарів – це спеціальний спосіб пожежогасіння нафти та нафтопродуктів у вертикальних сталевих резервуарах (РВС), при якому піна низької кратності подається під шар горючої рідини, піднімається через неї на поверхню, розтікається і створює ізолюючий шар, який перешкоджає надходженню горючих парів до зони горіння та запобігає повторному займанню.

4. ПОЗНАЧЕННЯ ТА СКОРОЧЕННЯ

ПУ – піноутворювач

КП – компресійна піна

РВС – резервуар вертикальний сталевий

РР – робочий розчин

К5 – кратність 5

К10 – кратність 10

CAF – compressed air foam (компресійна піна)

CAFS – compressed air foam system (система отримання компресійної піни)

ЛЗР – легкозаймисті речовини

ГР – горючі речовини

5. ПІДШАРОВЕ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ У РЕЗЕРВУАРАХ З НАФТОПРОДУКТАМИ ПІДШАРОВИМ СПОСОБОМ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ. СХЕМИ ПОДАВАННЯ КОМПРЕСІЙНОЇ ПІНИ ПІДШАРОВИМ СПОСОБОМ В РЕЗЕРВУАР З НАФТОПРОДУКТАМИ

5.1. Організація гасіння пожеж у резервуарах з нафтопродуктами підшаровим способом за допомогою компресійної піни повинна здійснюватися з урахуванням вимог наказу МВС України від 26.04.2018 №340 «Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж», наказу МНС України від 07.05.2007 №312 «Правила безпеки праці в органах і підрозділах МНС України», розроблених оперативних документів (планів пожежогасіння, інструкцій взаємодії), а також цих Рекомендацій.

5.2. Підшаровий спосіб гасіння пожеж нафтопродуктів у резервуарах за допомогою компресійної піни є спеціалізованою технологією, яка застосовується для ефективної ліквідації пожеж ЛЗР, таких як бензин чи дизельне пальне у вертикальних сталевих резервуарах. Цей спосіб базується на принципі подавання піни низької кратності безпосередньо в нижню частину резервуара, під шар горючої речовини (ГР). Завдяки меншій густині піни порівняно з нафтопродуктами вона спливає крізь рідину досягаючи поверхні, де утворює стійкий шар піни. Цей шар ізолює дзеркало горіння не даючи горючим парам потрапити в зону горіння, тим самим перериває процес горіння, а також частково охолоджує поверхню нафтопродукту знижуючи температуру до рівня нижчого за температуру спалаху. Такий підхід дозволяє гасити пожежу без прямого контакту з відкритим полум'ям, що значно знижує ризики для пожежних та забезпечує швидке припинення горіння. Для реалізації підшарового гасіння резервуари повинні бути обладнані відповідною

інфраструктурою, яка забезпечує надійне подавання піни та її рівномірний розподіл. Основним елементом є система пінопроводів, яка складається з трубопроводів, виготовлених із корозійностійких матеріалів, щоб витримувати агресивне середовище нафтопродуктів і піноутворювачів. Ці пінопроводи прокладаються до нижньої частини резервуара, щоб піна надходила безпосередньо під шар нафтопродукту. На кінці пінопроводів встановлюються спеціальні розподільні пристрої або пінні насадки, які забезпечують рівномірне введення піни та запобігають її змішуванню з рідиною на етапі подавання.

5.3. Традиційний спосіб підшарового гасіння із застосуванням повітряно-механічної піни є ефективними, але має певні обмеження, зокрема високе споживання ресурсів та вплив на екологічну безпеку. Компресійна піна, завдяки низькому споживанню води та піноутворювача, високій стійкості та ефективній ізоляції поверхні горіння, є альтернативою для підшарового гасіння.

5.4. Вогнегасна ефективність компресійної піни для підшарового гасіння визначається її кратністю, властивостями та вмістом піноутворювача. Рекомендована кратність компресійної піни – 10, при використанні 6% робочого розчину піноутворювача. Кратність піни суттєво впливає на ефективність підшарового гасіння. Піна K10 утворює щільний і стійкий ізоляційний шар, який ефективно ізолює поверхню горіння та запобігає повторному займанню.

Рекомендації враховують специфіку пожеж на об'єктах нафтової промисловості, де пожежі характеризуються швидким розвитком, високим тепловим навантаженням, утворенням токсичних продуктів згорання та ризиком вибухонебезпечних сумішей. Компресійна піна з кратністю 10 і концентрацією піноутворювача 6% забезпечує високу вогнегасну ефективність завдяки щільній структурі бульбашок, високій стійкості до термічної деструкції та ефективній ізоляції поверхні горіння, запобігаючи дифузії горючих парів у зону горіння. Інтенсивність подавання робочого розчину піноутворювача рекомендується на рівні 0,08-0,09 л/с·м² для резервуарів об'ємом до 5000 м³.

Порівняно з традиційним способом гасіння повітряно-механічною піною,

компресійна піна демонструє вищу вогнегасну ефективність з меншим споживанням ресурсів: скорочення витрат води в 2-5 разів за рахунок нижчого вмісту рідкої фази, піноутворювача в 6-10 разів завдяки оптимальній концентрації поверхнево-активних речовин.

5.5. Обмеження методу: необхідність стаціонарної інфраструктури, ризик фазових перетворень піни, що призводить до утворення пари та зниження охолоджувального ефекту. Для резервуарів об'ємом понад 5000 м³ рекомендується збільшити інтенсивність подавання на 20-30%. Безпека забезпечується моніторингом теплового випромінювання і токсичних випарів, з використанням дронів для візуальної розвідки та термографії.

Таблиця В.1

Порівняння підшарового способу гасіння пожеж у резервуарах з нафтопродуктами (бензин, дизельне пальне) за допомогою ПМП та КП

Критерій порівняння	Повітряно-механічна піна	Компресійна піна
Принцип дії	Піна подається через спеціальні пристрої (генератори) під шар пального, спливаючи на поверхню і створюючи ізолюючий шар	Піна формується в системі зі стисненим повітрям, подається під тиском під шар пального, швидко заповнює об'єм та ізолює горючий шар
Технологія генерування	Формується за допомогою змішування ПУ та води в генераторах піни	Використовує стиснене повітря, воду та ПУ для створення піни з високою щільністю і стабільністю. (не потребує спеціальних генераторів піни)
Швидкість подавання	Повільна, залежить від продуктивності генераторів і тиску в системі	Швидша, завдяки легкості піни та компактності системи
Ефективність гасіння	Ефективна для резервуарів із легкими нафтопродуктами, але може бути менш стабільною в умовах високої температури	Висока ефективність навіть в умовах високої температури, завдяки стабільності піни
Стійкість	Менш стійка до руйнування під дією високих температур	Висока стійкість через щільну структуру та менший вміст води
Витрата ПУ	Вища витрата через більший об'єм піни і меншу щільність	Нижча витрата завдяки компактності та ефективному розподілу піни
Екологічність	В основному генерується з фторвмісних плівкоутворювальних ПУ, які є шкідливими для екології	Генерується з ПУ загального призначення, які є біологічно м'якими

5.6. Дії Керівника гасіння пожежі. Керівник гасіння пожежі є ключовою фігурою в оперативному управлінні, відповідальною за інтеграцію тактичних рішень, оцінку ризиків і координацію ресурсів у реальному часі. Його дії базуються на принципах пожежної тактики, з урахуванням динаміки розвитку пожежі і потенційних вторинних загроз, зокрема детонація вибухових предметів у воєнних умовах.

5.6.1. КГП зобов'язаний:

- встановити периметр безпеки на відстані 50-150 м від зони обвалування, залежно від об'єму резервуара для мінімізації ризиків від теплового випромінювання чи фрагментарних уражень;

- огородити зону стрічками або бар'єрами, евакуювати цивільний персонал і призначити пости спостереження для моніторингу напрямку вітру з метою уникнення поширення токсичних парів та вторинних загроз, таких як поширення полум'я на суміжні резервуари;

- провести візуальну та інструментальну розвідку: використовувати безпілотні літальні апарати для оцінки об'єму резервуара, типу ЛЗР, тривалості горіння, наявності пошкоджень (зірваний дах, витік, деформація стінок через термічне розширення). Визначити запас піноутворювача, доступність водоймищ та гідрантів, перевірити цілісність стаціонарної системи підшарового гасіння. Якщо система пошкоджена - перейти до альтернативного плану, наприклад, поверхневого гасіння;

- організувати постійний моніторинг безпекової ситуації, включаючи газоаналіз для виявлення вибухонебезпечних концентрацій і термометрію;

- встановити радіозв'язок з представниками Збройних Сил України, територіальної оборони або правоохоронних органів для реального часу оцінки повітряної небезпеки чи ризику детонації вибухових предметів;

- у разі надходження інформації про повітряну загрозу або розпорядження старшої посадової особи підрозділу ДСНС - подати сигнал оповіщення для термінового відведення особового складу та техніки до заздалегідь визначених

пунктів збору й укриття;

- постійно контролювати аспекти, пов'язані з ризиком повторних обстрілів та небезпекою детонації, вживаючи заходів для відведення й укриття при погіршенні обстановки, з доповіддю до Оперативно-координаційного центру;

- провести розрахунок необхідної кількості вогнегасних речовин - води, піноутворювача - відповідно до площі дзеркала горіння, з урахуванням інтенсивності і тривалості подавання;

- організувати охолодження горючого резервуара та суміжних за допомогою водяних стволів;

- довести до особового складу детальний план пінної атаки: чіткі завдання, послідовність дій кожного пожежного розрахунку, обов'язкові заходи безпеки, сигнали початку та завершення подавання піни, сигнал негайного відходу з небезпечної зони та місце укриття при викиді нафтопродукту, а також порядок дій при повторному обстрілі чи повітряній тривозі;

- після гасіння - провести моніторинг на предмет повторного займання, з використанням пожежних тепловізорів для виявлення гарячих точок. Організувати очищення території від залишків піни та ЛЗР, звітувати про витрати ресурсів і ефективність оперативних дій до ДСНС;

Система компресійної піни (CAFS, Compressed Air Foam System) інтегрує генерування піни безпосередньо в пожежній автоцистерні, забезпечуючи низький гідравлічний опір і високу дальність подавання.

5.6.2. Порядок дій при підшаровому гасінні за допомогою пожежної автоцистерни, обладнаною системою подавання компресійної піни (CAFS):

- встановити АЦ на стабільному вододжерелі для забезпечення безперервного подавання води з відповідною витратою;

- провести розрахунок витрат ресурсів та підготувати запас вогнегасних речовин;

- під'єднати магістральну лінію до системи підшарового гасіння за межами зони обвалування, забезпечуючи герметичність з'єднань для уникнення втрат тиску;

- активувати CAFS: змішати воду, піноутворювач і стиснене повітря від компресора для генерування піни K5 або K10, з контролем тиску для оптимального змішування в камері;

- забезпечити охолодження резервуарів водяними стволами;

- при охолодженні резервуара слідкувати, щоб вода не потрапляла в резервуар і не руйнувала піну;

- розпочати подавання піни під шар ЛЗР через пінопроводи, з моніторингом швидкості спливання за допомогою дронів;

- подавання піни з інтенсивністю 0,08-0,09 л/с·м² робочого розчину, до повного гасіння, з урахуванням динаміки руху затоплених струменів;

- моніторити рівномірний розподіл піни і вихід на поверхню, коригуючи тиск для запобігання кипінню і фазовим перетворенням;

- при сигналі повітряної тривоги відвести особовий склад, зберігаючи тиск у системі для швидкого відновлення;

- зупинити подавання компресійної піни після досягнення температури на борті резервуара нижче температури спалаху нафтопродукту. Температуру спалаху контролювати за допомогою пірометра;

- після припинення горіння здійснювати подавання піни не менше 5 хв для зменшення температури бортів і дзеркала горіння;

- після припинення подавання компресійної піни організувати спостереження за температурою бортів резервуара та руйнуванням шару піни.

5.6.3. Порядок дій при підшаровому гасінні за допомогою пожежної автоцистерни, не обладнаної системою подавання компресійної піни (CAFS):

- встановити АЦ на вододжерело, розрахувати витрати ресурсів (див. таблиці нижче);

- провести розрахунок витрат ресурсів та підготувати запас вогнегасних речовин;

- встановити генератор компресійної піни на безпечній відстані перед зоною обвалування, під'єднати магістральну лінію від АЦ до генератора компресійної піни;

- забезпечити охолодження резервуарів водяними стволами;
- при охолодженні резервуара слідкувати, щоб вода не потрапляла в резервуар і не руйнувала піну;
- під'єднати до генератора компресійної піни компресор, який може забезпечити подавання повітря під тиском з продуктивністю 150-200 л/с;
- подати 6% розчин піноутворювача до генератора компресійної піни одночасно з подаванням повітря;
- розпочати подавання компресійної піни через систему підшарового гасіння та використанням продуктопроводу за погодженням адміністрації об'єкту з інтенсивністю 0,08-0,09 л/с·м² робочого розчину, до повного гасіння, з урахуванням динаміки руху затоплених струменів;
- моніторити тиск і потік піни, за потреби коригувати для оптимальної ефективності;
- моніторити рівномірний розподіл піни і вихід на поверхню, коригуючи тиск для запобігання кипінню і фазовим перетворенням. Вихід першої піни на дзеркало горіння повинен становити не більше 5хв для резервуара до 5000м³;
- при сигналі повітряної тривоги відвести особовий склад, зберігаючи тиск у системі для швидкого відновлення;
- зупинити подавання компресійної піни після досягнення температури на борті резервуара нижче температури спалаху нафтопродукту. Температуру спалаху контролювати за допомогою пірометра;
- після припинення горіння здійснювати подавання піни не менше 5 хв для зменшення температури бортів і дзеркала горіння;
- після припинення подавання компресійної піни організувати спостереження за температурою бортів резервуара та руйнуванням шару піни.

5.7. Схеми розгортання сил та засобів при підшаровому гасінні нафтопродуктів за допомогою компресійної піни.

Для подавання компресійної під шар нафтопродукту запропоновано декілька схем:

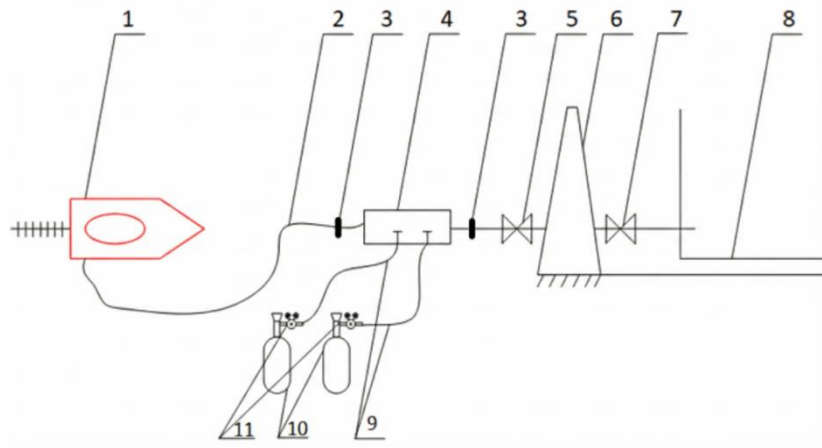


Рис. В.1. Схема подавання компресійної піни під шар горючої речовини в резервуар з використанням стаціонарного пінозмішувача. 1) пожежна автоцистерна; 2) пожежний рукав (магістральна лінія $\varnothing 77$); 3) з'єднувальні головки; 4) генератор компресійної піни; 5) вентиль подавання; 6) обвалування; 7) наповнювальний вентиль резервуара; 8) резервуар; 9) шланги для подавання газу (повітря); 10) балони з газом (повітрям) або компресор; 11) редуктор.

Стаціонарний пінозмішувач забезпечує стабільну роботу завдяки фіксованій конструкції та точному налаштуванню. Запропонована схема дозволяє пожежно-рятувальним підрозділам оперативно під'єднатись до стаціонарної системи підшарового гасіння в резервуарі та швидко розпочати гасіння. Також за цією схемою можуть використовуватись пожежні автоцистерни, які обладнані системою CAFS.

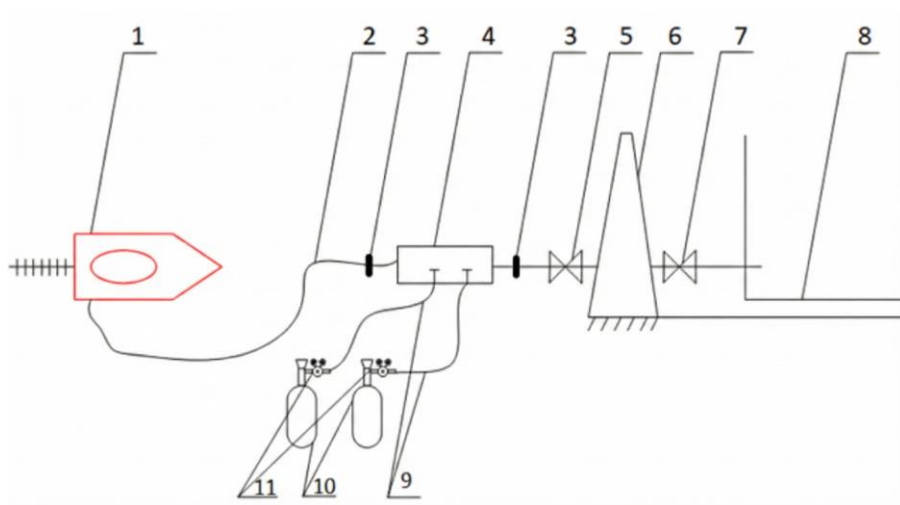


Рис. В.2. Схема подавання компресійної піни під шар горючої речовини в резервуар з використанням переносного пінозмішувача. 1) пожежна автоцистерна; 2) стороння ємність з піноутворювачем; 3) переносний пінозмішувач; 4) пожежний рукав (магістральна лінія $\varnothing 77$);

5) з'єднувальні головки; 6) генератор компресійної піни; 7) вентиль подавання; 8) обвалування; 9) наповнювальний вентиль резервуара; 10) резервуар; 11) шланги для подавання газу (повітря); 12) балон з газом (повітрям) або компресор; 13) редуктор.

Переносний пінозмішувач зазвичай використовують коли потрібно забрати піноутворювач із сторонньої ємності. Завдяки використанню переносного пінозмішувача не відбувається забруднення насоса пожежного автомобіля піноутворювачем.

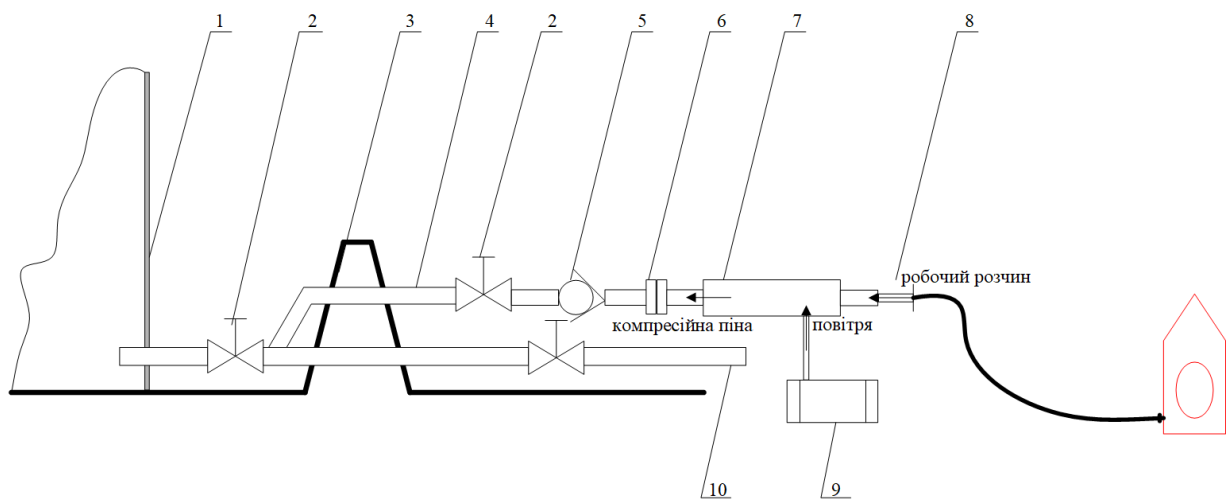


Рис. В.3. Принципова схема підшарового подавання компресійної піни під шар нафтопродукту у резервуар з використанням технологічного трубопроводу. 1) резервуар; 2) засувки; 3) зона обвалування; 4) пінопровід; 5) зворотній клапан; 6) мембрана; 7) генератор компресійної піни; 8) з'єднувальна головка (Ø 77 мм); 9) джерело повітря (компресор); 10) продуктопровід

5.8. Методика розрахунку витрати вогнегасних речовин для гасіння пожеж нафтопродукту в резервуарі підшаровим способом з використанням компресійної піни кратністю 5 (К5) та кратністю 10 (К10).

При моделюванні час гасіння не перевищував 25 хв (1500 с). Тому розрахунки витрат вогнегасних речовин проведено для тривалості гасіння 25 хвилин (1500 секунд). Кількість повітря визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{пов}} = Q_{\text{рр}} \times (K - 1) \text{ л/с}, \quad (1)$$

де, $Q_{\text{пов}}$ - кількість повітря, л/с;

$Q_{\text{рр}}$ - кількість робочого розчину, л/с;

Площі дзеркала горіння базуються на стандартних геометричних параметрах (табл. 4.1).

Необхідну кількість робочого розчину визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{рр}} = S \times I, \quad (2)$$

де, S – площа дзеркала горіння, м²;

I – інтенсивність, л/с·м² (0,08 л/с·м²).

Необхідну кількість піноутворювача (для 6% робочого розчину) визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{пу}} = Q_{\text{рр}} \times 0,06, \quad (3)$$

де, $Q_{\text{пу}}$ – кількість піноутворювача, л/с.

Необхідну кількість води (для 6% робочого розчину) визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{води}} = Q_{\text{рр}} \times 0,94, \quad (4)$$

де, $Q_{\text{води}}$ – кількість води, л/с.

Загальний об'єм витрат води визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{води (заг)}} = Q_{\text{води}} \times 1500, \quad (5)$$

де, $Q_{\text{води (заг)}}$ – загальний об'єм використаної води, л.

Загальний об'єм витрат піноутворювача визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{пу (заг)}} = Q_{\text{пу}} \times 1500, \quad (6)$$

де, $Q_{\text{пу (заг)}}$ – загальний об'єм використаного піноутворювача, л.

Загальний об'єм витрат повітря визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{пов (заг)}} = Q_{\text{пов}} \times 1500, \quad (7)$$

де, $Q_{\text{пов (заг)}}$ – загальний об'єм використаного повітря, л;

Об'єм піни на поверхні дзеркала горіння визначаємо за формулою:

$$V_{\text{піни}} = (Q_{\text{пов (заг)}} + Q_{\text{пу (заг)}} + Q_{\text{води (заг)}}), \quad (8)$$

де, $V_{\text{піни}}$ = об'єм піни на поверхні дзеркалі горіння, м³.

Таблиця В.2

Витрати вогнегасних речовин при підшаровому гасінні за допомогою
компресійної піни К5

об'єм резервуара (м ³)	площа дзеркала горіння (м ²)	к-сть повітря $Q_{\text{пов}}$ (л/с)	к-сть РР $Q_{\text{рр}}$ (л/с)	к-сть ПУ $Q_{\text{пу}}$ (л/с)	к-сть води $Q_{\text{води}}$ (л/с)	загальна к-сть повітря (л)	загальна к-сть ПУ (л)	загальна к-сть води (л)	об'єм піни (м ³)
2000	181	57,92	14,48	0,86	13,62	86880	1290	20430	108,6
3000	261	83,52	20,88	1,25	19,63	125280	1875	29445	156,6
5000	346	110,72	27,68	1,66	26,02	166080	2490	39030	207,6
10000	637	203,84	50,96	3,05	47,91	305760	4575	71865	382,2
20000	917	293,44	73,36	4,4	68,96	440160	6600	103440	550,2
30000	1632	522,24	130,56	7,83	122,73	783360	11745	184095	979,2
50000	2902	928,64	232,16	13,9	218,26	1292960	20850	327390	1641,2

**Витрати вогнегасних речовин при підшаровому гасінні за допомогою
компресійної піни К10**

об'єм резервуара (м ³)	площа дзеркала горіння (м ²)	к-сть повітря Q _{пов} (л/с)	к-сть РР Q _{РР} (л/с)	к-сть ПУ Q _{пу} (л/с)	к-сть води Q _{води} (л/с)	Загальна к-сть повітря (л)	Загальна к-сть ПУ (л)	Загальна к-сть води (л)	об'єм піни (м ³)
2000	181	127,62	14,48	0,86	13,62	191430	1290	20430	213,15
3000	261	187,92	20,88	1,25	19,63	281880	1875	29445	313,2
5000	346	249,12	27,68	1,66	26,02	373680	2490	39030	415,2
10000	637	458,64	50,96	3,05	47,91	687960	4575	71865	764,4
20000	917	660,24	73,36	4,4	68,96	990360	6600	103440	1100,4
30000	1632	1175,04	130,56	7,83	122,73	1762450	11745	184095	1958,25
50000	2902	2089,44	232,16	13,9	218,26	3134160	20850	327390	3482,4

При експериментальних випробуваннях процес гасіння пожежі спостерігався при досягненні товщини шару піни 10 см, тому гасіння буде відбуватись менше 25 хвилин. Значення часу в 25 хвилин обрано з урахуванням запасу.

Піна К10 характеризується вищою швидкістю заповнення дзеркала горіння, внаслідок чого гасіння відбувається швидше порівняно із піною К5.

6. ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ

6.1. Під час гасіння пожеж необхідно забезпечити виконання вимог наказу МНС України від 07.05.2007 №312 «Правила безпеки праці в органах і підрозділах МНС України», а також виконання вимог безпеки праці, відображених у планах пожежогасіння та інструкціях з техніки безпеки для конкретних об'єктів.

6.2. Крім заходів, передбачених у цих документах, необхідно:

6.2.1. Враховувати рекомендації адміністрації та інженерно-технічного персоналу об'єкту щодо безпечного виконання робіт, спрямованих на гасіння пожежі.

6.2.2. Встановити єдині звукові сигнали для швидкого сповіщення людей про небезпеку та ознайомити з ними весь особовий склад, що працює на пожежі, визначити шляхи відходу в безпечне місце. Сигнал на евакуацію особового складу під час виникнення загрози руйнування резервуара,

спінювання або викиду горючої рідини з резервуара належить подавати за допомогою сирени, якою обладнані пожежні автомобілі, за наказом КГП або оперативного штабу гасіння пожежі. Звуковий сигнал на евакуацію особового складу повинен принципово відрізнятися від усіх інших сигналів на пожежі. Дії особового складу за сигналами сповіщення повинні відпрацьовуватися на пожежно-тактичних навчаннях.

6.2.3. Під час визначення позицій ствольників начальник оперативної дільниці повинен вказати рубежі, на які слід відводити особовий склад у разі небезпеки.

6.2.4. Встановлювати автомобілі, обладнання і розміщувати особовий склад слід на безпечній відстані від місця пожежі з урахуванням можливого спінювання нафтопродукту, викиду, розливу рідини, що горить, і положення зони задимлення.

6.2.5. У процесі підготовки до гасіння пожежі слід призначити спостерігачів за станом резервуара, що горить, і сусідніх з ним резервуарів.

6.2.6. У випадку загрози викиду КГП повинен забезпечити подавання відповідного звукового сигналу та виведення особового складу у безпечне місце.

6.3. Не припускається перебування особового складу:

- безпосередньо не задіяного у гасінні пожежі в зоні можливого ураження під час викиду чи спінювання;

- на покрівлях аварійних чи сусідніх резервуарів, якщо це не пов'язано з нагальною потребою;

- на покритті залізобетонного резервуара, що горить. У виняткових випадках з дозволу оперативного штабу допускається перебування на покрівлях наземних резервуарів із стаціонарною покрівлею (сусідніх з тим, що горить) осіб, що були спеціально проінструктовані під розпис для виконання робіт із захисту дихальної та іншої арматури від теплового випромінювання пожежі. При цьому пересування дозволяється тільки по спеціальних площадках (пересувних містках).

6.4. Для негайної ліквідації можливого горіння нафтопродуктів в обвалуванні у випадку виникнення витоків, спінювання чи викиду нафтопродукту завчасно підготувати ГПС (водопінні стволи).

6.5. Забороняється знаходитися особовому складу всередині обвалування при наявності в обвалуванні розлиття нафти чи нафтопродукту.

6.6. У випадку необхідності виконання термінових робіт у зоні розлиття нафтопродуктів (перекриття засувок, усунення витoku з розгерметизованих комунікацій і т. ін.), поверхню рідини необхідно покрити піною.

6.6.1. Протягом всього часу перебування особового складу в обвалуванні необхідно продовжувати подавання піни на поверхню нафтопродукту, що знаходиться в обвалуванні.

6.6.2. Поряд з групою, яка виконує термінові роботи, повинні знаходитися ствольники, які повинні постійно подавати піну за допомогою піногенераторів. Особовий склад повинен бути одягнений у теплозахисні пожежні костюми і попередньо проінструктований.

6.7. Особовий склад ДСНС, що виконує роботи в зонах з підвищеною тепловою радіацією, повинен працювати в теплозахисних пожежних костюмах, а за необхідності – під прикриттям розпилених водяних струменів. Необхідно передбачити своєчасну заміну особового складу. Орієнтовний час перебування особового складу в зоні теплового випромінювання та безпечні відстані, повинні визначатися виходячи з технічних характеристик теплозахисних пожежних костюмів та інтенсивності теплового потоку. Інтенсивність теплового потоку можна визначати актинометрами.

6.8. Водії пожежних автомобілів, які забезпечують подавання вогнегасних речовин чи виконують інші роботи з гасіння пожежі і які можуть потрапити в зону задимлення повинні мати засоби захисту органів дихання та за необхідності їх використовувати.

6.9. Для захисту органів дихання необхідно використовувати ізолювальні захисні дихальні апарати на стиснутому повітрі чи ізолювальні регенеративні респіратори.

6.10. Рятувальні пристрої, засоби індивідуального захисту, бойовий одяг і спорядження пожежних повинні відповідати вимогам відповідних державних стандартів та технічних вимог і бути сертифікованими в Україні.