

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

**ГАСІННЯ ГОРЮЧИХ РІДИН
ТВЕРДИМИ ПОРИСТИМИ МАТЕРІАЛАМИ
ТА ГЕЛЕУТВОРЮЮЧИМИ СИСТЕМАМИ**

Монографія

Харків 2021

Рекомендовано до друку
Вченою радою НУЦЗ України
(протокол від 26.11.2020 № 3)

Рецензенти:

доктор технічних наук, доцент **С. В. Росоха**, директор Приватної установи
«Науково-дослідний інститут експертиз в галузі пожежної безпеки»;
доктор технічних наук, професор **О. Ю. Федоренко**, професор кафедри
технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного
університету «ХПІ».

УДК 614.84

Автори:

доктор технічних наук, доцент Дадашов І. Ф. – Розділи 1, 2, 3, 4, 7, 8;
доктор технічних наук, доцент Кіреєв О. О. – Вступ;
кандидат технічних наук, доцент Трегубов Д. Г. – Розділ 5;
доктор технічних наук, доцент Тарахно О. В. – Розділ 6.

Дадашов І. Ф.

Гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеут-
ворюючими системами: монографія / І. Ф. Дадашов, О. О. Кіреєв,
Д. Г. Трегубов, О. В. Тарахно. – Х.: НУЦЗУ, 2021.– 240 с.

Іл.: 63. Табл.: 45. Бібл.: 351.

Монографія містить теоретичні основи створення нового виду вогнегасних за-
собів для ліквідації пожеж за участю горючих рідин на основі легких пористих ма-
теріалів та гелеутворюючих складів. Також у роботі наведено результати експери-
ментального визначення вогнегасних характеристик таких засобів. Основна увага
приділена гасінню пожеж резервуарів з нафтопродуктами та спиртами. Монографія
розрахована на наукових і науково-практичних працівників, а також здобувачів за-
кладів вищої освіти, аспірантів і докторантів, які займаються проблемами пожежної
безпеки.

УДК 614.84

...

© Дадашов І. Ф., Кіреєв О. О.,
Трегубов Д. Г., Тарахно О. В., 2021
© НУЦЗУ, 2021

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів.....	8
Вступ	10
Розділ 1. Аналіз сучасних тенденцій розвитку засобів гасіння пожеж класу «В»	13
1.1 Горіння рідин	13
1.2 Основні способи зберігання горючих рідин та їх пожежна безпека	17
1.2.1 Основні способи зберігання горючих рідин.....	17
1.2.2 Стаціонарні установки пожежогасіння резервуарів.....	18
1.2.3 Мобільні засоби пожежогасіння резервуарів.....	19
1.3 Статистика пожеж резервуарів з горючими рідинами	20
1.4 Способи гасіння пожеж у резервуарах із горючими рідинами.....	21
1.4.1 Водопінні засоби гасіння горючих рідин	22
1.4.2 Гасіння горючих рідин водою і водними розчинами	30
1.4.3 Гасіння пожеж горючих рідин вогнегасними порошками.....	31
1.4.4 Гасіння горючих рідин вогнегасними аерозолями	31
1.4.5 Гасіння горючих рідин газами	32
1.4.6 Використання газоподібних інгібіторів горіння для гасіння горючих рідин.....	33
1.4.7 Використання інших вогнегасних засобів для гасіння горючих рідин.....	33
1.5 Порівняльна характеристика різних видів вогнегасних засобів гасіння пожеж класу «В».....	37
1.6 Висновки за розділом 1	40
Розділ 2. Вибір принципової схеми вогнегасного засобу підвищеної ефективності для гасіння пожеж класу «В»	41
2.1 Шляхи підвищення вогнегасних властивостей засобів гасіння пожеж класу «В»	41
2.2 Ранжування факторів, що впливають на вогнегасні характеристики засобів гасіння пожеж класу «В»	42
2.3 Вибір принципової схеми вогнегасної системи для гасіння горючих та легкозаймистих рідин.....	47
2.4 Обґрунтування вибору гелеутворюючої системи для формування ізолюючого шару	48
2.5 Обґрунтування вибору матеріалу легкого носія ізолюючого шару.....	49
2.6 Визначення плавучості сухого та змоченого піноскла в горючих рідинах.....	54
2.7 Визначення можливості нанесення суцільного шару гелю на поверхню шару гранульованого піноскла.....	56
2.8 Визначення плавучості системи «суцільний шар гелю на поверхні шару гранульованого піноскла».....	58

2.9	Визначення можливостей унесення гранул піноскла висхідними конвекційними потоками вогнища пожежі	58
2.10	Аналіз екологічних параметрів ГУС та їх компонентів.....	59
2.10.1	Дослідження екологічних властивостей ГУС за впливом на організми	61
2.10.2	Розрахунок можливого екологічного збитку від застосування ГУС	63
2.11	Висновки за розділом 2.....	66
Розділ 3. Визначення параметрів вогнегасної системи «Гель – Піноскло»		68
3.1	Визначення охолоджуючих та ізолюючих характеристик гелеподібного шару	68
3.1.1	Моделювання ізолюючих властивостей гелеподібного шару по відношенню до пари горючих рідин.....	68
3.1.2	Експериментальне визначення ізолюючих властивостей гелевих шарів.....	72
3.2	Визначення охолоджуючих та ізолюючих характеристик шару легкого носія	81
3.2.1	Моделювання ізолюючих властивостей шару легкого носія по відношенню до пари горючих рідин.....	81
3.2.2	Експериментальне визначення ізолюючих властивостей шару гранульованого піноскла.....	85
3.2.3	Визначення охолоджуючих властивостей шару гранульованого піноскла	88
3.3	Визначення параметрів бінарного шару «Гель–Піноскло»	102
3.3.1	Моделювання процесу переносу пари рідини крізь двошаровий матеріал «Гель–Піноскло»	102
3.3.2	Експериментальне визначення ізолюючих властивостей бінарного шару «Гель–Піноскло»	109
3.3.3	Визначення охолоджуючих властивостей бінарного шару «Гель–Піноскло».....	111
3.3.4	Визначення часу працездатності бінарного шару «Гель–Піноскло».....	113
3.4	Висновки за розділом 3.....	113
Розділ 4. Експериментальне визначення вогнегасних характеристик систем пожежогасіння на основі пористих матеріалів та гелеутворюючих систем		115
4.1	Експериментальне дослідження параметрів гасіння горючих та легкозаймистих рідин сухим піносклом на лабораторних модельних вогнищах пожежі класу «В».....	115
4.1.1	Експериментальне дослідження масової швидкості вигорання та умов гасіння бензину сухим піносклом на лабораторних модельних вогнищах пожежі класу «В»	115

4.1.2	Експериментальне дослідження масової швидкості вигорання та умов гасіння алканів сухим піносклом на лабораторних модельних вогнищах пожежі класу «B»	119
4.1.3	Експериментальне дослідження масової швидкості вигорання й умов гасіння технічних рідин сухим піносклом на лабораторних модельних вогнищах пожежі класу «B»	123
4.2	Експериментальне дослідження умов гасіння горючих рідин змоченим піносклом на лабораторних модельних вогнищах пожежі класу «B».....	127
4.3	Експериментальне дослідження умов гасіння горючих рідин сухим та змоченим піносклом на стандартних модельних вогнищах 2B	131
4.3.1	Експериментальне дослідження масової швидкості вигорання бензину та умов гасіння сухим піносклом на стандартному модельному вогнищі пожежі 2B	132
4.3.2	Експериментальне дослідження умов гасіння бензину змоченим піносклом на стандартному модельному вогнищі пожежі 2B.....	137
4.3.3	Експериментальне дослідження умов гасіння вуглеводневих рідин сухим піносклом на стандартних модельних вогнищах пожежі 2B.....	138
4.3.4	Експериментальне дослідження умов гасіння вуглеводневих рідин змоченим піносклом на стандартних модельних вогнищах пожежі 2B.....	139
4.3.5	Експериментальне дослідження умов гасіння бензину сухим та змоченим піносклом на модифікованому модельному вогнищі пожежі 2B без використання ГУС	142
4.5	Експериментальне дослідження умов гасіння аварійних розливів горючих рідин із використанням піноскла та гелеутворюючих систем	147
4.6	Висновки за розділом 4	149
Розділ 5. Визначення параметрів вогнегасної системи «Гель-Піноскло» по відношенню до спиртів		151
5.1	Охолоджуюча здатність шару піноскла по відношенню до спиртовмісних рідин	153
5.2	Визначення ізолюючих характеристик шару піноскла по відношенню до спиртів	154
5.3	Експериментальне визначення ізолюючих властивостей гелевих шарів по відношенню до спиртів.....	155
5.4	Визначення параметрів бінарного шару «гель–піноскло» по відношенню до спиртів	156
5.5	Визначення плавучості сухого та змоченого піноскла в спиртах	157
5.6	Визначення часу працездатності бінарного шару «гель-піноскло», що нанесено на спиртові рідини	160
5.7	Висновки за розділом 5	160

Розділ 6. Експериментальне визначення вогнегасних характеристик систем пожежогасіння на основі пористих матеріалів та гелеутворюючих систем по відношенню до спиртів	162
6.1 Експериментальне дослідження впливу товщини шару сухого піноскла на масову швидкість вигорання ряду спиртів.....	162
6.2 Експериментальне дослідження умов гасіння спиртів змоченим піносклом.....	167
6.3 Експериментальне дослідження умов гасіння спиртів сухим і змоченим піносклом с додатковим нанесенням шару гелю	170
6.4 Висновки за розділом 6.....	171
Розділ 7. Розробка теорії та апаратурно-технічного забезпечення використання вогнегасних негорючих пористих матеріалів для гасіння горючих рідин.....	172
7.1 Аналіз теоретичних основ та способів транспортування легких негорючих пористих матеріалів на поверхню палаючих горючих рідин.....	172
7.2 Розробка технічних засобів та способу подавання гранул легких негорючих пористих матеріалів на поверхню палаючої рідини.....	178
7.3 Розробка пневмоекційного пристрою подавання гранул піноскла на гасіння пожежі класу «В».....	190
7.4 Випробування пневмоекційного пристрою подавання гранул піноскла на гасіння пожежі класу «В» малого розміру.....	192
7.5 Рекомендації з подавання гранульованого піноскла під час гасіння пожеж резервуарів	194
7.6 Висновки за розділом 7.....	195
Розділ 8. Рекомендації щодо гасіння пожеж класу «В» з використанням пористих матеріалів і гелеутворюючих систем	196
8.1 Токсикологічні, екологічні та експлуатаційні характеристики компонентів вогнегасних систем на основі пористих матеріалів і ГУС.....	196
8.1.1 Визначення густини розчинів компонентів	198
8.1.2 Визначення в'язкості розчинів компонентів ГУС.....	198
8.1.3 Визначення кислотності й корозійних властивостей компонентів ГУС	200
8.1.4 Визначення силікатного модулю рідкого скла	200
8.2 Засоби подавання піноскла	202
8.3 Засоби подавання вогнегасних ГУС	203
8.4 Вибір параметрів подавання вогнегасних речовин під час гасіння пожеж резервуарів із ГР з використанням пористих матеріалів і ГУС	204
8.4.1 Розрахунок параметрів подавання піноскла без використання ГУС та з використанням ГУС у випадку малого часу вільного горіння	204
8.4.2 Розрахунок параметрів подавання піноскла без використання ГУС у випадку великого часу вільного горіння.....	206

8.4.3 Розрахунок параметрів подавання піноскла з використанням ГУС у випадку великого часу вільного горіння	207
8.6 Рекомендації з гасіння розливів горючих рідин з використанням пористих матеріалів і гелеутворюючих систем	209
8.7 Розрахунок загальних витрат ПС і ГУС на гасіння резервуара РВС-5000 і 1 м ² площі розливу горючої рідини	210
8.8 Порівняння економічних параметрів вогнегасної системи з існуючими.....	210
8.9 Висновки за розділом 8	213
Висновки	215
Список використаних джерел	218

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

$\alpha_{\text{пс}}$	- коефіцієнт температуропровідності піноскла, $[\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}]$
$\alpha_{\text{гр}}$	- коефіцієнт температуропровідності горючої рідини, $[\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}]$
EC_x	- ефективна концентрація для X %-го ефекту (concentration associated with X % response)
LC	- летальна концентрація (lethal concentration)
LOEC	- мінімальна спостережувана діюча концентрація (low estobserve deffect concentration)
NOEC	- максимальна спостережувана недіюча концентрація (no observed effect concentration)
PNEC	- прогнозована безпечна концентрація (predicted no effect concentration)
АУТОГУС	- автономна установка гасіння з гідравлічним розпиленням
АУТОГУС-П	- автономна установка гасіння пожеж з пневматичним розпиленням
A, B і C_a	- константи рівняння Антуана
АУГП	- автономна установка газового пожежогасіння
АУС	- аерозолеутворююча система
ВГЗ	- вогнегасний засіб
ВР	- вогнегасна речовина
ВС	- вогнегасна система
ГДК	- гранично допустима концентрація
ГР	- горюча рідина
ГУС	- гелеутворююча система
ЕА	- ежекційний апарат
ЛЗР	- легкозаймиста рідина
ЛНПМ	- легкі негорючі пористі матеріали
ВКМПП	- верхня концентраційна межа поширення полум'я
НКМПП	- нижня концентраційна межа поширення полум'я
П	- плавучість
ПАР	- поверхнево-активна речовина
ГДК	- гранично допустима концентрація
ПУ	- піноутворювач
ПУС	- піноутворюючі склади
РВС	- резервуар вертикальний сталевий
УКПГ	- установка комбінована пожежогасіння
Ф	- питома поверхнева витрата гелю
ШТП	- піни, що швидко тверднуть
p	- тиск пари рідини, [Па]
C	- молярна концентрація, [моль/л]
c	- питома теплоємність, $[\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}]$

E	- фінансові витрати на вогнегасні речовини, [грн.]
e	- вартість 1 т вогнегасної речовини, [грн.]
h	- товщина шару гелю або піноскла, [м]
$h \uparrow$	- висота шару піноскла над шаром рідини, [м]
$h \downarrow$	- висота шару піноскла, що занурена під шар рідини, [м]
$h_{\text{заг}}$	- загальна товщина шару піноскла, [м]
h_b, h_o	- емпіричні коефіцієнти в рівнянні (4.3), [м]
G	- загальна витрата вогнегасної речовини, [кг]
I	- інтенсивність подавання ВР, $[\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}]$
k	- емпіричний коефіцієнт в рівнянні (4.3)
k_I	- коефіцієнт розподілу на межі фаз
K	- коефіцієнт сповільнення випаровування
l	- характерний розмір поверхні, [м]
m	- маса, [кг або г]
Nu_D	- дифузний критерій Нуссельта
Re	- критерій Рейнольдса
T	- температура, [К]
V_m	- масова швидкість вигорання, $[\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}]$
$V_{\text{вип}}$	- швидкість випаровування, $[\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}]$
H_2	- безрозмірна товщина шару піноскла:
$\Delta H_{\text{вип}}$	- теплота випаровування, $[\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}]$
S	- площа поверхні, $[\text{м}^2]$
$t_{\text{займ}}$	- температура займання, $[\text{°C}]$
$t_{\text{сс}}$	- температура самоспалахування, $[\text{°C}]$
$t_{\text{кип}}$	- температура кипіння, $[\text{°C}]$
ρ	- густина, $[\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}]$
μ	- молярна маса, $[\text{г} \cdot \text{моль}^{-1}]$
τ	- час випаровування, [хв] або [годин]
ω	- масова концентрація

ВСТУП

Актуальність теми. Дані всесвітньої статистики пожеж свідчать про поширеність пожеж класу «В» [1–2]. Гасіння горючих рідин є однією з найскладніших проблем пожежогасіння. Особливо великі труднощі викликає гасіння нафти і нафтопродуктів у резервуарних парках. Зазвичай такі пожежі характеризуються підвищеною тривалістю, необхідністю залучення великої кількості сил і засобів пожежогасіння, великими матеріальними збитками і нерідко – людськими жертвами [3–4]. Існуючі засоби гасіння горючих рідин часто не забезпечують позитивного результату навіть за повного виконання нормативних вимог [5–6].

Проблеми гасіння пожеж класу «В» досліджувались Абрамовим Ю.О., Антоновим А.В., Бліновим В.І., Басмановим О.Є., Боровиковим В.О., Воєвдою С.С., Ковалишиним В.В., Козаковим М.В., Козловим В.А., Кучером В.М., Меркуловим В.А., Молчановим В.П., Петровим І.І., Худяковим Г.М., Шароварніковим О.Ф., Шароварніковим С.О., Кацуямою В., Barret J., Bauer V.G., Cambou A., Herrog G., Falkenhainer K.-H., McCahan C., Nash P., Paramon R., Plan B., Szoryi J., Wilson M., Whitle J. та іншими.

Для гасіння нафти і нафтопродуктів застосовують розпилену та тонкорозпилену воду, порошкові засоби, хладони, газоподібну, рідку і тверду вуглекислоту. У разі води домінуючим механізмом припинення горіння є охолодження. Для порошкових засобів і хладонів основний внесок у гасіння рідин вносить ефект інгібування. Вуглекислота в основному реалізує охолоджуючий та розбавлюючий механізми припинення горіння.

Розглянуті вище засоби пожежогасіння забезпечують позитивний результат у разі гасіння невеликих за розмірами резервуарів із горючими рідинами. При цьому в разі гасіння водою і вогнегасним порошком є можливість створити аерозольну хмару води або порошку над всією поверхнею рідини, що горить. У разі застосування вуглекислого газу і хладонів також необхідно створити вогнегасну концентрацію відповідних газів над усім дзеркалом горючої рідини. Якщо над частиною поверхні горючої рідини не створюється вогнегасна концентрація аерозолів або вогнегасного газу, то над цією ділянкою горіння триває. Після зменшення концентрації вогнегасних речовин нижче вогнегасної над поверхнями рідини, де горіння спочатку припинилося, горіння поновлюється знову. Для забезпечення одночасного досягнення вогнегасної концентрації над усім дзеркалом рідини, що горить, необхідно забезпечити високу інтенсивність подавання вогнегасної речовини протягом деякого часу. Цю умову важко забезпечити для резервуарів великого розміру.

Найбільшого поширення для гасіння горючих рідин набули повітряно-механічні піни [6]. Вони забезпечують досить тривалу ізоляцію поверхні горючої рідини від газової фази, в якій відбувається процес горіння. Вони також виявляють помірну охолоджуючу дію. Здатність пін розтікатися дозволяє їм проникати у важкодоступні місця, що полегшує гасіння так званих «кишень». Однак вогнегасні піни мають ряд недоліків:

- мала стійкість пін за умови дії інтенсивних теплових потоків від полум'я палаючої рідини і від контакту піни з рядом горючих рідин, особливо полярних;
- складнощі з подаванням пін на великі відстані;
- унесення пін конвективними потоками, їх руйнування в ході підльоту до резервуара та зіткнення з поверхнею рідини;
- висока вартість ряду піноутворювачів і технічних засобів подачі пін, особливо в разі використання підшарового способу подачі;
- піни забруднюють горючі рідини, що призводить до неможливості їх подальшого використання за прямим призначенням або ускладнює їх подальшу переробку;
- до складу пін входять екологічно небезпечні речовини – піноутворювачі.

Особливо необхідно відзначити те, що останнім часом відбувся перегляд токсико-екологічних параметрів піноутворювачів. До складу піноутворювачів входять поверхнево-активні речовини (ПАР). Токсичності та екологічній небезпеці ПАР присвячена велика кількість досліджень [7–12].

В якості вогнегасних речовин допускається використання речовин 3-4-го класів небезпеки. А до органічних сполук додається ще й вимога щодо їх біологічного розкладу в навколишньому середовищі – вони повинні бути «біологічно м'якими» [3]. Для більшості ПАР, які використовуються як компоненти піноутворювачів, декларується відповідність цим вимогам.

Останні дослідження в галузі токсичності й біодеградації компонентів піноутворювачів дозволили засумніватися в їх відповідності екологічним вимогам [13–14]. Так, у роботі [13] експериментально встановлено, що фторсинтетичні ПУ в 150 разів більш токсичні за «біологічно жорсткий» піноутворювач ПО-6К та в 2500 разів більш стабільні до біодеградації в навколишньому середовищі. Підтвердженням екологічної небезпеки таких піноутворювачів стало рішення агентства з охорони навколишнього середовища США оголосити програму добровільного виведення з обігу таких речовин. Після цього фірма «3М», що випускає плівкоутворювальні піноутворювачі, добровільно відмовилася від їх виробництва.

Так само експериментальні дослідження традиційних синтетичних піноутворювачів показали, що раніше задекларовані характеристики їх токсичності сильно занижені. В роботі [14] стверджується, що традиційні аніонні піноутворювачі проявляють ще більшу токсичність, у порівнянні з фторвмісними піноутворювачами. З урахуванням відомого факту низької ефективності використання традиційних піноутворювачів для гасіння горючих рідин у резервуарах [3–6] можна зробити висновок, що існуючі повітряно-механічні засоби пожежогасіння у значній мірі не задовольняють висунутим до них вимогам з ефективності та екологічних показників.

Найбільш екологічно безпечними вогнегасними засобами, які можна використовувати для гасіння горючих рідин, є тонкорозпилена вода, рідка і тверда гранульована вуглекислота. Однак їх використання для гасіння горю-

чих рідин є ефективним тільки для висококиплячих рідин. Крім того, доцільність використання рідкого вуглекислого газу обмежується економічними факторами, оскільки вимагає постійного охолодження ізотермічного модуля до температури мінус 20 °С [15].

Одним зі шляхів підвищення екологічних параметрів вогнегасних засобів, які можна використовувати під час гасіння горючих рідин, є створення екологічно безпечних піноутворювачів. В якості компонентів таких піноутворювачів можна використовувати природні ПАР (протеїнові рослинного і тваринного походження). З таких піноутворювачів на початку минулого століття і починалося пінне пожежогасіння. Як піноутворювачі використовувалися екстракти лакриці й мильного кореня, продукти переробки крові тварин, гідролізат біомаси.

У ряді європейських країн протеїнові піноутворювачі, завдяки їх високим екологічним показникам, використовуються і в наш час. З'явилися повідомлення про появу ряду нових піноутворювачів з високими екологічними характеристиками на основі екстракту хмелю [16]. Однак за своїми вогнегасними й економічними параметрами вони істотно поступаються вживаним у наш час синтетичним піноутворювачам. Звідси можна дійти висновку, що для повітряно-пінних засобів пожежогасіння виникло протиріччя між екологічними і вогнегасними характеристиками.

Тому, у зв'язку з наявністю суттєвих недоліків у існуючих засобах гасіння пожеж класу «В», актуальним є розв'язання проблеми подолання недосконалості існуючих методів ліквідації пожеж класу «В» шляхом створення нових, більш ефективних засобів ліквідації такого виду пожеж та розробки наукових основ гасіння пожеж горючих рідин такими засобами.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ЗАСОБІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ «В»

1.1 Горіння рідин

До пожеж класу «В» відносяться пожежі, в яких основною горючою речовиною є рідини. В Україні такі пожежі поділяють на два підкласи: *B1* – пожежі за участю горіння рідин, що не розчиняються у воді; і *B2* – пожежі рідин, що розчиняються у воді, а також клас *F* – пожежі за участю рослинних і тваринних олій та жирів для приготування їжі.

Інколи за умовами горіння рідин розрізняють пожежі резервуарів з горючими рідинами, пожежі розлитих рідин і пожежі нафтових фонтанів. Перші два типи пожеж мають схожі властивості й однакові методи гасіння. Пожежі нафтових фонтанів мають багато особливостей і у монографії не розглядаються.

Велика кількість речовин за температури навколишнього середовища знаходяться в рідкому стані. В межах класифікації речовин за пожежною небезпекою до рідин відносять речовини з температурою плавлення (краплепадіння) менше 50 °С [54]. Більшість із них здатні займатися і горіти. В першу чергу, до рідин, здатних горіти, відносяться органічні речовини. Найбільш поширеними горючими рідинами є вуглеводневі палива, щорічний світовий оборот яких становить мільярди тонн.

Великий внесок у дослідження процесу горіння рідин зробили В.І. Блінов, Г.Н. Худяков, В.Ч. Реутт, І.І. Петров [55–60].

Основні фактори, що впливають на процес горіння та гасіння рідин, наведені нижче.

Горіння рідин відбувається в газовій фазі. Стадіям займання і горіння рідини передує процес її випаровування. У закритому просторі через деякий час тиск пари рідини досягає деякого рівноважного значення, різного для різних рідин за даних умов. Такий стан пари, який характеризується незмінною концентрацією в часі, називається *насиченим*, а тиск – *тиском насиченої пари*. Рідини, які мають високі значення тиску пари за температур до 100 °С, називаються *леткими* або *низькокиплячими* ($T_{\text{кип}} < 100^\circ\text{C}$), а з низькими значеннями тиску пари – *малолеткими* або *висококиплячими* ($T_{\text{кип}} > 100^\circ\text{C}$).

Тиск пари рідини сильно залежить від температури. Залежність рівноважного тиску пари (p) від температури (T) для рідин описується рівнянням Клаузіуса–Клапейрона:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{вип}}}{T \cdot (V_{\text{пар}} \cdot V_p)}, \quad (1.1)$$

де $\Delta H_{\text{вип}}$ – теплота випаровування (кипіння) рідини; $V_{\text{пар}}$ і V_p – молярний об'єм пари і рідини.

Це рівняння також можна записати в іншій формі:

$$\frac{d \ln p}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{вип.}}}{RT^2}. \quad (1.2)$$

Для практичних розрахунків зручно користуватися емпіричним рівнянням Антуана:

$$\lg p = A - \frac{B}{t + C_a}, \quad (1.3)$$

де A , B і C_a – константи, індивідуальні для кожної речовини. Значення цих констант наведені в довідковій літературі [54, 61].

Можливість запалювання пароповітряної суміші визначається співвідношенням фактичної концентрації пари та значень концентраційних меж поширення полум'я (КМПП). Але для багатьох рідин досліджена залежність зміни концентрації та тиску пари від температури є невідомою. Тому для зазначеного агрегатного стану речовини більш поширеним є використання температурних параметрів безпеки.

Мінімальна температура рідини, за якої над її поверхнею утворюється пара, здатна спалахувати від джерела запалювання в кінетичному режимі, називається *температурою спалаху* [62, 54, 63]. Але за такої мінімальної температури швидкість пароутворення ще недостатня для виникнення стійкого горіння. Температура спалаху є важливим параметром рідини, її взято за основу класифікації рідин за ступенем їх пожежної безпеки.

Розрізняють *горючі рідини* і *легкозаймисті* (ЛЗР). До класу «легкозаймистих рідин» відносять рідини з температурою спалаху в закритому тиглі не більше, ніж 61 °С, та 66 °С – у відкритому тиглі [61]. Відповідно рідини з температурою спалаху в закритому тиглі більше за 61 °С відносять до класу «горючих рідин».

За температури спалаху має місце короткочасне згоряння пари рідини в повітрі, яке не здатне перейти у стійке горіння рідини. За умови збільшення температури горючої рідини тиск її пари може досягти значення, за якого у разі внесення джерела запалювання, виникає стійке горіння. Тобто швидкість випаровування вже дорівнює швидкості згоряння пари. Така температура називається *температурою займання* [54, 64].

Для ЛЗР вона на (1÷5)°С більша за температуру спалаху, а для горючих рідин – на (30÷35)°С [65]. За будь-якої температури рідини, яка є більшою за температуру займання, у разі дії джерела запалювання на пару встановлюється стаціонарний процес горіння ($V_{\text{вип.}} = V_{\text{гор.}}$).

Важливим параметром горючих рідин є *температура самоспалахування*. Під нею розуміють найменшу температуру повітряної суміші речовини, за якої відбувається різке збільшення швидкості екзотермічних реакцій з досягненням полум'яного горіння.

Температура самоспалахування є одним з основних показників пожежної безпеки речовин. Значення температури самоспалахування використо-

вують як один з основних показників пожежної небезпеки речовин. За його допомогою визначають групи вибухобезпечних сумішей, за умови влаштування вибухозахищеного обладнання, та визначають допустиму температуру нагріву робочих поверхонь, яка ще не викликає небезпеки самоспалахування повітряних сумішей. Чим нижче температура самоспалахування, тим більша пожежна небезпека речовини. Значення температури самоспалахування визначає можливість самовільного запалювання пароповітряної суміші від перегрітих конструкцій під час розвитку пожежі.

Крім температурних параметрів пожежної небезпеки рідин, використовуються і концентраційні параметри. Діапазон концентрацій, в якому відбувається горіння, має межі у вигляді нижньої та верхньої концентраційних меж поширення полум'я (НКМПП і ВКМПП), а сам діапазон являє собою область концентрацій, здатних до запалювання. Ці межі показують область концентрацій пари горючої рідини в повітрі, за яких суміш здатна займатися від джерела запалювання з подальшим поширенням полум'я на всю горючу повітряну суміш.

Якщо концентрація пари менше НКМПП, то поширення полум'я не відбувається через нестачу горючої речовини. Якщо концентрація пари є більшою за ВКМПП, то поширення полум'я не відбувається через нестачу окисника (кисню повітря).

Концентрація пари та її тиск пов'язані співвідношенням:

$$p = 1000 \cdot c \cdot R \cdot T, \quad (1.4)$$

де p – тиск, виражений в Па; c – молярна концентрація (моль/л); R – газова стала.

Концентраційні межі, тиск пари і відповідні їм температури можна знайти в довідковій літературі, де наведено й методи їх розрахунку [61].

Кількісними характеристиками інтенсивності процесу горіння рідин є масова і лінійна швидкості вигорання рідини. *Масова швидкість вигорання* V_m – маса рідини, яка вигорає з одиниці площі поверхні в одиницю часу. *Лінійна швидкість вигорання* V_h – висота шару рідини, яка вигорає з одиниці площі поверхні в одиницю часу.

Лінійна й масова швидкості вигорання рідини визначаються інтенсивністю її випаровування $I_{\text{вип.}}$ – масою рідини, яка випаровується з одиниці площі поверхні в одиницю часу в процесі горіння. Інтенсивність випаровування, у свою чергу, визначається природою речовини (молярною масою, теплотою випаровування, в'язкістю), температурою рідини, теплотою згорання, швидкістю руху середовища (як поверхневого шару рідини, так і повітряних мас поблизу її поверхні) і загальним тиском над поверхнею рідини. Також швидкість випаровування залежить від параметрів ємності, в якій знаходиться рідина. В першу чергу вона залежить від висоти вільного борту ємності та загальної площі поверхні рідини.

У разі виникнення пожежі в резервуарі утворюється і горить потік пароповітряної суміші. Горіння при цьому є дифузійним і турбулентним [66]. *Дифузійне горіння* – процес горіння неоднорідної (попередньо не перемішаної) горючої суміші, в якому суттєву роль відіграють процеси дифузії окисника до фронту полум'я. *Турбулентне горіння* – це процес, за якого масообмін здійснюється не тільки за рахунок молекулярної, але і турбулентної дифузії, в результаті макроскопічного вихрового руху газоподібних шарів горючої суміші.

Газодинамічний режим горіння залежить від лінійної швидкості руху горючої речовини і характеризується критерієм Рейнольдса:

$$Re = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\mu}, \quad (1.5)$$

де v – лінійна швидкість газового потоку, м/с; l – характерний розмір, м; ρ – щільність потоку, кг/м³; μ – динамічна в'язкість, Н·с/м².

Якщо $Re < 2300$, то режим руху шарів горючої суміші – ламінарний, за умови $2300 < Re < 10000$ – перехідний, а за значень $Re > 10000$ – турбулентний.

У разі виникнення пожежі резервуарів факел полум'я формується висхідними конвекційними потоками продуктів згоряння. У вільному висхідному конвекційному потоці критичне значення числа Рейнольдса становить 150, що приблизно в 10 разів менше зазвичай прийнятого [66]. Газодинамічний режим горіння залежить від діаметра резервуара. У випадку пожеж у резервуарах діаметром більше 1 м полум'я є повністю турбулентним, і швидкість вигорання мало залежить від діаметра.

Однією з важливих характеристик процесу горіння рідин є *швидкість висхідних конвекційних потоків* над осередком горіння. Ця характеристика впливає на можливість подачі вогнегасних засобів у розпиленому дисперсному стані. Чим вище швидкість висхідних конвекційних потоків, тим більше втрати вогнегасних речовин у процесі подавання. Так, високократні піни та високодисперсні вогнегасні порошки у значній мірі виносяться конвекційними потоками. В роботі [67] проведено оцінку швидкості висхідних потоків над бензином, дизельним паливом і гасом. Відповідні значення швидкості становлять (2,3÷2,6) м/с, (1,6÷2,1) м/с і (1,3÷1,4) м/с.

Важливою характеристикою процесу горіння є *температура поверхневого шару рідини*. Від моменту займання температура цього шару швидко зростає і досягає значення, близького до температури кипіння, але з часом рідина прогрівається у глибину. Розподіл температури рідини за глибиною резервуара носить різний характер. У рідин першого роду, за умови віддалення від поверхні, у глибину температура плавно знижується. У рідин другого роду формується рівномірно прогрітий до температури, близької до температури кипіння, шар, який отримав назву *гомותרмічного*. В індивідуальних рідинах з часом товщина гомותרмічного шару зростає, а температура залишається сталою. У багатокомпонентних рідинах температура згодом поступово підвищується. Гомותרмічний шар значної товщини виникає в рідинах з температурою початку кипіння менше

100 °С (мазут, нафта, деякі види газового конденсату і бензину).

Залежно від умов згоряння пари рідини може бути *повним* і *неповним*. У разі повного згоряння утворюються продукти, не здатні до подальшого окиснення (CO_2 , H_2O , HCl). У випадку неповного згоряння утворюються продукти, здатні до подальшого горіння (C_T – кіптява, CO та інші продукти неповного окиснення). В реальних умовах пожежі під час горіння органічних речовин зазвичай повного згоряння не відбувається, що супроводжується формуванням непрозорого диму, який містить частки вуглецю, що не прореагували.

У разі горіння рідин другого роду в резервуарах процес утворення гомо-термічного шару, за умови наявності води у рідині, що горить, може призводити до явищ її спінювання або викиду. Викиди є одним з найбільш небезпечних явищ в умовах таких пожеж. Вони часто супроводжуються людськими жертвами. Основною причиною спінювання є швидке закипання крапель води, які дисперговані в рідині. Вода може міститися у горючій рідині як супутній продукт або потрапити в неї під час подавання піни або інших водовмісних засобів пожежогасіння. Ці явища є характерними лише для ГР, температура яких під час горіння перевищує 100 °С.

1.2 Основні способи зберігання горючих рідин та їх пожежна безпека

1.2.1 Основні способи зберігання горючих рідин

Залежно від кількості ГР їх зберігають у резервуарах або спеціальній тарі (цистерни, бочки, бідони, бутилі, балони, баки, каністри та ін.). Раніше також використовувалися так звані, «комори» (земляні ями), які в наш час в дещо модернізованому вигляді використовуються рідко для тимчасового зберігання малолетких в'язких рідин. Для транспортування використовують всі перераховані вище ємності, крім комор. Також для транспортування ГР широко використовується трубопровідний транспорт. Резервуари займають провідне місце за зберіганням великих кількостей ГР. Саме резервуари великої місткості є найбільш складними об'єктами для пожежогасіння.

Резервуари, залежно від особливостей конструкції, підрозділяються на вертикальні, горизонтальні та кульові. За способом розташування виділяють надземні й підземні резервуари. Також резервуари бувають за умовами експлуатації стаціонарні, що переміщуються (збірно-розбірні), і транспортні (в тому числі плаваючі). Поділяють резервуари також за способом спорудження на збірно-монолітні, збірні ємності й монолітні залізобетонні.

Важливою є класифікація резервуарів за способом організації даху:

- резервуари зі стаціонарним дахом;
- резервуари зі стаціонарним дахом і понтоном;
- резервуари із плаваючим дахом.

Останні два види резервуарів забезпечують істотне зменшення втрат летких рідин за рахунок випаровування. Їх конструкція також впливає на характер розвитку пожежі й вимагає застосування іншої тактики гасіння, в порівнянні з резервуарами зі стаціонарним дахом [68].

Важливою характеристикою резервуара є його об'єм (місткість), – він вказується після скороченої назви. Через дефіс вказується його об'єм в м³. Наприклад РВС-1000 (резервуар вертикальний сталевий об'ємом – 1000 м³).

Перші в Російській імперії циліндричні сталеві резервуари були спроектовані в 1878 році В.Г. Шуховим і А.В. Барні [69]. З цих років і починається історія пожеж на резервуарах із ГР. Важкі наслідки таких пожеж визначили необхідність розробки заходів щодо безпечного поводження з ГР, за умови їх збереження в резервуарах, та методів гасіння пожеж, що виникають.

1.2.2 Стаціонарні установки пожежогасіння резервуарів

Істотним внеском у забезпечення пожежної безпеки резервуарів було впровадження стаціонарних установок пожежогасіння, в яких подача вогнегасних речовин здійснювалася через засоби подачі, розташовані у верхній частині резервуара. При цьому використовувалися порошкові, водні, газові вогнегасні речовини та вогнегасні піни. Однак у більшості випадків на початковому етапі пожежі стаціонарні засоби пожежогасіння, розташовані у верхній частині резервуара, виходили з ладу. Крім того, навіть у разі збереження працездатності цих систем пожежогасіння, відомі лише поодинокі випадки успішного гасіння порошковими, газовими або водними засобами пожежогасіння.

У той самий час результат використання вогнегасних пін за таких обставин значно частіше був позитивним. В Україні всі нормативні документи передбачають обладнання резервуарів для зберігання ГР саме системами пінного пожежогасіння, в поєднанні з охолодженням стінок резервуара водою [70].

Для того, щоб позбутися зазначеного вище недоліку розташування стаціонарних засобів пожежогасіння у верхній частині резервуара, треба було перемістити їх в нижню частину резервуара. Це привело до необхідності розробки системи подачі вогнегасних пін в нижню частину резервуара (підшаровий спосіб подачі). Однак існуючі на той час ПУ загального призначення генерували піну, яка, проходячи шар ГР, сильно забруднювалась нею, погано підіймалася на поверхню і не забезпечувала гасіння пожежі.

Подальшим удосконаленням стаціонарних систем пожежогасіння резервуарів стала подача піни на поверхню ГР за допомогою гнучкого рукава, розташованого в об'ємі рідини. Причому все протипожежне обладнання знаходилося в нижній частині резервуара. Після початку пожежі верхня частина гнучкого рукава спливала на поверхню і подавала піну.

Наступним важливим етапом вдосконалення стаціонарних установок пожежогасіння резервуарів із ГР стала подача піни на основі ПУ спеціального призначення в об'єм ГР. Ці ПУ отримали назву *плівкоутворюючих*. Вогнегасний ефект при цьому забезпечується завдяки ізолюючим властивостям водного розчину ПУ, що утворює на поверхні ГР у процесі руйнування піни тонку ізолюючу плівку. Призначення піни, в такому разі, для процесу пожежогасіння полягає в забезпеченні доставки робочого розчину на поверхню рідини.

Впровадження підшарового способу подачі піни в розвинених країнах почалося в 70-х роках минулого століття [71–75]. Необхідно відмітити, що пі-

дшаровий метод подавання піни на основі ПУ загального призначення було розроблено в СРСР ще в 60-ті роки ХХ сторіччя [76].

Трохи пізніше впровадження методу підшарової подачі пін на основі плівкоутворюючих ПУ відбувалося і на пострадянському просторі [76–79]. В наш час у державах пострадянського простору тривають роботи по вдосконаленню підшарового методу гасіння пожеж у резервуарах із ГР [80].

На об'єктах зберігання ГР України та більшості інших держав пострадянського простору для гасіння резервуарів із ГР використовують дві технології подачі повітряно-механічної піни: зверху та підшаровим шляхом. Обидва методи вимагають великої кількості вогнегасних речовин і далеко не завжди є ефективними. Причинами цього автори роботи [81] вважають такі фактори:

- значна інерційність централізованих систем пожежогасіння;
- вихід з ладу стаціонарних систем на початковому етапі пожежі;
- використання режиму ручного пуску;
- висока вартість стаціонарних систем пожежогасіння резервуарів.

Відповідно до нормативних вимог [82–83] в Україні та РФ наземні резервуари для зберігання нафти і нафтопродуктів об'ємом не менше 1000 м³ обладнують стаціонарно встановленими піногенераторами у верхньому поясі резервуара – при виборі верхнього способу подачі піни, або стаціонарними введеннями пінопроводів в нижньому поясі – при виборі підшарового способу подачі піни. Для резервуарів об'ємом 5000 м³ і більше регламентується обладнання системами автоматичного пожежогасіння.

1.2.3 Мобільні засоби пожежогасіння резервуарів

У зв'язку з частим виходом з ладу стаціонарних установок пожежогасіння доводиться до їх ліквідації залучати підрозділи з пересувними засобами пожежогасіння. Їх вдосконалення відбувалося одночасно з розвитком стаціонарних систем пожежогасіння. Для охолодження стінок резервуара, який горить, та сусідніх резервуарів, що знаходяться в зоні теплового впливу, застосовувалися лафетні стволи великої продуктивності та дальності подачі води.

Відбувався також розвиток засобів подачі піни через борт резервуара. Для отримання і подачі піни середньої кратності застосовуються піногенератори різної продуктивності від ГПС–200 до ГПС–2000. Їх недоліком є неможливість подачі піни на великі відстані. Так, піногенератор ГПС–2000М, який є найкращим за цим показником, забезпечує максимальну дальність подачі піни – 12 м [84].

Для збільшення дальності подавання застосовують механізовані пінопідйомники (Брокто-Скеєліфт 35-3, АКП–30, АКП–50) або спеціальні крани з вильотом стріли близько 50 м [85]. Великі можливості з подавання низьократної піни має відносно нова система подачі компресійної піни [86–92]. Також у ряді випадків для подавання піни низької кратності можна використовувати стаціонарні лафетні й ручні водопінні стволи (ПЛС–П–205, СВПЕ–4, СВПЕ–8, ЛСД–40А), які забезпечують подачу піни на відстань (18÷40) м.

Істотно збільшити дальність подавання піни дозволило впровадження установки комбінованого пожежогасіння (УКПГ) «Пурга». Однак спосіб по-

давання піни, що реалізується в установках зазначеного типу, призводить до істотного руйнування піни в ході її подачі [93].

1.3 Статистика пожеж резервуарів з горючими рідинами

Статистичні дані щодо пожеж у резервуарах на пострадянському просторі та їх аналіз за час, що включає останні 15–20 років, представлені в роботах [94–99]. Аналіз цих даних дозволяє зробити висновок, що близько 90 % всіх пожеж припадає на резервуари типу РВС. З них приблизно половина сталася у резервуарах з бензином. Від третини до чверті пожеж припало на нафту. Частка пожеж з більш важкими нафтопродуктами та іншими горючими рідинами (мазут, дизельне паливо і гас) за різними даними варіює від 14 до 24 %. Причому в більш, ніж 60 % випадків пожежі супроводжуються утворенням «кишень». Також, у 60 % випадків на початковому етапі пожеж у резервуарах відбувається вихід з ладу систем автоматичного пожежогасіння.

Статистика пожеж показує, що їх частота істотно залежить від пори року. Влітку кількість пожеж є більшою, ніж взимку, а пік пожеж припадає на липень. У той же час можна відзначити, що тривалість гасіння пожеж влітку менша (5,5 години), ніж взимку (8,5 години).

Незважаючи на вдосконалення заходів пожежної безпеки, кількість пожеж резервуарів за останні роки залишається практично незмінною [100]. В середньому в резервуарних парках держав пострадянського простору відбувається 12 великих пожеж на рік. З них в Україні відбувається 2 пожежі в кожні 3 роки. При цьому в 25 % випадків пожеж їх гасіння носить затяжний характер.

Значно більша статистика пожеж резервуарів з ГР існує у РФ. В табл. 1.1 наведено статистичні дані з надзвичайних ситуацій на підприємствах нафтохімічної та нафтопереробної промисловості РФ за період 2007–2016 роки [101].

Таблиця 1.1 — Статистика надзвичайних ситуацій на підприємствах нафтохімічної та нафтопереробної промисловості РФ за період 2007–2016 роки

Рік	Вид і кількість НС						Всього
	пожеж	%	вибухів	%	викидів	%	
2007	14	64	5	23	3	14	22
2008	6	46	5	38	2	15	13
2009	5	38	6	46	2	15	13
2010	4	25	9	56	3	19	16
2011	1	15	16	80	3	15	20
2012	11	100	0	0	0	0	11
2013	6	100	0	0	0	0	6
2014	9	75	3	25	0	0	12
2015	4	57	1	14	2	29	7
2016	5	83	1	17	0	0	6
Всього	65	51	46	37	15	12	126

У відкритих зарубіжних літературних джерелах містяться лише уривчасті статистичні дані про пожежі в резервуарах, що сталися в різних країнах. У зарубіжних матеріалах відзначається тенденція до підвищення пожежної небезпеки таких об'єктів зі збільшенням одиничної місткості резервуарів.

Половина усіх випадків пожеж у США сталася у резервуарах із плаваючим дахом і понтоном, оскільки їх використання у цій країні більш поширено. Ці резервуари відрізняються високою пожежною небезпекою, хоча є найбільш економічними і забезпечують найменші втрати продуктів. Деякі дані з резервуарних пожеж у розвинених країнах наведені в роботах [102–112].

В цілому можна зробити висновок, що як на пострадянському просторі, так й в найбільш економічно розвинених країнах сучасні технології гасіння пожеж у резервуарах з ГР і ЛЗР, які застосовуються, є малоефективними.

1.4 Способи гасіння пожеж у резервуарах із горючими рідинами

У літературних джерелах можна знайти інформацію про можливість гасіння ГР практично всіма існуючими на сьогодні методами і засобами пожежогасіння:

- повітряно-механічною піною;
- розпорошеною водою і водними розчинами;
- емульсіями;
- порошковими засобами;
- аерозолями;
- відкачуванням палива з резервуара;
- твердою вуглекислою;
- газами-розріджувачами;
- газоподібними інгібіторами;
- з використанням вогнеперешкоджувачів.

На думку ряду авторів [70], більшість таких методів гасіння (окрім гасіння піною) становлять скоріше теоретичний інтерес, через складність забезпечення умов згасання одночасно над всією поверхнею рідини. Однак необхідно відзначити, що всі перераховані вище методи гасіння забезпечували необхідний результат у різних конкретних випадках. Так, позитивних результатів частіше можна досягти під час гасіння осередків пожежі з малою площею горіння. У ряді випадків перераховані вище методи забезпечують гасіння лише висококиплячих або в'язких рідин.

Найкращі результати під час гасіння горючих рідин забезпечують засоби гасіння, в яких реалізується ізолюючий механізм припинення горіння. Таким засобом гасіння є повітряно-механічні піни. Вогнегасні піни дозволяють надійно створити умови згасання над всією поверхнею рідини на час достатній для охолодження нагрітих конструкцій до температури нижче температури самоспалахування. А саме виконання цих двох умов є необхідним для успішного гасіння пожеж класу «В».

1.4.1 Водопінні засоби гасіння горючих рідин

В Україні й у більшості держав пострадянського простору в нормативних документах вогнегасні піни позначаються як основний засіб гасіння ГР [84–85, 113–116]. Тільки в декількох ситуаціях нормативними документами допускається застосування вогнегасних порошків і розпорошеної води.

Для отримання вогнегасних пін використовуються робочі розчини піноутворювачів. За умовами зберігання піни відносяться до рідкофазних сполук (вода з добавками піноутворювача), за умовами застосування вони є двофазними системами. *Піна* – висококонцентрована дисперсна система, що складається з газоподібної дисперсної фази і рідкого дисперсійного середовища [4, 117–118]. Для піни є характерною комірково-плівкова структура, в якій заповнені газом осередки розподілені тонкими рідкими плівками. Піни є ліофобними дисперсними системами, тобто вони є термодинамічно нестійкими системами. До руйнування пін призводять три основних процеси: зменшення товщини плівок із часом, дифузійне перенесення газу з малих комірок у великі та стікання дисперсійного середовища під дією сили тяжіння. Необхідною умовою утворення піни є наявність у воді поверхнево-активних речовин (ПАР): вони зменшують енергію, потрібну для утворення нових поверхонь розподілу, і частково збільшують стійкість плівок.

На сьогодні в переважній більшості випадків як газонаповнювач пін використовується повітря. Такі піни називають *повітряно-пінними системами*. Використання замість повітря інших газів, що не підтримують горіння, призводить лише до незначного збільшення вогнегасних характеристик піни [116, 118]. Одночасно з цим помітно ускладнюється процес отримання таких пін і в цілому збільшується вартість пінних засобів пожежогасіння.

Важливою характеристикою пін, яка визначає їх вогнегасні властивості та особливості подачі, є *кратність піни*. Розрізняють піни низької, середньої та високої кратності. Піни низької та середньої кратності можна застосовувати під час гасіння ГР шляхом їх подачі на горизонтальні поверхні. Піни високої кратності легко відносяться висхідними конвекційними потоками, тому не використовуються для гасіння рідин.

Залежно від типу ПАР, що застосовується під час гасіння пожеж, розрізняють катіонні, аніонні та неіонні піноутворювачі [119]. За нашого часу переважно використовуються аніонні піноутворювачі. Піноутворювачі (ПУ), згідно ДСТУ 3789-98, поділяють на піноутворювачі *загального і спеціального призначення* [119]. Характеристики піноутворювачів і особливості їх використання для утворення пін з метою пожежогасіння наведені в публікаціях [4, 119].

В наш час переважає точка зору, що домінуючим механізмом вогнегасної дії пін є ізоляція пари горючої рідини від зони горіння [3, 4, 6, 66]. Наявність піни на поверхні рідини істотно сповільнює швидкість надходження пари рідини в зону горіння. Крім того, піна екранує поверхню, яка горить, від зовнішнього теплового потоку (теплова ізоляція), що уповільнює прогрів по-

верхневих шарів горючих речовин. Охолоджуючу і розбавлюючу дію пін зазвичай розглядають як додаткові механізми припинення горіння.

З цією точкою зору не згоден Абдурагімов І.М. [120]. На його думку під час гасіння пожеж горючих рідин за допомогою повітряно-механічних пін головним механізмом припинення процесу горіння є зовсім не «ізоляція», а процес охолодження поверхневого шару ГР від температури її кипіння 120–250°C до температури спалаху (50–60°C) або навіть трохи нижче. Частково з цією точкою зору можна погодитися у випадку гасіння висококиплячих ГР, але стосовно ЛЗР така думка є малоприйнятною, оскільки температура спалаху бензину може становити до мінус 40 °С.

Тривалий час як ПУ використовувалися композиції, які класифікують як піноутворювачі загального призначення. Великий досвід їх застосування виявив істотні недоліки. За твердженням автора роботи [70], не відомо жодного випадку, коли використання ПУ загального призначення, за умови використання старих стаціонарних систем протипожежного захисту, змогло забезпечити гасіння пожеж ГР і ЛЗР. В реальності пожежі гасили з використанням пересувної пожежної техніки. Такі пожежі мали затяжний характер і нерідко закінчувалися після повного вигорання палива в резервуарі. Аналогічні висновки зроблені в роботі [121–122] під час аналізу пожеж на нафтопереробних підприємствах. Докладний аналіз використання вогнегасних пін можна знайти в роботах [3, 4, 6]. В роботі [6] дійшли висновку, що піни середньої кратності, отримані з ПУ загального призначення, в більшості випадків не забезпечують гасіння резервуарів об'ємом понад 5000 м³.

Однією з основних причин низької ефективності стаціонарних систем пінного пожежогасіння з використанням ПУ загального призначення є застосування верхнього способу подачі піни в резервуар із використанням пінокамер та інших пінозливних систем [4]. Перехід на підшаровий спосіб подачі піни для цього виду ПУ є недоцільним, у зв'язку із забрудненням та емульгуванням піни паливом під час її спливання через шар рідини. Це вимагає для гасіння резервуарів із паливом використовувати верхній спосіб подачі із залученням пересувної техніки, що істотно збільшує час початку гасіння. Чим більше тривалість горіння палива, тим вище температура й більшою є товщина гомотермічного шару і тим інтенсивніше відбувається руйнування піни при контакті з ГР, а також зростає ризик спінювання або викиду.

Однак існуючі методи гасіння пожеж за допомогою вогнегасних пін мають ряд недоліків. Одним із недоліків пінного пожежогасіння є великі капітальні витрати на створення стаціонарних систем пожежогасіння, установка яких є обов'язковою для резервуарів місткістю понад 1000 м³.

Оскільки піни мають дуже низьку густину, виникають проблеми з її подачею на великі відстані. Причому збільшення швидкості пінного струменя одночасно зі збільшенням дальності її подачі призводить до більшого руйнування піни. Низька густина пін призводить також до відхилення пінних струменів конвекційними потоками продуктів горіння. Частково цю проблему дозволило вирішити впровадження установок комбінованого пожежогасіння

УКПГ «Пурга». Однак забезпечити відсутність руйнування пін за такого засобу подачі повністю не вдалося [122]. Крім того, піни помітно руйнуються при зіткненні з поверхнею рідини (жорстка подача). Їх руйнування зменшується при плавному стіканні піни на поверхню рідини по стінках резервуара («м'яка» подача). У зв'язку з тим, що існуючі в наш час технічні засоби подачі повітряно-механічної піни через борти резервуара виключають можливість «м'якої» подачі піни, об'єм піни із зазначених вище причин істотно зменшується. Одночасно можна відзначити, що кількісних визначень зменшення об'єму піни в результаті її подачі та механічної взаємодії з поверхнею рідин поки що не було визначено.

Практика гасіння пінами показує, що найбільш важко припинити горіння ГР в області біля стінок резервуара. Це зумовлено двома основними причинами – посиленням руйнування піни під термічною дією розігрітих стінок і тим, що нагріта стінка резервуара служить джерелом займання пари горючої рідини. Усунути ці фактори можна охолодженням стінок резервуара. На підставі підходів, розглянутих у роботах [123–125], отримано рівняння для температури нагрітої стінки після охолодження її піною:

$$T = T_n + \frac{\alpha\sqrt{bat}(T_n T_0)}{\alpha\sqrt{bat} + 2\lambda} \left(1 + \frac{x}{\sqrt{bat}}\right)^2, \quad (1.6)$$

де T_0 – температура навколишнього середовища; T_n – початкова температура вільного борту; λ і α – коефіцієнти теплопровідності й тепловіддачі; x – просторова координата; a – температуропровідність горючої рідини; t – час.

За нашого часу розроблена і впроваджується технологія гасіння пожеж за допомогою «компресійної» піни, яку можна застосовувати для гасіння ГР [87–92]. Ця технологія дозволяє вирішити проблему подачі піни на великі відстані. У РФ система подачі компресійної піни отримала назву NATISK [86]. Роботи за цією системою розпочато і в Україні [126]. Однак ряд характеристик компресійних пін на даний час ще не визначено, що не дозволяє її впроваджувати у практику пожежогасіння.

Також не впроваджено у практику давню розробку систем, що спінюються в осередку пожежі [127–128], яка дозволяла збільшити дальність подачі піни. Недоліком цієї системи є те, що композиція спінюється тільки на нагрітих поверхнях. Під час гасіння ЛЗР, що мають низьку температуру поверхні, системи, що спінюються в осередку пожежі, не утворюють піну і відразу тонуть.

Для усунення зазначеного вище недоліку систем, що спінюються в осередку пожежі, були запропоновані піноутворюючі сполуки із зовнішнім піноутворенням (ПУС) [129–132]. Вони являють собою бінарні вогнегасні засоби, які включають дві окремі ємності, в яких зберігаються рідкі компоненти (ПУС). Ці компоненти роздільно-одночасно подаються в розпиленому вигляді у вогнище пожежі. У разі потрапляння на рідкі поверхні частина дрібних крапель не тоне, а встигає змішатися. Склад розчинів підібраний таким чином,

щоб при їх взаємодії виділявся газ. У разі наявності в рідинах піноутворювача в такому випадку утворюється піна. Можлива також подача компонентів ПУС в компактному вигляді на дно резервуара, де у процесі змішування утворюється піна, яка поступово піднімається вгору через шар ГР. В останньому випадку запропонована система виконує функції підшарової подачі піни.

ПУС показала свою працездатність під час гасіння ряду ГР, в тому числі бензину, гасу і дизельного палива. Використання ПУС для гасіння ГР дозволяє використовувати більш прості та продуктивні засоби подавання, ніж у випадку подавання готової піни. Однак ця система дозволяє отримувати тільки піну низької кратності (10–20), а стійкість піни в більшості випадків не перевищує 15 хв. За нашого часу дослідження у цьому напрямі тривають.

Одним із суттєвих недоліків пін взагалі є їх мала стійкість по відношенню до теплового впливу і контакту з полярними рідинами. До недоліку ж вогнегасних пін можна віднести обмежені можливості розтікання піни на великі відстані. Це призводить до необхідності подачі великого надлишку піни на невелику площу дзеркала рідини, що горить [121].

Всі перераховані вище фактори призводять до збільшення витрат вогнегасних пін під час гасіння пожеж класу «В». Незважаючи на всі недоліки пін, вони за загальним визнанням, є найбільш ефективними засобами гасіння ГР. І хоча піни в більшості розвинених країн застосовуються тільки в (5–10) % випадків гасіння від загального числа пожеж, частка їх використання для гасіння ГР є близькою до 100 % [4].

Одним з негативних моментів у пінному пожежогасінні є використання екологічно небезпечних речовин – піноутворювачів. До складу піноутворювачів входять *поверхнево-активні речовини* (ПАР). Токсичності та екологічній небезпеці ПАР присвячена велика кількість наукових досліджень [7–12].

ПАР утворюють комбінований негативний вплив на організм людини. Зокрема зазначається що:

- у разі потрапляння в організм людини, ПАР накопичуються на клітинних мембранах, покриваючи їх поверхню тонким шаром, і за певної концентрації здатні викликати порушення найважливіших біохімічних процесів, що протікають у них, порушити функцію клітини і саму її цілісність;
- стимулюють резорбцію речовин у шлунково-кишковому тракті;
- підвищують вміст холестерину в крові;
- змінюють екскреторну функцію печінки;
- змінюють водний і електролітний баланси організму;
- порушують біоенергетику і окисно-відновні процеси в організмі;
- створюють реальні передумови посилення токсичної дії суміші речовин навіть у тих випадках, коли ці речовини надходять в організм у недіючих дозах;
- ступінь негативного впливу ПАР залежить від швидкості їх біорозкладання (біодеградації) під дією мікроорганізмів.

До вогнегасних речовин висуваються вимоги за токсичністю – 3–4-й клас безпеки, а до органічних і за біорозкладанням – вони повинні бути “біологічно м’якими”. Довгий час вважалося, що ПАР, які використовуються

в якості компонентів піноутворювачів, відповідають цим вимогам. Однак у зв'язку з залученням великої кількості розчинів піноутворювачів на гасіння палаючих резервуарів (десятки тонн) і попадання їх в навколишнє середовище можливо перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) їх в повітрі і в ґрунтових водах.

Застосування ж більш екологічно безпечних ПАР в складі піноутворювачів (протеїнових рослинного та тваринного походження) призводить до погіршення їх вогнегасних характеристик. Мабуть через це запропоновані екологічно безпечні піноутворювачі на основі екстрактів хмелю [16] не викликали інтересу в дослідників і практиків пожежогасіння.

В деякій мірі проблему малої стійкості вогнегасних повітряно-механічних пін та їх низьких ізолюючих властивостей вирішує застосування низькократних пін на основі плівкоутворюючих фторовмісних піноутворювачів [4]. У разі використання таких ПУ гасіння відбувається в основному за рахунок ізоляції поверхні ГР тонкою плівкою водного розчину плівкоутворюючого піноутворювача. Така плівка, незважаючи на більшу густину, ніж у ГР, за рахунок дуже низького поверхневого натягу набуває здатності утримуватися на поверхні рідини.

Американські пожежні для гасіння РВС різної місткості часто використовують навісні струмені на основі фторовмісних піноутворювачів і не охолоджують стінки резервуара. При цьому вогнегасні речовини подають на задню стінку з величезними витратами (більш, ніж 350 л/с), поступово просуваючись до передньої стінки [133]. Також наголошується, що позитивний результат може забезпечити одночасна подача таких пін на поверхню рідини та в її шар.

Впровадження плівкоутворюючих піноутворювачів істотно підвищило ефективність пожежогасіння резервуарів із ГР. З'явилися твердження, що використання традиційних ПУ в переважній більшості випадків не може забезпечити гасіння пожеж у резервуарах великої місткості [6].

Однак практика пожежогасіння резервуарів з вуглеводневими паливами показала, що далеко не завжди використання плівкоутворюючих ПУ дає позитивний результат у разі повного виконання всіх нормативних вимог. Автори роботи [134] роблять висновок, що відповідні нормативні вимоги не досить добре опрацьовані й вимагають уточнень. Крім того, наголошується, що суттєвими недоліками плівкоутворюючих піноутворювачів є їх висока вартість, екологічна небезпека і токсичність продуктів термодеструкції.

Однак в цілому можна констатувати, що ПУ спеціального призначення (особливо перфторовані) мають істотні переваги, в порівнянні з ПУ загального призначення, під час гасіння ГР у резервуарах [135–137]. Піна, отримана з їх використанням, може подаватися знизу через шар рідини з використанням напірних піногенераторів із розводкою трубопроводів у нижній частині резервуара. Такий спосіб подачі піни має низку переваг. Устаткування для подачі піни є стійким до ушкоджень від первинного вибуху пароповітряної суміші. Крім того, за рахунок перемішування нижніх шарів рідини з верхніми відбувається охолодження її поверхні. Низькократна піна поступово руйнується й

утворює тонку ізолюючу плівку, стабільність якої зберігається кілька годин [63]. В роботі [138] було встановлено, що за однакових умов подачі за вогнегасною ефективністю піноутворювачі, що містять перфторовані ПАР, багаторазово перевершують вуглеводневі ПУ. Перфторовані піноутворювачі також мають більший час зберігання, ніж безфторні.

В роботі [139] встановлено, що підшаровий спосіб подавання піни, отриманої на основі плівкоутворюючих ПУ, на (25÷30) % ефективніше подачі піни зверху на поверхню ГР. У США практикується подача піни на основі плівкоутворюючих ПУ одночасно на поверхню ГР і підшарово [140]. В цілому можна зробити висновок, що в наш час відбувається перехід у гасінні пожеж ГР на плівкоутворюючі ПУ.

У міру використання плівкоутворюючих ПУ були виявлені деякі недоліки методу підшарового гасіння за допомогою фторованих ПУ:

- підшаровий спосіб гасіння є неефективним під час гасіння в'язких нафтопродуктів, через великий час спливання піни [141];
- піни на основі плівкоутворюючих ПАР мають невисоку стійкість у полярних органічних рідинах і в сумішевих автомобільних паливах [66];
- нормативні документи не враховують ряду факторів, які знижують ефективність підшарового способу гасіння під час гасіння полум'я нафтопродуктів [133, 141].

Найбільшим недоліком пінної системи гасіння пожеж і, зокрема, підшарового способу подачі низькократної піни є її висока вартість [142]. Низькі економічні показники підшарового способу подачі піни на основі перфторованих ПАР зумовлені як високою вартістю самих піноутворювачів, так і великими витратами на установку засобів, що забезпечують підшарове пожежогасіння [143]. У розрахунку на один резервуар середнього розміру такі витрати в РФ становили в 2010 році понад 5,2 млн карбованців (за курсом 2010 року ~ 170000 доларів).

У разі якщо резервуари не обладнані стаціонарними засобами подачі піни, розроблено пристрої для оперативного врізання в технологічні комунікації резервуарів [144–145]. Врізання в технологічні комунікації проводиться безпосередньо у разі виникнення займання резервуара. Авторами були розроблені універсальні пристрої для реалізації оперативного врізання та проведені полігонні випробування запропонованого засобу гасіння пожежі у вертикальному сталевому резервуарі.

Особливо необхідно відзначити перегляд останнім часом екологічних та токсикологічних характеристик плівкоутворюючих ПУ. Раніше за заявами фірм, що постачають такі піноутворювачі на ринки України, РФ, Азербайджану та Білорусі, декларували їх як нетоксичні та «біологічно м'які». Однак проведені у РФ дослідження цих піноутворювачів поставили під сумнів ці заяви. Так, за даними роботи [13], фторсинтетичні піноутворювачі виявилися у 150 разів більш токсичними «біологічно жорсткого» піноутворювача ПО-6К і в 2500 разів більш стійкими до біодеградації у навколишньому середовищі. Відзначається також, що поверхнево-активні компоненти цих піноутворювачів

чів – перфтороктансульфо кислоти – легко акумулюються в жирових тканинах і серозних оболонках тварин і людини [146–149].

Непрямим підтвердженням екологічної небезпеки таких піноутворювачів стало рішення агенції з охорони навколишнього середовища США оголосити програму добровільного вилучення з обігу таких речовин. Одночасно фірма “3М”, що випускає плівкоутворюючі ПУ, добровільно відмовилася від їх випуску. На підставі цих фактів робиться висновок [150], що використання перфторованих ПАР для цілей пожежогасіння є можливим лише на об’єктах, що дозволяють проводити збір і утилізацію речовин, що використовуються під час пожежогасіння. Ще одним фактором екологічної небезпеки перфторованих ПАР є утворення при термодеструкції фторовмісних речовин високо-токсичних фтороводню і фтору.

Одночасно з цим необхідно відзначити, що недавно проведені експериментальні дослідження традиційних синтетичних безфторних піноутворювачів показали, що раніше встановлені деякі характеристики їх токсичності та екологічної безпеки сильно занижені. У роботі, не відкидаючи факту токсичності піноутворювачів, що містять фторовані ПАР, стверджується, що ще більшу токсичність проявляють піноутворювачі, які не містять фтору. З урахуванням відомого факту низької ефективності традиційних піноутворювачів під час гасіння горючих рідин у резервуарах [3, 4, 6], можна зробити висновок, що існуючі піноутворювачі у значній мірі не задовольняють висунутим до них вимогам за ефективністю, економічними та екологічними показниками.

Ще один недолік водопінних засобів пожежогасіння було виявлено у зв’язку із впровадженням нових спиртовмісних палив. Піни, отримані як із використанням традиційних, так і плівкоутворюючих ПУ, виявилися нестійкими по відношенню до спиртовмісних «євро палив». Так, встановлено, що при 5 % вмісту спирту у вуглеводневому паливі в 2–3 рази зменшується швидкість розтікання водної плівки на поверхні, а при 10 % вмісту спирту в паливі плівкоутворювальна дія таких пін повністю припиняється [151].

Однак детальне дослідження процесу взаємодії пін з горючими [152] дозволило встановити, що на початкових стадіях подачі піни, що генерується з робочих розчинів піноутворювачів, призначених для гасіння неполярних горючих рідин, на поверхню палаючого бензину з полярними добавками, відбувається її інтенсивне руйнування. Через деякий час руйнування піни сповільнюється і характер взаємодії піни з паливом не відрізняється від випадків гасіння неполярних горючих рідин.

Для гасіння полярних горючих рідин спеціально розроблені піноутворювачі, до складу яких входять полісахариди, що забезпечують утворення суцільної ізолюючої плівки на поверхні полярних рідин. Однак у літературі відсутні дані щодо їх характеристик і застосування під час гасіння пожеж в Україні та інших державах пострадянського простору.

Істотним розвитком методу пінного пожежогасіння є розробка вогнегасних пін, що тверднуть [153]. У цьому методі поєднується процес спінювання і

гелеутворення, в результаті чого протягом часу від 2 секунд до 2 хвилин відбувається твердіння піни. За ствердженнями авторів розробки, утворюється стійка тверда піна, яка при тепловій дії набирає міцність і перетворюється в піно-керамічний матеріал. Це, у свою чергу, дозволяє використовувати твердіючу піну як вогнегасний засіб, в тому числі і для гасіння пожеж класу «В». Одночасно відзначається, що висушений шар твердої піни руйнується під час всмоктування води. Впровадження запропонованого способу гасіння, мабуть, дозволить вирішити проблему низької стійкості пін. В наш час відбувається впровадження цього вогнегасного засобу в практику пожежогасіння.

Загальним висновком щодо використання пін для гасіння пожеж резервуарів з ГР є невисока ефективність існуючих засобів пінного пожежогасіння. Це підтверджується значною кількістю пожеж, які, незважаючи на велику кількість задіяних сил та засобів, не було погашено. Так, пожежа в 2015 році на нафтобазі у Васильківському районі тривала 8 днів (рис. 1.1). До ліквідації пожежі було залучено близько 300 рятувальників та 45 одиниць техніки. Внаслідок пожежі на нафтобазі загинуло шестеро осіб, із них четверо – пожежники; принаймні 18 осіб було травмовано. Витрати на гасіння пожежі оцінили у 50 мільйонів гривень [154–155].

Використання плівкоутворюючих ПУ, які утворюють більш стійку по відношенню до полярних ГР піну, так само часто не забезпечує гасіння пожеж класу «В». Так, 17 вересня 2012 року в місті Сумгаїт Республіки Азербайджан в резервуарному парку зберігання мазуту ВАТ «Азербайджанські побутові товари» сталася пожежа [156]. За кілька годин безуспішних дій підрозділів пожежної охорони з локалізації пожежі площа горіння досягла 1500 м². Вогнем були охоплені 10 резервуарів об'ємом в 400, 200, 100 і 50 м³. Причиною зриву пінних атак стала наявність у резервуарах із мазутом ПАР, які не були повністю видалені з резервуарів, в зв'язку з перепрофілюванням об'єкта.



Рис. 1.1 – Пожежа на нафтобазі БРСМ у Васильківському районі

Відповідно до опису пожежі подана на дзеркало горючої рідини піна, що утворилась з робочого розчину плівкоутворюючого піноутворювача марки «АFFF», швидко руйнувалась. Для ліквідації пожежі за підвищеним номером виклику № 4 була залучена пожежна техніка із сусідніх міст, було залучено з числа особового складу підрозділів пожежної охорони 180 осіб, 45 одиниць пожежної техніки, в тому числі два пожежних вертольоти. На гасіння пожежі було задіяно 2 одиниці «Пурга-60», 5 одиниць «Пурга-40», одну одиницю «Пурга-120», 2 стволи піни середньої кратності, 4 ствола ГПС-600, 9 лафетних стволів; 2 стволи повітряно-пінних, 13 стволів «А». Витрачений час на гасіння цієї пожежі перевищив 30 годин.

1.4.2 Гасіння горючих рідин водою і водними розчинами

Вода до цього часу є найбільш поширеним засобом пожежогасіння пожеж класу «А». Тривалий час вважалося, що вода абсолютно не придатна для гасіння ГР. Після вдосконалення засобів подачі води в розпиленому стані з'явилась можливість гасити багато пожеж класу «В» і водою. Різним аспектам гасіння таких пожеж присвячено велику кількість робіт, серед яких можна виділити [157–179].

У ряді робіт на підставі моделювання гасіння ГР розпорошеною водою розраховано параметри гасіння пожеж класу «В» [178]. На підставі аналізу експериментальних даних і моделювання процесу гасіння ГР можна зробити наступні висновки:

- гасіння полум'я ЛЗР зумовлене не охолоджуючою дією води на поверхню палаючого палива, а випаровуванням крапель води в полум'ї, що призводить до охолодження зони горіння і розведення парів ЛЗР водяною парою;
- краплі розпорошеної води розміром більше ($100 \div 300$) мкм не приводять до помітного охолодження зони горіння, а охолоджують тільки верхній шар рідини, який горить, що може забезпечити припинення горіння висококиплячих рідин.

Незважаючи на принципову можливість гасіння ГР водою, її екологічну безпеку і низьку вартість, вода в наш час практично не застосовується під час гасіння великих резервуарів з ГР. Це пов'язано з тим, що для успішного гасіння великих за площею поверхонь ГР необхідно створити умови згасання полум'я над всією поверхнею рідини. Ці умови повинні бути створені на час, протягом якого нагріті стінки резервуара будуть охолоджені до температури нижче температури самоспалахування ГР або поверхневий шар рідини охолоджений до температури нижче її температури спалаху.

Стаціонарно встановлені у верхній частині резервуара розпилювачі в більшості випадків не в змозі вирішити таке завдання, оскільки вони часто виходять з ладу, за відсутності постійного обслуговування або під час вибуху пароповітряної суміші з якої, як правило, починається пожежа. Пересувні установки пожежогасіння розпорошеною водою, в наш час, не пристосовані для таких цілей.

Значно більшою вогнегасною здатністю під час гасіння пожеж класу «В», ніж вода, мають водні розчини різних речовин. Це, в основному, розчини

піноутворювачів і різних солей. У довіднику керівника гасіння пожежі [115] наведено дані з відносної вогнегасної ефективності більше 50 водних розчинів. Цей показник змінюється від 1,4 до 4,5. Концентрація розчинених у воді речовин змінюється від часток відсотка до 25 %. В цілому аналіз цих даних вказує на збільшення вогнегасних властивостей розчинів зі зростанням концентрації розчиненої речовини. Серед наведених речовин зустрічаються токсичні, екологічно небезпечні та дорогі ($K_2Fe(CN)_6$, KJ, KBr, $KMnO_4$, $K_2Cr_2O_7$, фторосинтетичні ПУ). Крім цих недоліків водних розчинів, їм властиві і всі вищенаведені недоліки чистої води.

В роботі [180] експериментально встановлено, що 1%-водний розчин рідкого натрієвого скла в 1,96 раз більш ефективний, ніж вода під час гасіння модельного вогнища пожежі класу «В», при використанні в якості ГР нефрасу. Автори дослідження пояснюють це наявністю в розчині солей натрію.

В роботі [181] наведено результати експериментів з гасіння нафтопродуктів за допомогою водних композицій. Були досліджені вогнегасні характеристики розпорошеної води, модифікованої впливом змінного частотномодульованого потенціалу, добавками вуглецевих нанотрубок і гелеутворюючих компонентів. Автори вказують на (5–10)-кратне збільшення вогнегасних характеристик води у разі комплексної дії на неї зазначеними способами.

1.4.3 Гасіння пожеж горючих рідин вогнегасними порошками

Згідно з даними [84–85] для гасіння проток в обвалуванні, міжсвайному просторі під резервуарами, локальних вогнищ горіння на засувках, фланцевих з'єднаннях, у зазорі між стінками резервуара і плаваючим дахом допускається застосування ВП з інтенсивністю подачі для нафти і нафтопродуктів $0,3 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$. Проте наголошується, що для запобігання повторному займанню доцільно потім використовувати піну. Порошок також допускається до використання для гасіння ГР у ряді нормативних документів України. Оскільки порошки мають невисоку охолоджуючу здатність, то вони можуть добре проявити себе на початковому етапі пожежі, коли не встигають нагрітися огорожувальні конструкції. Другою умовою успішного застосування вогнегасних порошків є невелика площа поверхні рідини.

1.4.4 Гасіння горючих рідин вогнегасними аерозолями

Питання використання аерозолеутворюючих систем (АУС) для гасіння пожеж класу «В» почало розглядатися відразу після появи цього засобу пожежогасіння. Однак до цього часу ні в жодному нормативному документі не наведено рекомендацій з гасіння ГР за їх використанням.

В роботі [182] проведено розрахунок критичної інтенсивності подачі аерозолю під час гасіння горючих рідин. У патенті [183] для гасіння ГР і ЛЗР запропоновано використовувати генератори аерозолю, які кріпляться до даху резервуара і у випадку початку горіння рідини падають на її поверхню. Генератор аерозолю виготовляється у вигляді піношашок з щільністю не більше $800 \text{ кг}/\text{м}^3$, що забезпечує їм плавучість у ГР. В результаті нагрівання під дією полум'я па-

лаючої рідини, вони спалахують і генерують аерозоль, який пригнічує реакції в полум'ї і гасить полум'я пожежі за рахунок ефекту інгібування.

Вогнегасні аерозолі, у порівнянні з вогнегасними порошками, мають перевагу за рахунок їх більшої інгібуючої дії. Але їм притаманні недоліки вогнегасних порошоків, у першу чергу – це невелика охолоджуюча дія.

1.4.5 Гасіння горючих рідин газами

У газовому пожежогасінні, в основному, реалізується ефект розведення газового горючого середовища. До вогнегасних речовин, що діють переважно за рахунок розведення газового горючого середовища, відносять тільки гази або пари, які не виявляють суттєвої інгібуючої дії на процес горіння. До них відносять: азот, вуглекислий газ, водяну пару, інерген (азот – 52 об. %, аргон – 40 об. %, вуглекислий газ – 8 об. %), гелій і гексафторид сірки (елегаз). Перші два гази екологічно безпечні й легкодоступні. Тому, в основному, вони використовуються для гасіння горючих рідин, що знаходяться в резервуарах. Вважається, що однією з істотних переваг газоподібних ВР є те, що у разі їх використання не забруднюється ГР, що зберігається в резервуарі. Перевагами вуглекислого газу перед азотом є те, що великі кількості CO_2 легше зберігати (за звичайної температури при підвищенні тиску він переходить у рідкий стан), і він проявляє значно більшу охолоджуючу дію, ніж азот. Пропонувалися два способи отримання CO_2 : нижній – в шар ГР і верхній. Передбачається, що у разі нижнього способу подачі газу він забезпечує перемішування нижніх холодних шарів рідини з верхніми – нагрітими. Однак, в наш час, зупинилися на верхньому способі подачі.

В роботі [184] для гасіння дизельного палива використовувалися автоматичні установки газового пожежогасіння (АУГП) за допомогою CO_2 , що зберігається в модулях ізотермічних для рідкого вуглекислого газу (МІРВ). Випробування були проведені на резервуарах РВС-2000 і РВС-5000 ($S = 176 \text{ м}^2$ і 408 м^2).

За результатами натурних експериментів авторами були зроблені наступні висновки: можлива ліквідація пожежі в резервуарах на початковій стадії її розвитку АУГП на базі МІРВ; вогнегасна концентрація (маса, віднесена до одиниці площі) CO_2 становить 13 кг/м^2 ; зі зміною площі дзеркала горючих рідин вогнегасна концентрація не змінюється.

Різним аспектам гасіння пожежі ГР за допомогою CO_2 присвячено ряд робіт [185–192]. У деяких з них відзначається висока охолоджуюча дія CO_2 . Це пояснюється тим, що при виході з насадки CO_2 охолоджується до мінус $50 \text{ }^\circ\text{C}$, що забезпечує ефективне охолодження не тільки поверхні ГР, а і стінок резервуара. Недоліком МІРВ є необхідність його постійного охолодження за допомогою холодильного агрегату та необхідність мати розгалужену мережу трубопроводів у резервуарному парку. Крім цього, звертає на себе увагу, що всі натурні експерименти з гасіння ГР проводилися на висококиплячих рідинах.

В роботі [193] встановлено придатність газових вогнегасних речовин для гасіння біодизельного палива та його сумішей з дизельним паливом. У настанові з гасіння пожеж у РФ відзначається, що в окремих випадках під час гасіння пожеж у замкненому просторі резервуара можна використовувати во-

дяду пару або інертні гази в комбінації з охолоджуючими засобами гасіння. Раніш розрекламований елегаз (SF_6) через високу вартість і токсичність продуктів термодеструкції (F_2 , HF , SO_2) не знайшов помітного застосування для гасіння пожеж класу «В» [194].

1.4.6 Використання газоподібних інгібіторів горіння для гасіння горючих рідин

Домінуючим механізмом вогнегасної дії газоподібних інгібіторів горіння є гальмування реакцій горіння в газовій фазі. Однак вони проявляють низькі охолоджуючі та ізолюючі властивості, які є визначальними під час гасіння ГР і ЛЗР. У літературі є мало даних з використання газоподібних інгібіторів для гасіння ГР і ЛЗР в резервуарах. Відзначається тільки, що газове пожежогасіння є малоефективним на відкритому просторі. Також відзначається екологічна небезпека фторовмісних сполук [194]. Найбільш ефективні інгібітори горіння потрапили під дію Монреальського протоколу, що обмежує їх використання [195–196].

При цьому необхідно врахувати, що токсичність ВР визначається не тільки токсичністю самої речовини, а і продуктів її розкладання в умовах пожежі. Так при контакті з відкритим полум'ям і розігрітими поверхнями резервуара можливе утворення високотоксичних речовин – фтороводню, діфторфосгену, молекулярного фтору [197–199]. Ще одним істотним недоліком газоподібних інгібіторів горіння є їх висока вартість і великі витрати на встановлення обладнання для подачі ВР.

В роботі [193] проведено оцінку придатності ряду газових вогнегасних речовин класу інгібіторів горіння для гасіння дизельного палива. Експериментально визначено мінімальні вогнегасні концентрації досліджених газових вогнегасних речовин, при яких досягається гасіння. Однак як у цій, так і в інших роботах [200] експерименти проводилися на модельних вогнищах малих розмірів, і ефект масштабування абсолютно не розглядався. Цей же недолік характерний і для робіт з моделювання гасіння горючих рідин хладонами [201].

На підставі аналізу літературних даних можна зробити висновок, що газоподібні інгібітори горіння не можуть бути універсальними ефективними ВР під час гасіння пожеж у резервуарах з ГР і ЛЗР.

1.4.7 Використання інших вогнегасних засобів для гасіння горючих рідин

До цієї групи ВР відносяться такі, які були запропоновані раніше, але до цього часу з різних причин не набули поширення. Сюди також можна віднести ряд нових вогнегасних засобів, що знаходяться на стадії розробки або практичного впровадження.

Тверда гранульована вуглекислота

Окрім газоподібного вуглекислого газу, для гасіння ГР пропонується використовувати тверду гранульовану вуглекислоту [202]. Твердий діоксид вуглецю в подрібненому вигляді подається під шар горючої рідини компактними порціями, причому діаметр гранул становить (3÷4) см. Завдяки інте-

нсивному процесу сублімації за температури мінус 57 °С виділяються бульбашки газоподібного вуглекислого газу, які піднімаються до поверхні рідини. При спливанні бульбашки перемішують рідину, що дозволяє охолодити поверхневий шар вуглеводневих рідин. Це забезпечує можливість охолодження ГР до температур, нижчих за температуру спалаху. Крім охолоджуючої дії, подібне використання твердого CO₂ задіює і механізм розбавлення газового горючого середовища. У зв'язку з тим, що холодна газоподібна вуглекислота має густину значно більшу, ніж повітря (в 1,5–2 рази), ефект розбавлення газового горючого середовища в найбільшій мірі проявляється поблизу поверхні ГР. Недоліком такого методу гасіння є необхідність постійної тривалої підтримки низької температури в ємностях, в яких зберігаються гранули твердої вуглекислоти.

Інший спосіб забезпечити об'єкт твердою вуглекислотою – це отримання її за звичайних температур з рідкої вуглекислоти, що зберігається за високого тиску. Однак, в такому випадку, на початковому етапі тверда вуглекислота виходить у пухкому вигляді, й потрібні додаткові стадії пресування та дроблення вуглекислоти, що значно ускладнює процес її отримання.

У більш пізніх роботах [203] було проведено моделювання процесу гасіння пожеж нафтопродуктів і полярних рідин гранульованим діоксидом вуглецю, сконструйовано установку для реалізації цього способу гасіння й наведено відповідні експериментальні результати. На підставі цих досліджень було встановлено, що такий метод гасіння має перевагу перед гасінням піною в економічному та екологічному плані. Особливо наголошується, що діоксид вуглецю не забруднює горючі рідини та їх можна в подальшому використовувати за призначенням.

Пустотілі тіла

У 1987 році було запропоновано для гасіння пожеж горючих рідин використовувати пустотілі тіла [204] з негорючого матеріалу, що мають всередині дві окремі порожнини, які пропонується заповнити різними вогнегасними сполуками, одна з яких – рідкий низькокиплячий інгібітор процесу горіння. Порожнини заповнюються крізь спеціальні отвори та герметизуються легкоплавкими заглушками. Розміри порожнин і кількість ВР у них підбирається так, щоб вся конструкція плавала на поверхні ГР. При подачі пустотілої конструкції в палаючу рідину заглушки плавляться і під тиском пари ВР, що утворилася в порожнинах, виходять назовні, забезпечуючи гасіння горючої рідини.

Надалі запропонований метод не набув поширення. Це пов'язано зі складністю конструкції, застосуванням в запропонованому вогнегасному засобі озоноруйнуючих інгібіторів горіння, неможливістю забезпечити одночасний вихід ВР із порожнин. Тіла, що знаходяться на різній глибині шару, прогріваються по-різному, що не забезпечує одночасного плавлення заглушок.

Відкачування ГР з палаючих резервуарів

Шляхом відкачування ГР з палаючих резервуарів вдається скоротити час вигорання рідини і полегшити процес гасіння. Незважаючи на те, що для відкачування не потрібне додаткове спеціальне обладнання, цей метод застосовується рідко. Так, в роботах [205, 206] відзначаються тільки два випадки

успішного застосування цього прийому. Це, мабуть, пов'язано з недостатньою базою для застосування такого методу. Авторами цих робіт сформульовані умови застосування такого підходу. У разі виникнення пожеж у резервуарних парках для успішного гасіння пожеж у палаючих вертикальних сталевих резервуарах типу РВС, РВСП, або РВСПК і ГР доцільно проводити їх відкачування при виникненні наступних екстремальних ситуацій:

- автоматичні або напівавтоматичні системи пожежогасіння і охолодження палаючих резервуарів вийшли з ладу, і пожежу не вдалося ліквідувати на початковій стадії її виникнення;
- гаряча нафта або нафтопродукти виходять в обвалування при пошкодженні стінки або шва, що з'єднує днище зі стінкою резервуара, або у випадку прогорання прокладок біля засувок приймально-роздавальних патрубків (ПРП);
- ліквідувати горіння на поверхні палаючої нафти складно, а іноді – неможливо;
- кількість сил і засобів для проведення пінної атаки є недостатньою;
- кількість води для гасіння і охолодження палаючого та сусідніх з ним резервуарів є недостатньою і т.п.

Особливо доцільно проводити відкачування ЛЗР і ГР з резервуарів великих об'ємів типу РВС або РВСП із зірваним або підірваним дахом, в яких утворилися закриті «кишені», і з резервуарів типу РВСПК або РВСП із затонувим або пошкодженим плаваючим дахом.

Також сформульовано критерії, що характеризують експлуатаційну надійність способу безпеки відкачування нафти з палаючих резервуарів типу РВС, РВСП та РВСПК:

- висока вогнестійкість мокрої стінки (яка контактує з рідиною, що горить) відкрито палаючого резервуара;
- можливість використання існуючих технологічних комунікацій (трубопроводів, насосів, засувок і т.і.) для видалення рідини, що горить, із зони горіння;
- можливість застосування більшої кількості сил і засобів пожежної охорони для захисту (охолодження) палаючого та сусідніх з ним резервуарів;
- можливість зниження інтенсивності горіння у процесі відкачування рідини, що горить;
- безпека способу відкачування;
- простота способу відкачування і його невелика вартість.

Цінність способу безпечного відкачування полягає в тому, що для видалення основної маси нафти або нафтопродукту з палаючого резервуару використовуються існуючі технологічні комунікації, які за нормальних умов експлуатації резервуарних парків постійно знаходяться в працездатному стані.

Однак необхідно відзначити, що в цих роботах автори не відзначили недоліків застосування такого методу гасіння. Основним з недоліків є великий час відкачування ГР, який становить від декількох до десятків годин. В цілому можна зробити висновок, що застосування відкачування ГР з палаючих резервуарів у багатьох випадках доцільно використовувати як одну зі складових процесу ліквідації пожеж резервуарів.

Метод перемішування ГР

Метод перемішування ГР, оснований на змішуванні нижніх холодних шарів рідини з верхніми розігрітими шарами, не знайшов широкого поширення на практиці у зв'язку з великими обмеженнями щодо його застосування [207–208]. Однак проведені останнім часом дослідження вказують на можливість гасіння висококиплячих ГР таким методом. Так, автори роботи [209] відзначають, що гасіння полум'я дизельного палива струменем повітря за ефективністю практично не відрізняється від гасіння піною, отриманою з плівкоутворювального піноутворювача. Дослідники також констатували, що раніше спосіб гасіння пожеж нафтопродуктів за допомогою повітря не набув подальшого розвитку, оскільки на одному і тому ж підприємстві використовуються рідини як з високою, так і з низькою температурою спалаху.

Гасіння за допомогою сіток

Гасіння пожеж за допомогою сіток дає позитивний результат під час гасіння важких нафтопродуктів. Так, в роботі [210] стверджується, що гасіння сіткою без покриття є оптимальним варіантом установки гасіння пожеж у резервуарах з мазутом за критерієм мінімуму приведених витрат. У цій же роботі встановлено принципову можливість створення протипожежного захисту резервуарів з мазутом шляхом створення спрямованого вихрового руху у верхній частині резервуара за допомогою газоповітряних струменів.

В роботі [211] теоретично розглянуто умови самозгасання полум'я горючих рідин у разі впливу вогнеперешкоджувачів.

Подальше вдосконалення методів гасіння пожеж за участю ГР і ЛЗР пішло шляхом використання сіток або сіткових пакетів, оброблених вогнезахисними фарбами, які при тепловій дії спінуються і повністю перекривають вихід пари горючої рідини [212–214] і більш раціонального способу кріплення і приведення в робочий стан сіток [215].

Вогнегасні емульсії

У роботах Кустова М.В. і Калугіна В.Д. [216] було запропоновано для гасіння ГР і ЛЗР використовувати водні емульсії. Ними були розроблені методи отримання стійких емульсій і способи їх подачі в осередок горіння. Також були визначені вогнегасні характеристики емульсій та намічені шляхи їх підвищення. В якості основного шляху підвищення вогнегасних характеристик емульсій під час гасіння ГР і ЛЗР запропоновано збільшення вмісту в їх складі піноутворювача. Це призводить до інтенсивного піноутворення і, відповідно, до надійної ізоляції поверхні рідини. Тобто в такому разі запропонований метод можна розглядати як різновид методу пінного пожежогасіння.

Комбіновані методи гасіння ГР

В роботі [217] розглянуто комбінований метод гасіння дизельного палива шляхом сумісного використання аерозолі і водного розчину карбонату калію. Авторами експериментально отримано чисельні характеристики вогнегасної ефективності запропонованого комбінованого засобу і вказано на перспективність досліджень у цьому напрямку. В роботах [218–220] показано, що сумісна дія ударних хвиль і аерозолів веде до підвищення ефективності гасіння ГР.

Гелеутворюючі вогнегасні системи

Ще одним методом вирішення зазначених проблем є використання гелеутворюючих вогнегасних системи (ГУС). Вони були раніше запропоновані для гасіння твердих горючих матеріалів [221] і являють собою бінарну систему, що складається з двох розчинів, які окремо зберігаються і окремо, але одночасно, подаються до вогнища пожежі. Обидві сполуки можуть бути рідинами, що полегшує зберігання і подачу їх в зону горіння. Сполуки повинні бути підібрані таким чином, щоб у разі їх змішування на твердих поверхнях, між компонентами відбувалася взаємодія, що приводить до швидкого утворення нетекучого гелеподібного шару. Для забезпечення нанесення рівномірного однорідного шару гелю на горючі поверхні, необхідно забезпечити одночасну подачу компонентів ГУС в розпиленому вигляді. В роботі [222] розроблено метод подачі компонентів ГУС на великі відстані.

Такі сполуки добре себе зарекомендували під час гасіння твердих горючих матеріалів. Всього було запропоновано 35 гелеутворюючих систем. Найкращі вогнегасні властивості показали ГУС з полісилікатом натрію в якості гелеутворювача. Як каталізатор гелеутворення запропоновано використовувати амонійні солі, солі дво- або тривалентних металів. Безпосередньо використовувати ГУС для гасіння горючих рідин неможливо, оскільки гель тоне в більшості горючих рідин. Для вирішення проблеми позитивної плавучості гелевих шарів необхідно або зменшити щільність гелевого шару, або підібрати легкий носій для шару гелю, на якому він буде формуватися. Спроби отримати газонаповнений гель шляхом поєднання газоутворюючих реакцій і процесу гелеутворення не дали позитивних результатів [223–224].

Таким способом вдалося зменшити частку гелю, що тоне. За великої інтенсивності подавання компонентів вогнегасної системи вдавалося отримати шар гелю на всій поверхні бензину. Однак після припинення подачі компонентів вогнегасної системи шар гелю поступово руйнувався і тонував. Дещо кращі результати дало нанесення шару гелю на поверхню піни. Однак і у цьому випадку максимальний час плавучості гелю не перевищував 15 хвилин [225].

В роботі [226] були змодельовані умови плавучості шару гелю, нанесеного на шар гранул пінополістиролу. Експеримент показав, що суцільний шар гелю утворюється вже під час нанесення на воду полістирольних куль в один шар; при цьому невеликі зазори між кульками надійно заповнювалися гелевою композицією. Також були сформульовані вимоги до матеріалу носія гелю, який забезпечує його плавучість [225–226]. Однак експериментального підтвердження працездатності запропонованої вогнегасної системи і дослідження її вогнегасних властивостей зроблено не було.

1.5 Порівняльна характеристика різних видів вогнегасних засобів гасіння пожеж класу «В»

Відповідно до класифікації, приведеної в монографії [3], виділяють п'ять основних видів ВР: *твердофазні, рідинофазні, газофазні, аерозольні та*

водопінні. Кожен вид ВР має свої переваги і недоліки, свої сфери найбільш ефективного застосування.

Вибір оптимальної ВР для гасіння ГР визначається великою кількістю чинників. В першу чергу це летючість ГР. Найбільшу складність під час гасіння пожеж класу «В» являють собою ЛЗР. Важливими характеристиками рідин, що впливають на їх гасіння, є температура згорання, густина, теплопровідність, теплоємність, в'язкість і розчинність у воді. Істотний вплив на гасіння мають розмір, конструкція і форма резервуара, а також матеріал, з якого він виготовлений. Також важливі для успішного гасіння зовнішні фактори: температура і вологість повітря, швидкість і напрямок вітру.

Рідинофазні ВР, основною серед яких є вода, проявляють високу охолоджуючу дію. Однак для максимального залучення її охолоджуючої дії, необхідне використання води в розпиленому вигляді, що ускладнює подавання ВР на великі відстані. Це, у свою чергу, ускладнює гасіння ГР в ємностях з великою площею горіння.

Ще одним з недоліків рідинофазних ВР є малий час дії, який є наслідком того, що дрібні краплі води швидко випаровуються в зоні горіння, а в разі досягнення поверхні палаючої рідини в більшості випадків швидко тонуть в рідині. Це ускладнює створення довготривалих умов припинення горіння.

Газофазні ВР у більшості випадків є неефективними під час гасіння пожеж класу «В», через дуже низьку охолоджуючу дію, великі втрати під час гасіння пожеж на відкритих просторах і малий час вогнегасної дії. Газоподібні ВР – інгібітори горіння – частково компенсують ці недоліки за рахунок високого ефекту гальмування реакції горіння. Однак до їх недоліків додається висока вартість і токсичність цієї групи ВР.

Переваги та недоліки *твердофазних і аерозольних* засобів пожежогасіння такі ж, як і у газоподібних інгібіторів горіння. Виняток становлять ряд ВР цього класу за їх меншими токсичними властивостями і більш високими економічними параметрами. У літературі є дані щодо успішного використання цього класу ВР на практиці під час гасіння висококиплячих рідин на початковому етапі виникнення пожежі.

Повітрянопінні вогнегасні засоби до цього часу є найбільш поширеними ВР під час гасіння ГР. В першу чергу це пояснюється їх високими ізолюючими властивостями і тривалим часом вогнегасної дії. Також вони виявляють більш високу охолоджуючу дію, ніж інші види ВР, крім рідинофазних. До недоліків повітрянопінних вогнегасних засобів пожежогасіння відносяться:

- проблеми з їх подаванням на великі відстані;
- поступове руйнування пін;
- токсичність і екологічна небезпека пін;
- висока вартість ПУ, особливо плівкоутворювальних;
- забруднення пінами ГР.

У табл. 1.2 підсумовано дані за основними характеристиками різних типів ВР під час гасіння пожеж класу «В».

Таблиця 1.2 – Основні складові вогнегасних характеристик різних видів засобів гасіння пожеж класу «В»

Тип вогнегасної речовини	Характеристики ВР							
	охолодження	ізоляція	розбавлення	інгібування	еколог. безпека	економ. параметр	коефіцієнт використання	час дії
вода	++	–	±	–	++	++	–	–
розчини	++	–	+	++	±	+	–	–
піни	±	++	±	–	–	–	±	+
ПУС	±	++	±	–	–	–	±	±
піни, що тверднуть	±	++	±	–	–	–	++	++
порошки	–	–	–	++	±	±	–	–
аерозолі	–	–	–	++	±	±	–	–
гази-розріджувачі	–	–	+	–	+	±	–	–
гази-інгібітори	–	–	+	++	–	±	–	–
ГУС	++	++	±	–	+	+	++	++

де “++” – дуже висока, “+” – висока, “±” – середня, “–” – низька.

Під час гасіння пожеж класу «В» однією з основних умов успішного гасіння є забезпечення припинення горіння на всій поверхні ГР. Відсутність таких умов навіть над малою часткою поверхні призводить до подальшого поширення горіння на всю поверхню рідини. Також потрібно, щоб тривалості умови відсутності горіння було достатньо для охолодження поверхонь, що знаходяться в області, де концентрація пари горючих речовин може перевищити нижню концентраційну межу поширення полум'я. Охолодження поверхонь за рахунок природного теплообміну може зайняти десятки хвилин. У разі примусового охолодження, наприклад під час подавання води, цей час може бути зменшено до (5–10) хв.

Такі складові вогнегасної дії як розведення та інгібування можуть привести до надійного припинення горіння, якщо у великому обсязі парової фази над поверхнею рідини будуть на тривалий час забезпечені вогнегасні концентрації ВР. Ці умови легко створити для невеликих вогнищ горіння з низьким газообміном. Однак у таких умовах процес природного охолодження займе багато часу.

Створення умов забезпечення відсутності займання найбільш швидко здійснюється за допомогою ВР з високою охолоджуючою дією. Найбільш доцільно цього домогтися, використовуючи воду або водні розчини. Але для цього у випадку пожеж класу «В» треба забезпечити ефективне охолодження верхнього шару рідини на достатньо великий час.

Як видно з табл. 1.2, всім комплексом необхідних властивостей не володіє жоден тип ВР. Найбільш універсальними та ефективними ВР під час гасіння пожеж класу «В» є засоби з високою ізолюючою дією (піни, твердіючі піни, ПУС).

Одночасно для них є характерними більш високі, в порівнянні з іншими ВР, коефіцієнти використання (помірні втрати). Також за ознакою охолоджуючої дії вони перевершують всі інші засоби пожежогасіння крім води і водних розчинів.

1.6 Висновки за розділом 1

1. Незважаючи на вдосконалення заходів пожежної безпеки, кількість пожеж класу «В» за останні роки залишається практично незмінною.

2. Найбільш складними для гасіння пожеж класу «В» є пожежі резервуарів з нафтою та нафтопродуктами. В багатьох випадках вони характеризуються великою тривалістю, необхідністю залучення великої кількості сил і засобів пожежогасіння, великим матеріальними та екологічними збитками і людськими жертвами.

3. Існуючі засоби пожежогасіння часто не забезпечують позитивний результат гасіння у разі резервуарів великого розміру.

4. Найбільш ефективними й універсальними засобами пожежогасіння ГР, є засоби в яких реалізуються ізолюючий і охолоджуючий механізми припинення горіння. Такі властивості мають вогнегасні піни.

5. З повітряно-пінних засобів пожежогасіння перевагу мають низьократні піни, які одержані з плівкоутворюючих поверхнево-активних речовин.

6. У вогнегасних пін є суттєві недоліки – мала стійкість при дії інтенсивних теплових потоків від полум'я та під час контакту піни з рядом горючих рідин, особливо полярних; піни важко подати на великі відстані; ряду піноутворювачів мають високу вартість; у багатьох піноутворювачах присутні екологічно небезпечні речовини.

7. Існує потреба в розробці більш ефективних ВГЗ гасіння горючих рідин.

8. Ефективний ВГЗ повинен створити умови припинення горіння одночасно над всією поверхнею на час, достатній для охолодження нагрітих конструкцій резервуара до температури нижче температури самоспалахування.

РОЗДІЛ 2

ВИБІР ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ ВОГНЕГАСНОГО ЗАСОБУ ПІДВИЩЕНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ «В»

2.1 Шляхи підвищення вогнегасних властивостей засобів гасіння пожеж класу «В»

Основними механізмами припинення горіння є: *охолодження* зони горіння або палаючої речовини, *розбавлення* речовин, що беруть участь у процесі горіння, *ізоляція* горючих речовин від зони горіння, *інгібування* хімічної реакції окислення. Крім цього, під час пожежогасіння велике значення має ефект *екранування* поверхні речовини, яка горить, від теплового випромінювання факела полум'я, що можна віднести до різновидів реалізації механізму припинення горіння ізоляцією.

У разі гасіння пожежі класу «В» шляхом екранування поверхні рідини від випромінювання полум'я суттєво зменшується процес передачі тепла до рідини, а ендотермічний процес її випаровування продовжується. Таким чином, навіть окреме застосування екранування у процесі пожежогасіння приводить до зменшення температури поверхні рідини та до її поступового охолодження в цілому. Внаслідок таких процесів зменшуються інтенсивність випаровування і швидкість горіння, та може бути досягнута умова, за якої горіння рідини припиняється.

Іноді в якості окремих механізмів припинення горіння відзначають *вогнеперешкодження* і *зрив полум'я*. Однак, ці складові вогнегасної дії деяких засобів пожежогасіння можна звести до зазначених вище механізмів.

Найкращих результатів у підвищенні ефективності вогнегасних засобів можна досягнути шляхом розробки ВР комбінованої дії, в яких максимально використовуються всі основні механізми припинення горіння. Однак добитися одночасного максимального внеску всіх механізмів припинення горіння у вогнегасну дію певного вогнегасного засобу на практиці неможливо. Внесок кожної складової вогнегасної дії можна міняти, змінюючи якісний і кількісний склад ВР. Однак зазвичай речовини, які мають максимальне значення однієї складової вогнегасної дії, виявляють невисокі значення інших складових [227].

Ще однією проблемою створення ВР з покращеними вогнегасними властивостями є труднощі в теоретичному описанні кількісних характеристик складових вогнегасної дії. З механізмів припинення горіння лише охолоджуюча дія ВР відносно легко піддається кількісному відображенню. Крім того, для багатокomпонентних систем виникають проблеми хімічної сумісності компонентів, а також взаємовпливу складових вогнегасної композиції на властивості системи як цілого та на окремі складові вогнегасної дії. Тобто у деяких випадках можна говорити про синергізм або антагонізм взаємовпливу суміші компонентів у напрямку ефективності пожежогасіння.

Перераховані вище факти призводять до неможливості розрахунково-теоретичного визначення, як окремих складових вогнегасної дії, так і загальної інтегральної властивості системи – її вогнегасної здатності. Це призводить до

необхідності експериментального визначення відповідних характеристик із залученням методів математичного планування багатofакторного експерименту. При цьому необхідною умовою коректної обробки результатів експерименту є вибір незалежних факторів. Перераховані вище кількісні та якісні характеристики вогнегасної системи, за умови реалізації охолоджуючої, розбавлюючої, ізолюючої та інгібіруючої дії, по-перше, не є незалежними, а по-друге, є похідними від складу системи. Склад системи, у свою чергу, визначає її вогнегасну дію.

Для такої ситуації раніше був запропонований наступний алгоритм дослідження [227]. Спочатку обирається пріоритетна властивість, що забезпечує найбільший внесок у підвищення вогнегасних характеристик системи. Далі виконується підбір складу вогнегасної системи з високим значенням пріоритетної властивості. Потім на підставі теоретичних або експериментальних даних здійснюється ранжування інших складових вогнегасної дії. На підставі цього проводиться покроковий процес підбору складу вогнегасного засобу з найкращими характеристиками.

2.2 Ранжування факторів, що впливають на вогнегасні характеристики засобів гасіння пожеж класу «В»

Основні висновки аналізу сучасних тенденцій розвитку засобів гасіння горючих рідин (Розділ 1) можна сформулювати наступним чином:

- методи гасіння пожеж у резервуарах з ГР і ЛЗР, які не базуються на механізмі ізоляції поверхні рідини, в більшості випадків важко реалізувати під час гасіння резервуарів великих розмірів;
- ефективний ВГЗ повинен забезпечити створення умови згасання одночасно над всією поверхнею на час, достатній для охолодження нагрітих конструкцій резервуара до температури нижче температури самоспалахування;
- умова надійного згасання ГР і ЛЗР полягає у зниженні концентрації пари рідин нижче нижньої концентраційної межі поширення полум'я (НКМПП);
- основними шляхами зниження концентрації пари рідин у зоні горіння нижче НКМПП є ізоляція та охолодження їх поверхні.

На підставі цього можна зробити висновок, що найважливішим фактором під час гасіння ГР і ЛЗР є ізолюючі та охолоджуючі властивості ВР. З існуючих ВР найбільшою мірою такі властивості притаманні пінам та піноутворюючим сполукам із зовнішнім піноутворенням.

Розглянемо вплив температури рідини на тиск її пари поблизу поверхні випаровування. Залежність рівноважного тиску пари (p) від температури (T) для рідин описується рівнянням Клаузіуса–Клапейрона або Антуана (Розділ 1, рівняння (1.1)–(1.3)).

При використанні рівнянь (1.1) і (1.2) можна прийняти, що у вузькому інтервалі зміни температур (менше 10 °С) значення dp/dT мало змінюються. За умови більш значної зміни температури в розрахунках необхідно враховувати залежність теплоти випаровування від температури. Такі дані для більшості ГР і ЛЗР відсутні.

Розраховані за співвідношенням (1.1) значення dp/dT (за температури кипіння) для пентану, гексану, октану, декану і додекану наведені в табл. 2.1 разом зі значеннями НКМПП, теплоти випаровування ($\Delta H_{i\text{вип.}}$), температур займання ($t_{\text{займ.}}$), самоспалахування ($t_{\text{сс}}$) та кипіння ($t_{\text{кип.}}$) [61, 228].

Таблиця 2.1 – Значення dp/dT , НКМПП, температур займання, самоспалахування, кипіння і теплоти випаровування для ряду вуглеводнів

Речовина	$t_{\text{кип.}}$, °C	$\Delta H_{i\text{вип.}}$, кДж/моль	dp/dT , Па/К (мм рт.ст./К)	НКМПП, об. %	$t_{\text{займ.}}$, °C	$t_{\text{сс}}$, °C	$t_{\text{кип.}} - t_{\text{займ.}}$, °C
пентан	36	26,9	3890(29,2)	1,47	-34	286	70
гексан	69	31,6	4100(31,1)	1,24	-23*	233	92
октан	125	41,4	4600(34,9)	0,9	19	215	106
декан	174	49,7	4700(35,6)	0,70	66	230	108
додекан	216	61,3	4800(36,8)	0,68	103	202	113

де “*” – температура спалаху.

Під час аналізу таблиці візьмемо до уваги, що в процесі горіння температура верхнього шару рідини є близькою до температури кипіння. Другим важливим вихідним положенням аналізу є те, що для припинення процесу горіння рідини методом охолодження необхідно охолодити її поверхню до температури нижче температури спалаху. За температур, менших за температуру займання, але більших за температуру спалаху, встановлюється нестійке горіння, не здатне до продовження без дії джерела запалювання (наприклад наявність перегрітого борту резервуара).

На підставі наведених у табл. 2.1 даних можна зробити висновок, що у разі зменшення температури рідин від температури кипіння на 10 °C тиск пари зменшується на (290÷370) мм рт.ст. (зазначений принцип працює для температур, близьких до температури кипіння).

Очевидно, що ВР з температурою навколишнього середовища не може охолодити гарячу рідину до меншої температури. Тобто навіть тривале охолодження вогнегасною речовиною, яка має таку температуру поверхні випаровування рідини під час її горіння, не приведе до гасіння. В такому разі ефект охолодження буде недостатнім для припинення горіння для рідин з температурою спалаху, меншою за температуру навколишнього середовища. З рідин, наведених у табл. 2.1, за стандартних умов таке співвідношення реалізується для пентану, гексану та октану. Саме ці рідини є основними компонентами бензину.

Для припинення горіння декану і додекану температуру їх поверхні необхідно знизити до 66 °C і 103 °C, відповідно. Тобто, поверхневий шар рідини охолоджуюча ВР повинна охолодити на 108 °C та 113 °C нижче за їх температури кипіння.

Проведемо оцінку охолоджуючої дії вогнегасної речовини. В якості ВР візьмемо воду як речовину з великою охолоджуючою здатністю. У розрахунку

зробимо припущення, що охолоджуюча дія ВР визначається, головним чином, її теплоємністю (тобто внеском теплоти випаровування на даному етапі нехтуємо). Теплоємність індивідуальних вуглеводневих рідин та їх технічних сумішей (бензин, гас, дизельне паливо, мазут) змінюється в досить вузьких межах від 2,0 до 2,25 кДж/(кг·К). Спочатку приймемо, що маса води дорівнює масі нагрітої рідини ($m_{\text{рід.}}$) і процес теплообміну відбувся до кінця, тобто температури горючої рідини і води зрівнялися ($t_{\text{рівн.}}$). В якості вогнегасної речовини оберемо декан, температура кипіння якого дорівнює 174 °С. Початкову температуру води приймемо рівною 20 °С. В такому випадку рівняння теплового балансу матиме вигляд:

$$c_{\text{в}} \cdot m \cdot (T - 20) = c_{\text{д}} \cdot m \cdot (174 - T), \quad (2.1)$$

де $c_{\text{в}}$, $c_{\text{д}}$ – питомі теплоємності води (4,19 кДж/(кг·К)) й декану (2,12 кДж/(кг·К)); T – кінцева рівноважна температура декану, °С.

Розв'язок рівняння 2.1 дає значення $T = 73,8^{\circ}\text{C}$, що вище температури займання декану. Це означає, що лише за рахунок теплоємності води як первинної складової її охолоджуючої здатності згасання декану досягнуто не буде.

Однак охолоджуюча дія води за високих температур обумовлена в основному її високим значенням теплоти випаровування. Розрахуємо, яка маса води ($m_{\text{в}}$) необхідна для охолодження 1 кг декану за рахунок процесів її нагріву від 20 °С до 100 °С з урахуванням подальшого випаровування. У цьому випадку рівняння теплового балансу (2.1) набуває вигляду:

$$c_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}} \cdot (100 - 20) + m_{\text{в}} \cdot \Delta H_{i_{\text{вип}}} = c_{\text{д}} \cdot m_{\text{д}} \cdot (174 - 100), \quad (2.2)$$

де $\Delta H_{i_{\text{вип}}}$ – теплота випаровування води, 2260 кДж/кг; $m_{\text{д}}$ – маса декану, $m_{\text{д}} = 1$ кг.

Розв'язок рівняння 2.2 дає значення для маси води $m_{\text{в}} = 0,06$ кг = 60 г.

Результати цього розрахунку вказують на те, що рідини з температурою кипіння вище 200 °С легко охолодити до температури 100 °С та менше. Відповідні розрахунки для додекану показують, що процес його горіння також можна припинити шляхом подавання приблизно 60 г води з розрахунку на 1 кг горючої рідини.

Із проведеного розрахунку можна зробити загальний висновок, що рідини з температурою спалаху більше 100 °С можна загасити лише шляхом охолодження відносно невеликою кількістю води. Цей висновок є справедливим лише в тому випадку, якщо вся вода, що подана на поверхню рідини, візьме участь в її охолодженні. На практиці це забезпечити досить важко, оскільки дрібні краплини води відносяться конвекційними потоками або випаровуються, а великі – швидко занурюються в рідину. Таким чином, щоб максимально задіяти механізм охолоджуючої дії води, потрібно знайти спосіб тривалого утримання її в області верхнього прогрітого шару рідини.

В цілому з аналізу впливу механізмів охолодження на процес горіння рідин можна зробити ряд загальних висновків:

- за рахунок охолодження рідин шляхом подавання ВР з температурою навколишнього середовища неможливо охолодити низькокиплячу рідину до температури нижче температури спалаху і, відповідно, знизити тиск пари рідини нижче значення, за якого утворюється НКМПП;

- за рахунок охолодження рідин шляхом подавання ВР з температурою навколишнього середовища можна охолодити ряд висококиплячих рідин до температури нижче температури спалаху і, відповідно, знизити тиск пари рідини, що призведе до зниження концентрації пари нижче НКМПП і припинення полум'яного горіння;

- за рахунок охолодження рідин шляхом подавання ВР з температурою навколишнього середовища можна охолодити елементи конструкцій резервуара нижче температури самоспалахування.

Звідси випливає висновок, що універсальна ВР, яка повинна забезпечити гасіння як низько-, так і висококиплячих рідин, не може забезпечити припинення горіння лише за рахунок ефекту охолодження. Тобто охолоджуюча дія у випадку ранжування факторів, що забезпечують високі вогнегасні властивості під час гасіння пожеж класу «В», стоїть нижче ізолюючих властивостей ВР. У той же час, припинення горіння висококиплячої рідини може бути досягнуто лише шляхом охолодження її поверхневого шару.

Ефективно гальмують процес полум'яного горіння рідин інгібітори горіння, як твердофазні (порошки та аерозолі), так і гази-інгібітори. За умови їх подавання можна створити умову згасання в зоні горіння, якщо вогнегасна концентрація буде створена в усьому об'ємі зони горіння одночасно. У такому разі, за умови відсутності зовнішніх джерел запалювання та температури елементів конструкції резервуара нижче температури самоспалахування пари, буде досягнуто припинення полум'яного горіння. Однак підтримувати цю умову необхідно протягом часу, достатнього для охолодження всіх огорожуючих конструкцій резервуара. Речовини, що виявляють високу інгібіруючу дію, зазвичай мають невисоку охолоджуючу здатність та низьку тривалість вогнегасної дії. Вони відносяться конвекційними потоками або осідають на поверхню рідини. Це, у свою чергу, вимагає продовження подавання ВР досить тривалий час після згасання полум'я.

Охолодження поверхонь резервуарів за рахунок самочинного теплообміну може зайняти десятки хвилин. Прийmemo з деяким запасом час охолодження за рахунок самочинного теплообміну як одну годину. У разі примусового охолодження, наприклад у разі подавання води, цей час може бути зменшено до (5÷10) хв. Візьmemo час примусового охолодження – 10 хв. Враховуючи це можна зробити висновок, що безперервне подавання інгібіторів процесу горіння призводить до неприйнятно великого збільшення їх витрат на пожежогасіння.

Аналогічна ситуація виникає й за умови застосування газів-розріджувачів. Вони також, як і інгібітори горіння, мають низький час дії та низьку охолоджуючу дію. Звідси випливає загальний висновок, що залучення

механізмів інгібування та розведення є менш ефективним під час гасіння ГР та ЛЗР, у порівнянні з механізмами ізоляції й охолодження. Таким чином, механізми вогнегасної дії для випадку гасіння ЛЗР за внеском у процес гасіння розташовуються в наступній послідовності:

1. ізоляція;
2. охолодження;
- 3.–4. інгібування та розведення.

Як було показано раніше, у разі пожежогасіння висококиплячих рідин існує можливість припинення їх горіння лише за рахунок охолоджуючої дії ВР. Тому в разі висококиплячих рідин за внеском у процес гасіння механізми вогнегасної дії розташовуються в наступній послідовності:

1. охолодження;
2. ізоляція;
- 3.–4. інгібування та розведення.

Одним з найважливіших факторів, який визначає ефективність ВР під час гасіння ГР і ЛЗР, є *час дії* – період часу, протягом якого дискретна порція ВР підтримує умови згасання в зоні горіння. При цьому тиск пари рідини має залишатися нижче критичного значення, за якого над всією площею поверхні рідини концентрація пари не перевищує НКМПП. Якщо ця умова не виконується, то горіння може відновитися від будь-якого джерела запалювання або шляхом самоспалахування від перегрітих пожежею конструкцій. Для надійного забезпечення відсутності повторного займання ГР та ЛЗР на період, який визначається часом дії ВР, всі елементи конструкції резервуара повинні бути охолоджені до температури, меншої за температуру самоспалахування. У разі якщо не застосовується штучне охолодження елементів конструкції резервуара, необхідно умови згасання над поверхнею рідини підтримувати протягом однієї години. В іншому випадку, за умови наявності подавання води на охолодження резервуара, необхідно підтримувати вогнегасну концентрацію ВР протягом 10 хв.

При виборі ефективного вогнегасного засобу важливу роль відіграють і такі фактори:

- економічні;
- коефіцієнт використання (малі втрати ВР під час гасіння);
- токсично-екологічні.

Як видно з табл. 1.2 (Розділ 1), найкращими ізолюючі властивості мають піни, піноутворюючі системи (ПУС) та піни, що швидко тверднуть (ШТП). Однак ПУС та ШТП на цей час знаходяться у стадії розробки. Вогнегасні піни виявляють помірну охолоджуючу та розбавлюючу дію та мають досить високий коефіцієнт використання. Для них є характерним тривалий час дії. За цим показником вони поступаються лише ШТП. До недоліків пін можна віднести невисоку охолоджуючу дію, а також низькі економічні та екологічні параметри.

Таким чином, можна зробити висновок, що ефективний вогнегасний засіб для гасіння пожеж ГР і ЛЗР в резервуарах повинен мати такі характеристики:

- високі ізолюючі та охолоджуючі властивості;
- час дії не менше 10 хвилин у разі штучного охолодження та не менше од-

- нієї години – за умови самочинного охолодження;
- прийнятні токсично-екологічні й економічні параметри.

З відомих ВР високими ізолюючими властивостями характеризуються гелеутворюючі системи (ГУС). Крім того, вони переважають піни за охолоджуючими властивостями, часом дії, економічними та екологічними параметрами.

ГУС були раніше запропоновані для гасіння твердих горючих матеріалів [227]. ГУС являють собою бінарну систему, що складається з двох рідин, які окремо зберігаються та окремо-одночасно подаються у вогнище пожежі. Обидві складові є водними розчинами, що полегшує їх зберігання і подавання в зону горіння та, водночас, забезпечує високу охолоджуючу дію завдяки наявності в їх складі води – речовини з найбільшою охолоджуючою здатністю серед існуючих ВР. Склади розчинів підібрані так, що за умови їх змішування на межі «горюча речовина-повітря» між компонентами відбувалась хімічна взаємодія, яка призводить до швидкого утворення нетекучого гелеподібного шару.

Однак безпосередньо використовувати ГУС для гасіння горючих рідин неможливо, оскільки гель тоне в більшості горючих рідин. Для позитивного вирішення проблеми плавучості гелеподібних шарів необхідно або зменшити їх густину, або підібрати легкий носій для шару гелю, на якому його можна сформувавши та утримати.

Спроби отримати газонаповнений гель шляхом поєднання газоутворюючих реакцій та процесу гелеутворення не дали позитивних результатів [229].

Деякі кращі результати дозволили досягти нанесення шару гелю на поверхню повітряно-механічної піни. Однак і у цьому випадку максимальний час плавучості гелю не перевищував 15 хвилин.

В якості легкого носія, що забезпечує плавучість гелеутворюючого шару, доцільно розглянути використання твердих пористих матеріалів. Оціночні дослідження показали, що шар гелю утворює стійке покриття на поверхні керамзиту, спучених перліту і вермикуліту, а також гранульованого та дробленого піноскла.

Вибір найкращого носія вимагає проведення додаткових експериментальних досліджень.

2.3 Вибір принципової схеми вогнегасної системи для гасіння горючих та легкозаймистих рідин

Для створення вогнегасної системи з більш високими вогнегасними характеристиками, ніж у пін, необхідно забезпечити їм такі властивості:

- ізолюючі властивості на рівні вогнегасних пін;
- покращені відносно вогнегасних пін охолоджуючі властивості;
- час дії більше 10 хв. – у випадку штучного охолодження резервуара і більше однієї години – у разі самочинного охолодження;
- довготривала плавучість на поверхні ГР і ЛЗР.

Перші три властивості може забезпечити гелеутворюючий шар. Останню умову можна реалізувати введенням у вогнегасну систему матеріалу з густиною, меншою, ніж мають ГР та ЛЗР.

Таким чином, з цього аналізу можна зробити висновок, що ВС з більш високими вогнегасними характеристиками, ніж у пін, повинна складатися з двох шарів: верхнього ізолюючого та нижнього шару легкого носія.

Одночасно необхідно відзначити, що гасіння рідин із температурою спалаху вище 100 °С можна здійснювати лише за рахунок ефекту охолодження. У такому випадку немає необхідності в забезпеченні наявності у вогнегасної речовини високих ізолюючих властивостей. Слід відмітити, що при цьому доцільно в якості речовини з високими охолоджуючими властивостями використовувати воду. Однак також необхідна розробка системи, яка дозволила би забезпечити тривалий контакт води з верхнім нагрітим шаром рідини.

2.4 Обґрунтування вибору гелеутворюючої системи для формування ізолюючого шару

Гелеутворюючі системи добре себе зарекомендували під час гасіння твердих горючих матеріалів. Раніше було запропоновано 35 гелеутворюючих систем [227]. Найкращі вогнезахисні характеристики показали ГУС з рідким склом ($\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) у якості гелеутворювача. В якості каталізаторів гелеутворення в таких системах було запропоновано використовувати ряд солей.

У табл. 2.2 наведено основні продукти реакції між гелеутворювачем та каталізатором гелеутворення, а також мінімальні концентрації компонентів деяких ГУС, які забезпечують швидке гелеутворення та найбільшою мірою відповідають сформульованим вимогам.

Таблиця 2.2 – Значення мінімальних концентрацій компонентів ГУС (ω_1) та каталізаторів гелеутворення (ω_2) для швидкого гелеутворення; основні продукти їх взаємодії

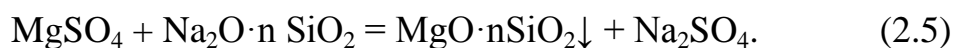
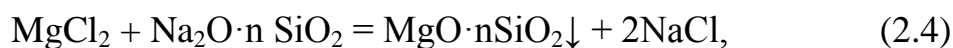
№	Каталізатор гелеутворення	Основний продукт реакції	$\omega_1, \%$	$\omega_2, \%$
1.	CaCl_2	$\text{CaO} \cdot n\text{SiO}_2$	3	3
2.	MgCl_2	$\text{MgO} \cdot n\text{SiO}_2$	5	4
3.	MgSO_4	$\text{MgO} \cdot n\text{SiO}_2$	5	4
4.	FeSO_4	$\text{FeO} \cdot n\text{SiO}_2$	5	4
5.	K_2CO_3	H_2SiO_3	25	40
6.	AlCl_3	$2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3n\text{SiO}_2$	3,5	3
7.	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3n\text{SiO}_2$	4	3
8.	NH_4Cl	H_2SiO_3	8	8
9.	NH_4Br	H_2SiO_3	8	10
10.	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	H_2SiO_3	8	12
11.	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	H_2SiO_3	12	6+6
12.	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	H_2SiO_3	12	13
13.	AlBr_3	$2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3n\text{SiO}_2$	3	4

У всіх випадках у якості гелеутворювача використовуються водні розчини рідкого скла, яке відноситься до третього класу небезпеки. Рідке скло випускається промисловістю у великих кількостях. Воно використовується як в'язучий

матеріал, інгібітор корозії сплавів заліза, як основний компонент силікатного клею та сировини для отримання інших силікатів і силікагелю.

Раніше були визначені міцності гелеподібних шарів, отриманих з використанням різних каталізаторів гелеутворення [227]. За цією характеристикою найкращі результати показали ГУС №1–3 (табл. 2.2). У них як каталізатори гелеутворення використовуються водні розчини солей кальцію й магнію CaCl_2 , MgCl_2 , MgSO_4 з концентраціями (3÷4) мас.%. Характер середовища цих каталізаторів гелеутворення слабокислий ($\text{pH} \approx 5$), а самі солі відносяться до 3 та 4-го класів небезпеки.

Для оцінки екологічної безпеки вогнегасної системи важливо охарактеризувати продукти взаємодії компонентів ГУС. Нижче наведені відповідні рівняння хімічних реакцій:



Як видно з рівнянь (2.3)–(2.5), продуктами реакцій є нерозчинні полісилікати кальцію та магнію, сульфат магнію та хлорид натрію. Ці речовини відносяться до 3 та 4-го класів небезпеки, а їх сумарний вміст у гідрогелі може не перевищувати 4 мас.%. Таким чином, у запропонованій вогнегасній системі використовуються тільки речовини 3 та 4-го класу небезпеки з невеликими концентраціями.

Тут також необхідно зазначити, що всі компоненти ГУС є речовинами нерозчинними у вуглеводневих горючих рідинах. Цей факт є важливим для переробників нафти та нафтопродуктів, тому що компоненти запропонованої вогнегасної системи не забруднюють відповідні рідини, що полегшує їх подальшу переробку і використання.

Враховуючи результати попередніх досліджень ГУС [227], в подальшому як каталізатора гелеутворення використовувався 5 %-й розчин CaCl_2 .

2.5 Обґрунтування вибору матеріалу легкого носія ізолюючого шару

Безпосередньо використовувати гелеутворюючі вогнегасні засоби для гасіння горючих рідин неможливо, оскільки гель тоне в більшості горючих рідин. Для вирішення цієї проблеми необхідно підібрати легкий носій, на який буде наноситися шар гелю для забезпечення його плавучості [20].

При підборі легкого носія необхідно враховувати наступні фактори:

- густину горючих рідин, знаходяться в інтервалі (700÷1100) кг/м^3 ;
- густину гелевого шару, змінюється в межах (1050÷1300) кг/м^3 ;
- низьку проникність гелевого шару для пари горючих рідин забезпечується утворенням суцільного шару гелю товщиною не менше 1,3 мм.

За результатами дослідження стійкості гелевих шарів на поверхнях горючих рідин для носія, що складається з гранул, розташованих упритул в один шар, авторами [226] отримано співвідношення:

$$h_r < \frac{h_n \cdot (0,76 \cdot \rho_{ж} - 0,52 \cdot \rho_n - 0,24 \cdot \rho_r)}{\rho_r - \rho_{ж}}, \quad (2.6)$$

де h_r , h_n , $\rho_{ж}$, ρ_r , ρ_n – товщини шарів гелю та легкого носія, густина рідини, гелю та матеріалу легкого носія відповідно.

Зі співвідношення (2.6) випливає наступний вираз, що характеризує густину матеріалу носія:

$$\rho_n < 1,92 \frac{h_r}{h_n} (\rho_{ж} - \rho_r) + 1,46 \rho_{ж} - 0,46 \rho_r. \quad (2.7)$$

Виходячи з відправних параметрів для визначення несучої здатності легкого носія у системі «горюча рідина – легкий носій – гель», прийнятих $h_r = 1,5$ мм, $h_n = 5$ мм, $\rho_{ж} = 700$ кг/м³, $\rho_r = 1100$ кг/м³, отримано значення густини матеріалу легкого носія $\rho_n < 286$ кг/м³.

Враховуючи те, що густина горючих рідин може змінюватися в деяких межах на підставі нерівності (2.7), отримано взаємозв'язок густини горючої рідини та матеріалу носія за обраних раніше параметрів системи «горюча рідина – легкий носій – гель»:

$$2,04 \rho_{ж} - 1140 > \rho_n. \quad (2.8)$$

Виходячи з типових значень густини горючих рідин у нерівності (2.8), можна зробити висновок, що для легких нафтопродуктів, таких як бензин, густина носія гелю повинна бути менше 286 кг/м³, а для важких нафтопродуктів (наприклад, дизельне пальне, нафта) значення щільності матеріалу носія може досягати (600÷700) кг/м³.

Таким вимогам не задовольняє жодна з негорючих рідин та жоден із твердих матеріалів. Однак цим вимогам можуть відповідати піни та пористі тверді тіла. Піни, які традиційно використовуються в пожежогасінні, виявилися нестабільними при нанесенні на них шару гелю. З твердих пористих матеріалів встановленим вимогам за щільністю відповідають пінопласти на основі органічних полімерів. Але вони є горючими матеріалами і тому не придатні для використання в якості носія вогнегасного гелю.

Вимогам (критеріям густини і негорючості) відповідають багато з пористих неорганічних матеріалів: случені перліт і вермикуліт, піноскло, пемза, керамзит, газо- і пінобетон, ракушняк, порожнисті скляні мікросфери. Деякі з цих матеріалів містять відкриті пори, в які може проникати горюча рідина, що не дозволяє пористому матеріалу довго триматися у плавучому стані та утримувати вогнегасний гелевий шар.

На сьогодні здатність пористих неорганічних матеріалів поглинати горючі рідини в більшості випадків є невідомою. У зв'язку з цим доцільним стало експериментальне визначення для деяких з них параметрів плавучості на поверхні горючих рідин [20]. У ході експерименту в якості легкого носія гелевого шару були випробувані спучений перліт, спучений вермикуліт, піноскло відкритопористе (ПС-1) з розміром гранул 1 см та піноскло закритопористе (піноскляний щебінь виробництва Шосткінського заводу) (ПС-2) з розміром гранул до $(1 \div 1,5)$ см (рис. 2.1). Гранули цих матеріалів засипалися в ємність з бензином марки А-92, густина якого становила 715 кг/м^3 . Тривалість випробування для всіх матеріалів становила 10 днів.

Вермикулітові гранули протрималися на поверхні бензину не більше 5 хвилин. Спучений перліт і піноскло показали кращу плавучість. Гранули піноскла (ПС-1), уявна густина якого 160 кг/м^3 , трималися на поверхні бензину 7 днів при частковому зануренні у горючу рідину (на 75 % свого об'єму).



Рис. 2.1 – Силікатні матеріали, випробувані в якості легкого носія гелю в пілотних дослідженнях

Гранульоване піноскло (піноскляний щебінь, подрібнене піноскло) (ПС-2) опустилося менш, ніж на половину і протрималося без подальшого занурення весь час випробувань. Серед часток спученого перліту, який має уявну густину 194 кг/м^3 , які подали на поверхню бензину, 20 % втонуло відразу. З часом частка гранул, що тоне, збільшується. Через три доби експерименту вже 80 % часток перліту повністю занурилися в горючу рідину, після чого це співвідношення не змінюється. Але слід зазначити, що протягом 4 годин близько половини спученого перліту зберігала плавучість. Оскільки тривалість процесу гасіння зазвичай не перевищує цього проміжку часу, то перліт можна використовувати як носій гелю під час пожежогасіння. Плавучість піноскла і спученого перліту була вивчена і в більш жорстких умовах, наближених до реальних, а саме – під час горіння бензину, де ці матеріали показали такі ж самі результати, що дозволяє використовувати їх в якості носія гелевого шару під час гасіння пожежі.

У цій монографії вирішувалося завдання пошуку більш ефективних матеріалів з метою їх використання в якості легкого носія вогнегасного гелевого шару для забезпечення плавучості на поверхні горючих рідин системи «легкий носій – гель» під час пожежогасіння. Тому виявилось доцільним більш детальне вивчення

та вдосконалення відомих пористих неорганічних матеріалів. Для цього було розглянуто можливість застосування запропонованих раніше силікатних матеріалів: пористого скла та керамзиту, представлених на рис. 2.2 [231–235].

Відомо, що *керамзит* – це легкий пористий керамічний матеріал, який характеризується комплексом властивостей з високими технологічними показниками. Так, він стійкий до будь-яких погодних умов, не схильний до гниття, морозостійкий, досить міцний, довговічний та має високу вогнестійкість.

Піноскло – це легкий пористий матеріал, що являє собою затверділу скляну піну. Важливою перевагою піноскла є його повністю неорганічний хімічний склад, що забезпечує пожежну безпеку, стійкість до впливу мікроорганізмів, високу вологостійкість. Пористе скло, поряд із високими фізико-хімічними властивостями, легко піддається механічній обробці, воно не горить, не гниє, під час виробництва його можна формувати у вигляді виробів заданої форми. Деякі фізико-хімічні та механічні властивості запропонованих для дослідження матеріалів наведені в табл. 2.3.

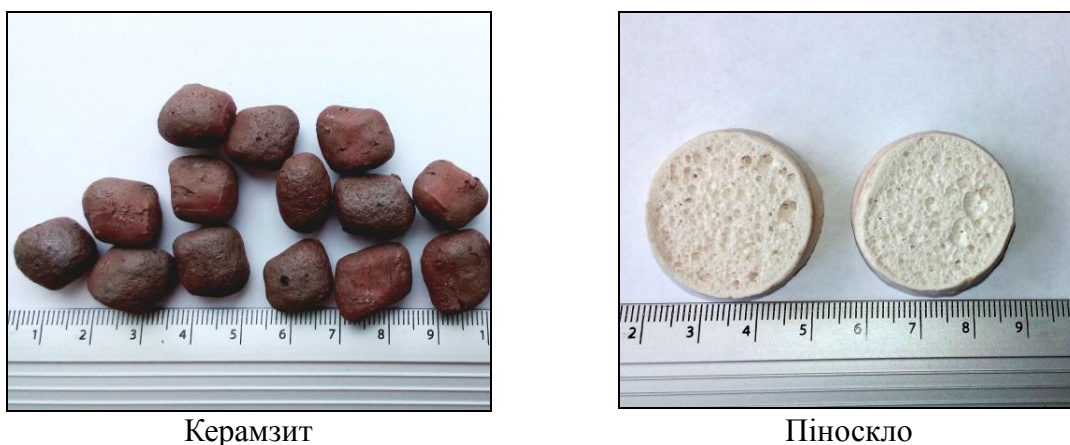


Рис. 2.2 – Вид та розміри досліджуваних силікатних матеріалів

Відповідно до даних наведеної таблиці, досліджувані силікатні матеріали, керамзит та піноскло, характеризуються показниками, які в повній мірі дозволяють розглядати їх в якості легких носіїв гелевого шару для цілей пожежогашіння. Визначальною властивістю для означеного напрямку застосування є *уявна густина*. Матеріал носія повинен мати менше значення уявної густини, ніж густина горючої рідини. Густина бензину становить $\sim 715 \text{ кг/м}^3$, що істотно вище, ніж уявна густина досліджуваних пористих матеріалів.

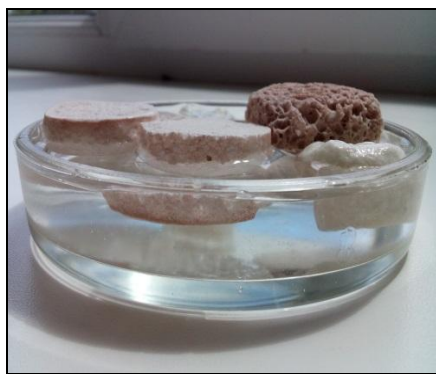
Таблиця 2.3 – Властивості досліджуваних силікатних матеріалів

Матеріал носія	Уявна густина, кг/м^3	Межа міцності при стисненні, МПа	Марка за міцністю	Водопоглинання, %
Керамзит	450÷600	–	П50	10÷16
ПС-1	117÷132	12÷14	–	35÷41
ПС-2	130÷162	–	П50	53÷59

На рис. 2.3 наочно представлено експериментальний процес якісного випробування на плавучість різних матеріалів у бензині марки А-92.

Експеримент тривав протягом 10 днів. Фотографування зразків, випробуваних на плавучість, було проведено наприкінці 10-ї доби дослідю. З рисунка видно, що всі гранули піноскла та керамзиту не тонуть і мають добру плавучість. Слід зазначити, що піноскло (ПС-1) має відкритопористу структуру, що не вплинуло на позитивний результат даного експерименту.

Подрібнене піноскло (ПС-2) має закритопористу структуру, проте зовнішні його пори є відкритими. Це, у свою чергу, дає можливість використовувати його як носій речовини з високими охолоджуючими властивостями – води. Кількість утримуваної подрібненим склом води варіює в діапазоні від 30 до 50 %. Причому, як показали попередні дослідю, у разі засипання змоченого піноскла у вуглеводневї рїдини вода утримується в зовнішніх порах.



Керамзит у бензині

Піноскло у бензині

Рис. 2.3 – Експериментальне дослідження плавучості керамзиту та піноскла

Одночасно з цим, незважаючи на збільшення маси гранул піноскла за рахунок утримання ними води, піноскло зберігає достатню плавучість для утримання на своїй поверхні шару гелю.

Таким чином, за результатами досліджень можна зробити висновок, що плавучість на поверхні горючих рїдин системи «легкий носій – гель» для цілей пожежогасіння можна забезпечити шляхом застосування керамзиту і піноскла. Ці силікатні матеріали експериментально довели свою придатність для їх використання в якості легкого носія вогнегасного гелю. З урахуванням кращої плавучості для подальших досліджень було обрано гранульоване піноскло (ПС-2).

2.6 Визначення плавучості сухого та змоченого піноскла в горючих рідинах

Параметри плавучості шару піноскла у горючих рідинах раніше визначені не були. Прямий розрахунок плавучості виходячи з даних щодо густини рідин та піноскла не можливий, тому що гранульоване піноскло має відкриті зовнішні пори, заповнення рідинами яких важко врахувати.

У якості кількісної характеристики плавучості (Π) було обране відношення висоти шару ПС, що перебуває над рівнем рідини, до загальної висоти шару ПС:

$$\Pi = \frac{h \uparrow}{h_{\text{заг}}} = \frac{h \uparrow}{h \uparrow + h \downarrow}, \quad (2.9)$$

де $h \uparrow$ – висота шару піноскла над шаром рідини; $h_{\text{заг}}$ – загальна товщина шару піноскла; $h \downarrow$ – висота шару піноскла, занурена під шар рідини.

Виразимо висоту шару ПС над шаром рідини з співвідношення (2.9):

$$h \uparrow = h_{\text{заг}} \cdot \Pi. \quad (2.10)$$

Таким чином, знання плавучості й загальної товщини шару піноскла дозволяє розрахувати висоти шарів піноскла як над шаром, так і під шаром рідини. Останні дві характеристики є визначальними для знаходження ізолюючих і охолоджуючих характеристик вогнегасної системи.

Для визначення плавучості у скляну ємність об'ємом 2 л спочатку заливали 1 дм³ горючої рідини (рис. 2.4), далі – рівномірно засипали 1 дм³ гранульованого піноскла (рис. 2.5). Висоту шару ПС, зануреного у ГР, та того, що перебуває над рівнем рідини, визначали візуальним методом за допомогою лінійки.



Рис. 2.4 – Рівень наливання горючої рідини



Рис. 2.5 – Розташування ПС на горючій рідині

Зі співвідношення (2.9) для різних горючих рідин було розраховано плавучість сухого піноскла ($P_{сух}$) і змоченого піноскла.

Процедура змочування піноскла передбачала заливання його водою та притиснення шару піноскла вантажем. Після однієї хвилини змочування піноскла його висипали на сітку й давали воді вільно стікати протягом 5 хв. При цьому піноскло утримує певну кількість води. Плавучість такого піноскла позначимо через P_1 .

Досліджено подачу змоченого піноскла ежекційним апаратом (рис. 2.6). Враховуючи те, що подача ПС у вогнище пожежі передбачена продуктопроводом за допомогою потоку повітря, то деяку частину води буде втрачено. Тому плавучість ПС після подавання за допомогою ежекційного апарата позначено як P_2 . Відповідні експериментальні дані щодо плавучості ПС із розміром гранул ($1 \div 1,5$) см наведені разом із густинами обраного ряду горючих рідин у табл. 2.4.



Рис. 2.6 – Ежекційний апарат для подавання гранульованого піноскла

Таблиця 2.4 – Плавучість подрібненого сухого та змоченого ПС у горючих рідинах з різною густиною за температури 20 °С (розмір гранул ($1 \div 1,5$) см)

Рідина	ρ , кг/м ³	Плавучість (відповідно до (2.9))		
		$P_{сух}$	P_1	P_2
Пентан	620	0,36	*	*
Гептан	660	0,39	*	*
Октан	680	0,42	0,21	0,31
Декан	730	0,45	0,27	0,36
Додекан	750	0,48	0,31	0,40
Петролейний ефір	630÷690	0,42	0,20	0,29
Уайт-спірит	760÷790	0,42	0,22	0,31
Бензин	710÷760	0,52	0,29	0,40
Керосин	780÷850	0,57	0,36	0,46
Дизельне пальне	800÷850	0,57	0,38	0,48
Машинне мастило (I÷20)	910	0,58	0,40	0,49

“*” – частина гранул затонула.

Плавучість ПС залежить від розміру гранул ПС. Це пов’язано з тим, що зі зростанням розміру гранул відносна кількість відкритих пор зменшується. Для деяких вуглеводневих палив і технічних рідин були визначені плавучості

подрібненого ПС з розміром гранул (1,5÷2,5) см і (2,5÷4,0) см. Результати відповідних дослідів для сухого та змоченого ПС (Π_1) наведені у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Плавучість подрібненого сухого ($\Pi_{\text{сух}}$) та змоченого (Π_1) ПС за розмірами гранул

Рідина	$d_r = (1,5 \div 2,5)$ см		$d_r = (2,5 \div 4,0)$ см	
	$\Pi_{\text{сух}}$	Π_1	$\Pi_{\text{сух}}$	Π_1
Уайт-спірит	0,44	0,27	0,47	0,29
Бензин	0,55	0,32	0,57	0,34
Керосин	0,59	0,47	0,62	0,48
Дизельне пальне	0,62	0,51	0,64	0,55
Машинне мастило (I-20)	0,62	0,52	0,64	0,55

Аналіз даних таблиць 2.4 та 2.5 дозволяє зробити наступні висновки:

- плавучість сухого піноскла з розміром гранул (1,0÷1,5) см у ГР змінюється в інтервалі 0,36÷0,58;
- зі зростанням розміру гранул плавучість сухого піноскла збільшується на (8÷13) % і досягає значень 0,64;
- плавучість змоченого ПС у (1,5÷2) рази менша за плавучість сухого ПС;
- зі зростанням розміру гранул плавучість змоченого піноскла збільшується на (15÷18) %;
- плавучість сухого піноскла у вуглеводневих рідинах дозволяє використовувати його для утворення захисного ізолюючого шару.

2.7 Визначення можливості нанесення суцільного шару гелю на поверхню шару гранульованого піноскла

Раніше були встановлені високі ізолюючі властивості гелевих шарів, нанесених на поверхні твердих горючих матеріалів [227]. Нижче буде розглянуто умови утворення суцільних шарів гелю на гладких поверхнях і на поверхні шару гранульованого піноскла, утвореного частками різних фракцій [18, 19, 22, 23, 30, 46, 236].

Суцільний шар гелю, за умови подавання компонентів ГУС у розпиленому вигляді, утворюється за їх питомої поверхневої витрати (1,3÷1,4) кг/м². У випадку нанесення шару гелю на поверхню шару піноскла для утворення суцільного ізолюючого шару необхідно заповнення проміжків між гранулами піноскла. Це вимагає значно більшої витрати компонентів ГУС на утворення суцільного шару гелевого покриття. Тому виникає потреба у проведенні відповідних експериментальних досліджень.

Для дослідження можливості утворення суцільного шару гелю було обрано три фракції гранул піноскла: (1÷1,5) см; (1,5÷2,5) см та (2,5÷4,0) см. Спочатку в циліндричну ємність із бортами висотою 5 см засипали суцільний шар піноскла. Після зважування (рис. 2.7) на шар піноскла за допомогою побутових розпилювачів наносили шар гелю до утворення суцільного шару. За результатами повторного зважування визначали питому поверхневу витрату гелю (Φ):

$$\Phi = \frac{m}{S}, \quad (2.11)$$

де m – маса гелю; S – площа поверхні шару гелю.

Експеримент проводили із двома питомими витратами ГУС. Перший режим нанесення відповідав нанесенню суцільного шару гелю на поверхні кожної гранули ПС (рис. 2.8). Другий режим нанесення забезпечував нанесення суцільного шару гелю із заповненням проміжків між гранулами ПС (рис. 2.9). Суцільний шар гелю на поверхні кожної гранули ПС утворювався за питомої поверхневої витрати гелю $(1,8 \div 2,1)$ кг/м² для всіх трьох фракцій гранул піноскла.



Рис. 2.7 – Зважування шару ПС без шару гелю



Рис. 2.8 – Створення суцільного шару гелю на поверхнях гранул ПС



Рис. 2.9 – Створення суцільного шару гелю із заповненням проміжків між гранулами ПС

У табл. 2.6 наведено результати дослідів з утворення суцільного шару гелю із заповненням проміжків між гранулами піноскла для різних фракцій.

Таблиця 2.6 – Питома поверхнева витрата ГУС для утворення суцільного шару гелю із заповненням проміжків між гранулами ПС

Розмір гранул ПС, см	Φ , кг/м ²
1÷1,5	7,0
1,5÷2,5	9,0
2,5÷4,0	13,0

Як видно з наведених даних, суцільний шар гелю можна сформувати на поверхні шару гранульованого ПС, за умови питомої поверхневої витрати гелю в 5÷10 разів більше, ніж на гладкій поверхні. У зв'язку з тим, що густина гелю ~ в 10 разів більше насипної густини ПС, виникає питання про товщину шару ПС всієї системи «ПС + гель» для забезпечення її плавучості.

2.8 Визначення плавучості системи «суцільний шар гелю на поверхні шару гранульованого піноскла»

В якості ГР для дослідження плавучості системи «суцільний шар гелю на поверхні шару гранульованого піноскла» були обрані: бензин, гас та дизельне паливо. В якості легкого носія були обрані три фракції гранул піноскла: (1÷1,5) см, (1,5÷2,5) см та (2,5÷4,0) см.

Експеримент проводився аналогічно дослідам з визначення плавучості шару піноскла (параграф 2.6). Для імітації впливу шару гелю була використана кругла пластикова пластина, вирізана за розмірами скляної ємності, навантажена масою, що відповідає масі ізолюючого шару гелю. В досліді також визначали максимальну вагу вантажу, за якого рівень рідини не перевищує верхнього шару піноскла. Загальна висота шару піноскла склала 10 см.

Експеримент показав, що 10 см шару сухого піноскла із розміром гранул (1÷1,5) см достатньо, щоб забезпечити плавучість на поверхні гасу й дизельного пального суцільного шару гелю. Шару піноскла товщиною 15 см з розміром гранул (1÷1,5) см достатньо, щоб забезпечити плавучість бінарного шару у всіх трьох видах палива. Шар піноскла товщиною 15 см з розміром гранул (1,5÷2,5) см виявився достатнім, щоб забезпечити плавучість у гасі й дизельному пальному суцільного шару гелю. В інших випадках за товщин шару ПС 10 й 15 см плавучість всієї системи «гель + ПС» не забезпечується.

2.9 Визначення можливостей унесення гранул піноскла висхідними конвекційними потоками вогнища пожежі

Під час подавання ПС у вогнище пожежі воно потрапляє у зону висхідних конвекційних потоків гарячих газів. Це призводить до можливості знесення ПС цими потоками, що може зумовити суттєві втрати ВР. Такі процеси мають місце у разі використання вогнегасних пін, порошкових вогнегасних засобів і розпиленої води. Відповідні втрати суттєво впливають на коефіцієнт використання ВР [237].

Розглянемо процес вільного падіння гранул ПС у висхідному конвекційному потоці. Схожа задача розглядається в роботах [237–238]. Приймемо, що гранули ПС мають сферичну форму, а повітря має таку ж густину, як і за нормальних умов. Умовою напрямку руху гранули ПС вниз у висхідному потоці є перевищення сили тяжіння ($F_T = mg$) над силою аеродинамічного опору (F_0):

$$F_T > F_0. \quad (2.12)$$

Сила аеродинамічного опору залежить від швидкості потоку газу. Кількісне значення швидкості газового потоку було обрано як найбільше значення швидкості висхідного потоку над осередком горіння бензину за літературними даними [239]: 2,6 м/с. За такої швидкості можна знехтувати силою тертя. Тоді залишиться лише складова аеродинамічного опору. В такому випадку нерівність (2.12) набуде вигляду:

$$mg > 0,5 \cdot c \cdot \rho_{\text{п}} \cdot v^2 \cdot S, \quad (2.13)$$

де m – маса гранули піноскла; g – прискорення вільного падіння; c – коефіцієнт форми тіла (для кулі дорівнює 0,47); $\rho_{\text{п}}$ – густина повітря; v – швидкість висхідного потоку; S – площа поперечного перерізу гранули.

Для сферичної форми гранули отримаємо:

$$\frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{\text{пс}} \cdot g > \frac{0,47 \cdot \rho_{\text{п}} \cdot v^2 \cdot \pi \cdot r^2}{2}, \quad (2.14)$$

де r – радіус сферичної гранули піноскла; $\rho_{\text{пс}}$ – густина піноскла.

Якщо врахувати, що $\rho_{\text{пс}} = 140 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{п}} = 1,29 \text{ кг/м}^3$, $v = 2,6 \text{ м/с}$, то отримаємо бажаний радіус гранули, що забезпечить її падіння у цьому потоці: $r > 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 1,2 \text{ мм}$.

Це означає, що обрані раніш розміри гранул ПС (від 1 до 4 см) задовольняють вимогам стосовно неможливості унесення його конвекційними потоками, що викликаються горінням горючих рідин, які зберігаються в резервуарі.

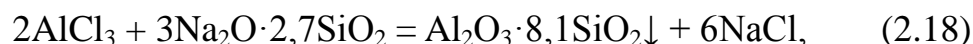
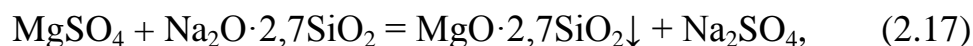
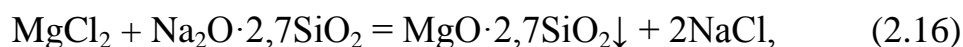
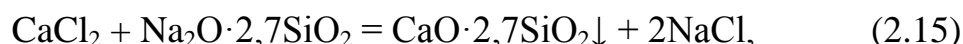
Ці результати було перевірено експериментально. Для створення повітряного потоку було використано побутовий вентилятор. Швидкість повітряного потоку вимірювалась за допомогою анемометра У1.1. Регулювання швидкості повітряного потоку проводилось дискретною зміною швидкості обертання вентилятора. Досліди проводились для швидкості повітряного потоку $(2,5 \div 3) \text{ м/с}$. Гранульоване ПС висипалось зверху на працюючий вентилятор. Для всіх розмірів гранул ПС не спостерігалось унесення його повітряним потоком.

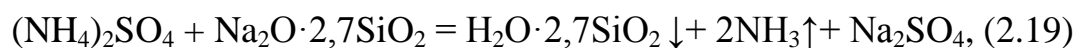
Тобто для обраних розмірів гранул ПС не відбувається знесення часток повітряними потоками зі швидкостями, характерними для процесу горіння рідин.

2.10 Аналіз екологічних параметрів ГУС та їх компонентів

Ще одним питанням, яке на сьогодні набуває все більшої актуальності, є вплив компонентів запропонованих вогнегасних систем на навколишнє середовище. Розглянемо спочатку вплив гелеутворюючих систем (ГУС) на навколишнє середовище. Вплив на абіотичну та біотичну складові екосистем можуть справляти як вихідні компоненти ГУС, так і кінцеві продукти.

З точки зору забезпечення екологічної безпеки навколишнього середовища доцільним є застосовувати компоненти ГУС в еквівалентних кількостях, оскільки після процесу гасіння необхідно утилізувати використані вогнегасні речовини. Типові реакції гелеутворення протікають наступним чином:





Як видно з наведених даних, у разі використання стехіометричних концентрацій компонентів ГУС, крім нерозчинних у воді силікатів металів або гелю кремнієвої кислоти, утворюються: хлорид натрію, сульфат натрію та аміак (для солей амонію). Гелеутворення полісилікату натрію спричиняють K_2CO_3 та NaCl з утворенням кремнієвої кислоти й гідроксиду натрію.

У табл. 2.7 наведено основні продукти взаємодії між гелеутворювачем і каталізатором гелеутворення для деяких з досліджуваних систем, в тому числі з NaCl . У таблиці також наведено значення мінімальних концентрацій компонентів ГУС, які були визначені раніше [227].

Таблиця 2.7 – Значення мінімальних концентрацій та мінімальних стехіометричних концентрацій компонентів гелеутворюючої системи та склад продукту їх взаємодії

№	Каталізатор гелеутворення	Основні продукти реакції	ω_1 , %	ω_2 , %	стех. ω_1 , %	стех. ω_2 , %
1.	CaCl_2	$\text{CaO} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{NaCl}$	3	3	6	3
2.	MgCl_2	$\text{MgO} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{NaCl}$	5	4	9,5	4
3.	MgSO_4	$\text{MgO} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4$	5	4	7,5	4
4.	FeSO_4	$\text{FeO} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4$	4	4	6	4
5.	K_2CO_3	$\text{H}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{CO}_3 + \text{NaOH}$	25	40	–	–
6.	AlCl_3	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8,1\text{SiO}_2 + \text{NaCl}$	3,5	3	7,5	3
7.	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4$	4	3	6	3
8.	NH_4Cl	$\text{H}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{NaCl} + \text{NH}_3$	8	8	17	8
9.	NH_4Br	$\text{H}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{NaBr} + \text{NH}_3$	8	10	11,5	10
10.	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	$\text{H}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{NH}_3$	8	12	20	12
11.	AlBr_3	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{NaBr}$	3	4	5	4
12.	NaCl	$\text{H}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2 + \text{NaCl} + \text{NaOH}$	20	20	–	–

На підставі цих даних були розраховані мінімальні концентрації та стехіометричні концентрації гелеутворювача (полісилікату натрію) (ω_1 та стех. ω_1) й каталізатора гелеутворення (ω_2 та стех. ω_2). У разі використання мінімальних концентрацій компонентів у надлишку знаходяться каталізатори гелеутворення та утворюється відповідна сіль.

Маси відповідних розчинних речовин, розраховані на підставі стехіометрії реакції отримання досліджуваних ГУС, наведені в табл. 2.8.

Вказані компоненти, за умови потрапляння в навколишнє середовище, впливають не лише на здоров'я людини [240], а й на інші живі організми. Дослідження екологічних властивостей ГУС проведено шляхом порівняльного аналізу екологічних характеристик речовин, які можуть потрапляти в навко-

лише середовище у разі використання зазначених в табл. 2.7 компонентів гелутворення. В залежності від стехіометричності реакції ними можуть виступати як вихідні речовини, так і продукти реакції.

Таблиця 2.8 – Значення мас розчинних продуктів реакції ГУС із розрахунку на 100 кг системи для мінімальних і стехіометричних концентрацій компонентів

№	Мінімальні концентрації		Стехіометричні концентрації	
	Розчинні речовини	маси, кг	Розчинна речовина	маса, кг
1.	CaCl ₂ ; NaCl	0,8; 1,3	NaCl	1,6
2.	MgCl ₂ ; NaCl	1,0; 1,3	NaCl	2,4
3.	MgSO ₄ ; Na ₂ SO ₄	0,7; 1,6	Na ₂ SO ₄	2,0
4.	FeSO ₄ ; Na ₂ SO ₄	0,7; 1,3	Na ₂ SO ₄	1,8
5.	K ₂ CO ₃ ; NaOH	20; 4,5	–	–
6.	AlCl ₃ ; NaCl	0,8; 0,9	NaCl	2,0
7.	Al ₂ (SO ₄) ₃ ; Na ₂ SO ₄	0,5; 1,3	Na ₂ SO ₄	1,9
8.	NH ₄ Cl; NaCl	2,1; 2,1	NaCl	4,4
9.	NH ₄ Br; NaBr	1,5; 3,7	NaBr	5,3
10.	(NH ₄) ₂ SO ₄ ; Na ₂ SO ₄	3,6; 2,5	Na ₂ SO ₄	6,5
11.	AlBr ₃ ; NaBr	0,8; 1,4	NaBr	2,4
12.	NaCl; NaOH	10,0; 3,6	–	–

В роботі використано декілька підходів для дослідження екологічних характеристик ГУС, які запропоновано застосовувати для гасіння нафтопродуктів.

2.10.1 Дослідження екологічних властивостей ГУС за впливом на організми

Якщо розглядати ГУС як сукупність хімічних компонентів, то можна оцінювати їх екологічні властивості за дією на живі організми [32–37]. В Європейському Союзі на законодавчому рівні впроваджено регламент REACH (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals), в якому регламентується регулювання, виробництво, розміщення на ринку і використання різних хімічних речовин. Він запропонований з метою поліпшення захисту навколишнього середовища та здоров'я людини [240]. Спираючись на цей підхід, сучасні системи з пожежогасіння, що містять певний набір хімічних компонентів, повинні мати певні екологічні властивості, щоб відповідати вимогам REACH [37].

Під час дослідження спиралось на дані Європейської комісії з пестицидів (EU Pesticides database) [241], дані щодо паспорту безпеки матеріалу [242], базу даних PubChem (системи, яка підтримується Національним центром біотехнологічної інформації, компонентом Національної медичної бібліотеки, що входить до складу Національних інститутів охорони здоров'я США) [243], інформацію про хімічні речовини Європейського агентства з хімічних речовин (офіційний орган ЄС, який відповідає за впровадження REACH) [244]. Для порівняльної оцінки використовували дані щодо індивідуальних речовин, оскільки

для розчинів сполук вказані менш жорсткі обмеження, ніж для чистих речовин або гідратів. Внаслідок того, що частина досліджуваних речовин може мати гідратовану і зневоднену форми, у процесі розглядання характеристик враховували максимально небезпечні показники речовин.

Як видно з наведених даних, такі речовини як $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NaBr становлять найбільшу небезпеку для навколишнього середовища. FeSO_4 , Na_2SO_4 , CaCl_2 є небезпечними за умов довготривалого впливу.

Далі було проведено більш детальний порівняльний аналіз екологічних та екотоксикологічних властивостей можливих продуктів реакції утворення гелевих систем, які можуть потрапити в навколишнє середовище, з урахуванням стехіометричності реакції (табл. 2.8). Використовували дані, представлені в коротких профілях (Brief Profiles) відповідних речовин за даними Європейського агентства з хімічних речовин [245]. Згідно зі світовими тенденціями гармонізації класифікацій хімічних речовин [246], обов'язковою характеристикою при маркуванні хімічної речовини повинен бути опис її екологічної небезпеки. Як характеристики використовувалися гостра водна токсичність, хронічна водна токсичність, біонакопичувальний потенціал та здатність до розкладання. Також як характеристику використовували величину прогнозованої безпечної концентрації (predicted no effect concentration – PNEC) – концентрації речовини, нижче якої не очікується негативних впливів на навколишнє середовище.

Не зважаючи на те, що залежно від методології визначення і вихідного набору даних, значення PNEC можуть варіювати в достатньо широкому діапазоні й навіть відрізнятися між собою на декілька порядків для однієї речовини [247]. Слід зазначити, що співставлення даних ускладнюється способом їх подання. Так, для екологічних характеристик речовин використовуються летальна концентрація (lethal concentration – LC), максимальна спостережувана недіюча концентрація (no observed effect concentration – NOEC), мінімальна спостережувана діюча концентрація (low estobserve deffect concentration – LOEC), ефективна концентрація для $X\%$ -го ефекту (concentration associated with $X\%$ response – EC_x). Однак оскільки інформація являє собою підсумовування автоматично оброблених даних, що надходять до Європейського агентства з хімічних речовин, то якість і правильність інформації залишається за авторами представлених даних. Це пояснює розбіг в наведених значеннях і також ускладнює узагальнення інформації. Умови проведення досліджень за кожною речовиною можуть варіювати. Це також ускладнює співставлення даних. За деякими речовинами та параметрами дані відсутні.

Як видно з представлених даних, згідно PNEC, найбільш небезпечними є MgCl_2 , NH_4Br , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, Na_2SO_4 , NaBr , NaCl , AlCl_3 . Однак PNEC не може виступати єдиною достовірною характеристикою екологічної небезпеки речовин. Згідно з отриманих даних, найбільшу небезпеку, за умови короткострокового та/або довгострокового впливу на водні й поверхневі організми, справляють такі речовини як AlCl_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, NH_4Cl , NH_4Br .

Відсутність даних для FeSO_4 та K_2CO_3 ускладнює можливість їх екологічної оцінки. Однак відзначається короткочасна токсичність K_2CO_3 (LC_{50} (4

доби) 68 мг/л) для риб. З огляду на те, що потрібна значна кількість K_2CO_3 для утворення ГУС (табл. 2.7), необхідність його використання лімітується економічним фактором. Для NaOH дані практично відсутні, проте наголошується на короткочасній токсичності для водних безхребетних (EC_{50} (48 годин) 40,4 мг/л).

За умови, що трактування PNEC може бути неоднозначним, $MgCl_2$ і $CaCl_2$ є найбільш зручними з екологічної точки зору в пожежогасінні нафтопродуктів у разі застосування ГУС. При використанні ГУС на базі NaCl лімітуючим фактором є утворення NaOH (табл. 2.8), який, як відмічалось вище, проявляє короткочасну токсичність для водних безхребетних.

Таким чином, враховуючи вищезазначене, з розглянутих ГУС з екологічної точки зору найбільш оптимальним є використання систем, утворених хлоридами магнію, кальцію та натрію.

Ще одним привабливим фактором для використання ГУС в гасінні пожеж нафтопродуктів є той факт, що компоненти ГУС є нерозчинними у вуглеводневих горючих рідинах. Отже, компоненти такої вогнегасної системи не забруднюють зазначені рідини, що полегшує їх подальшу переробку і використання.

Оскільки гель у досліджуваних системах тоне в більшості горючих рідин, то безпосередньо використовувати його для гасіння горючих рідин неможливо. Використання легкого носія для шару гелю, на якому він буде формуватися, – гранульованого піноскла [20, 21, 25–31, 34, 36, 37] – зумовило необхідність вивчення екологічних характеристик цього матеріалу. Піноскло є негорючим, нелетким, екологічно безпечним матеріалом, який використовується в житловому будівництві. Згідно даних Європейського агентства з хімічних речовин [249], основний компонент піноскла – оксид кремнію (Siliconoxide) – не класифікується як небезпечна речовина. Після ліквідації пожежі зібраний з поверхні рідкого нафтопродукту шар піноскла після висихання ГУС може використовуватися вдруге, що зумовлює його привабливість з економічної точки зору. При цьому строк зберігання піноскла не лімітований і воно не вимагає спеціальних умов зберігання.

2.10.2 Розрахунок можливого екологічного збитку від застосування ГУС

Розглянемо ще один підхід, пов'язаний з визначенням екологічного збитку, що завдається навколишньому середовищу в разі потрапляння хімічних речовин у водні об'єкти або у ґрунт [32]. Використання ГУС для гасіння нафтопродуктів передбачає наявність у системі як вихідних, так і кінцевих продуктів реакції. Виконання умов стехіометричності, у разі подавання компонентів для створення ГУС, і в даному випадку дозволяє мінімізувати кількість хімічних сполук, які виступають у подальшому забруднювачами навколишнього середовища.

Розрахунок передбачуваного екологічного збитку проводився згідно із затвердженими методиками розрахунку [249–251] з використанням довідкових [252] або фактично визначених даних виходячи з маси забруднюючої речовини, її гранично допустимої концентрації (ГДК), коефіцієнтів безпеки і т.п. [37].

Маси відповідних розчинних речовин були розраховані на підставі стехіометрії реакції й використовувалися в подальшому для розрахунку екологічного збитку (табл. 2.8). Порівнювався розмір можливого екологічного збитку від потрапляння розчинних продуктів реакції різних ГУС у землю і в поверхневі води, за умови забезпечення стехіометричності реакції утворення ГУС.

Розмір збитків від забруднення земель визначається «Методикою визначення розмірів шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через порушення природоохоронного законодавства» (далі – «Методика 1»), згідно з якою кінцева формула для розрахунку екологічного збитку одним компонентом має вигляд [253]:

$$P_3 = A \cdot \Gamma_{\text{оз}} \cdot K_0 \cdot K_{\text{ег}} \cdot \frac{M_i}{T_{\text{зш}} \cdot \Pi_i \cdot I_{\text{п}}}, \quad (2.21)$$

де P_3 – розмір збитків за забруднення земель, грн; A – питомі витрати на ліквідацію наслідків забруднення земельної ділянки, значення якого дорівнює 0,5; $\Gamma_{\text{оз}}$ – нормативна грошова оцінка земельної ділянки, яка зазнала забруднення, грн/м²; K_0 – коефіцієнт небезпечності забруднюючої речовини, значення якого визначається за додатком 1 до «Методики 1»; $K_{\text{ег}}$ – коефіцієнт еколого-господарського значення земель, визначається за додатком 2 до «Методики 1»; $T_{\text{зш}}$ – товща земельного шару, що є розмірною одиницею для розрахунку витрат на ліквідацію забруднення залежно від глибини просочування, $T_{\text{зш}} = 0,2$ м; $I_{\text{п}}$ – індекс поправки до витрат на ліквідацію забруднення залежно від глибини просочування забруднюючою речовиною, визначається за додатком 3 до «Методики 1»; M_i – маса i -ї забруднюючої речовини, т; Π_i – відносна густина забруднюючої речовини, т/м³, визначається за додатком 4 до «Методики 1».

Використання однотипних ГУС дозволяє зробити припущення, що площа забрудненої ділянки для всіх досліджуваних варіантів буде однаковою і значення $K_{\text{ег}}$, $I_{\text{п}}$, $\Gamma_{\text{оз}}$ також будуть однаковими для всіх систем. У загальному випадку розмір збитку від забруднення земель буде визначатися значеннями K_0 , M_i , Π_i .

Припустимо, сталося забруднення промислових земель ($K_{\text{ег}} = 1$), забруднююча речовина проникла на глибину до 0,2 м ($I_{\text{п}} = 0,1$), а нормативна грошова оцінка забруднених земель становить 50 грн/м². Тоді, згідно з даними «Методики 1» і довідковими даними про відносну щільність забруднюючих речовин, отримуємо значення, представлені в табл. 2.9.

Далі для досліджуваних систем, за умови стехіометричності формування ГУС, проведено розрахунок розмірів відшкодування збитків, заподіяних водним об'єктам внаслідок забруднення речовиною у складі продукції чи сировини. Він здійснювався відповідно до «Методики розрахунку розмірів відшкодування збитків, заподіяних державі внаслідок порушення законодавства про охорону та раціональне використання водних ресурсів» (далі – «Методика 2») за формулою [251]:

$$P_v = K_c \cdot K_{\text{кат}} \cdot K_p \cdot \kappa_3 \cdot M_i \cdot y \cdot \frac{1}{\text{ГДК}_i}, \quad (2.22)$$

де P_v – розмір збитків за забруднення водних об’єктів, грн; $K_c = 1,5$ – коефіцієнт, що враховує збільшення шкоди, завданої водній екосистемі за умови самовільного чи аварійного скиду; $K_{\text{кат}}$ – коефіцієнт, що враховує категорію водного об’єкта, який визначається згідно з додатком 2 до “Методики 2”; K_p – регіональний коефіцієнт дефіцитності водних ресурсів поверхневих вод, який визначається згідно з роботи [250] за додатком 3 “Методики 2”; $\kappa_3 = 1,5$ – коефіцієнт ураженості водної екосистеми; M_i – маса скинутої i -ї забруднюючої речовини у водний об’єкт у складі продукції чи сировини, т; y – проіндексований питомий економічний збиток від забруднення водних ресурсів в поточному році відносно 2018 р, $y = 1618,74$ грн/т; ГДК_i – безрозмірна величина, що чисельно дорівнює $\text{ГДК } i$ -ї забруднюючої речовини у воді водного об’єкта відповідної категорії.

В даному випадку також очевидно, що розмір збитку в конкретній ситуації при порівнянні однотипних ГУС, буде визначатися M_i та ГДК_i . Значення K_c , $K_{\text{кат}}$, K_p , κ_3 та y будуть однаковими при розрахунку збитку від різних ГУС в рамках одного водного об’єкта. Припустимо, що сталося забруднення поверхневого водного об’єкта господарсько-побутового використання ($K_{\text{кат}} = 1$), розташованого в Харківській області ($K_p = 1,19$). Тоді, з урахуванням даних «Методики 2» і значень ГДК забруднюючих речовин відповідно до «СанПіН 4630-88» [255], отримаємо значення збитку, зведені в табл. 2.9.

Таблиця 2.9 – Результати розрахунку розміру екологічної шкоди за забрудненням земель, поверхневих вод і сумарного розміру шкоди ($P_{\text{зар}}$), за умови використання ГУС зі стехіометричним вмістом компонентів для пожежогасіння горючих рідин

№ системи	Розчинна речовина	P_3 , грн.	P_v , грн.	$P_{\text{зар}}$, грн.
1	NaCl	13,64	0,20	13,84
2	NaCl	20,45	0,30	20,75
3	Na ₂ SO ₄	23,15	0,17	23,32
4	Na ₂ SO ₄	20,83	0,16	20,99
6	NaCl	17,05	0,25	17,3
7	Na ₂ SO ₄	21,99	0,16	22,15
8	NaCl	37,50	0,54	38,04
9	NaBr	45,17	114855,67	114900,90
10	Na ₂ SO ₄	75,23	0,56	75,79
11	NaBr	20,45	52010,12	52030,57

Як видно з отриманих даних, основний внесок у суму збитку робить забруднення ґрунтів.

Внесок від забруднення водних об’єктів розчинними забруднюючими речовинами проявляється лише в разі дуже низьких значень ГДК цих речовин або

якщо для них не вказане значення ГДК. Згідно «Методики 2» в такій ситуації приймаємо $A = 500$. Зокрема для броміду натрію P_v розраховано при $A = 500$.

З розглянутих систем найменшої екологічної шкоди, за умови забезпечення стехіометричності утворення ГУС, завдають навколишньому середовищу системи на основі карбонату калію і хлориду натрію, потім ідуть системи на основі хлоридів кальцію і магнію.

Розмір збитку визначається, головним чином, масою забруднюючих речовин, що потрапили в навколишнє середовище, і значеннями їх ГДК. Внаслідок цього можна відзначити, що системи з утворенням хлоридів і сульфатів завдають меншого екологічного збитку порівняно із системами на основі бромідів.

Проведений аналіз ГУС на основі гелеутворювача і солей металів (або амонію) дозволив виявити системи, які заподіюють найменшої екологічної шкоди. Так, у разі утворення ГУС слід забезпечити стехіометричність протікання реакції для мінімізації впливу на навколишнє середовище вихідних компонентів суміші. Значні коливання параметрів екологічних характеристик або їх відсутність ускладнюють екологічну оцінку розглянутих ГУС. Виходячи з розглянутих даних, як найбільш екологічно безпечно запропоновано використовувати систему, утворену хлоридами кальцію та магнію.

З порівняльного визначення розрахункових екологічних збитків випливає, що гасіння пожеж горючих рідин слід проводити з використанням ГУС на основі карбонату калію і хлориду натрію, а за їх відсутності – на основі хлоридів кальцію й магнію.

Розрахунок екологічного збитку показав більший негативний економічний ефект від забруднення ґрунтів і, в меншій мірі, – від забруднення поверхневих вод у разі використання ГУС в пожежогасінні. Сума екологічного збитку може сильно коливатися, від 14 до 115 тис. грн. у разі потрапляння в навколишнє середовище передбачуваних розрахункових кількостей компонентів ГУС, і визначається, головним чином, масою, коефіцієнтом небезпеки і ГДК забруднюючої речовини. Розрахунковий передбачуваний розмір екологічного збитку від потрапляння розчинних забруднюючих речовин у ґрунт і поверхневі водні об'єкти при використанні ГУС на основі хлоридів і сульфатів є незначним.

Як легкий носій, що забезпечує плавучість вогнегасного шару гелю на поверхні горючої рідини, запропоновано використовувати гранульоване піноскло, яке не є небезпечним для навколишнього середовища, можливо для повторного використання і має тривалий термін зберігання без необхідності підтримання спеціальних умов.

2.11 Висновки за розділом 2

1. Ефективний вогнегасний засіб для гасіння ГР і ЛЗР повинен мати високі ізолюючі й охолоджуючі властивості.

2. Важливою характеристикою ефективного вогнегасного засобу для гасіння горючих рідин є час його працездатності. Час дії вогнегасної речовини повинен бути не менше 10 хвилин у випадку штучного охолодження й не ме-

нше однієї години – за умови самочинного охолодження.

3. Високі ізолюючі властивості вогнегасного засобу для гасіння рідин дозволяють забезпечити гелеві шари.

4. Плавучість гелевого шару дозволяє забезпечити гранульоване піноскло, одночасно воно сповільнює випаровування рідини, екранує від теплового випромінювання й охолоджує її поверхневий шар.

5. Шар піноскла товщиною 15 см з розміром гранул (1,0÷1,5) см є достатнім, щоб забезпечити плавучість суцільного шару гелю в бензині, гасі й дизельному паливі.

6. Гранульоване піноскло здатне утримувати в зовнішніх порах до 50 % води за масою. Це дозволяє використовувати змочене піноскло в якості вогнегасної речовини з високою охолоджуючою дією.

7. Гасіння рідин з температурою займання більше за 100 °С може бути досягнуте лише за рахунок використання ефекту охолодження верхнього шару рідини. При цьому доцільно в якості речовини з високими охолоджуючими властивостями застосовувати воду, носієм якої є піноскло.

8. Запропоноване для використання в якості носія шару гелю гранульоване піноскло, є безпечним для навколишнього середовища, може повторно використовуватись і має тривалий термін зберігання без необхідності підтримання спеціальних умов.

9. $MgCl_2$ і $CaCl_2$ є найбільш зручними з екологічної точки зору як компоненти ГУС, які використовуються в пожежогасінні нафти та нафтопродуктів.

РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВОГНЕГАСНОЇ СИСТЕМИ «ГЕЛЬ – ПІНОСКЛО»

3.1 Визначення охолоджуючих та ізолюючих характеристик гелеподібного шару

3.1.1 Моделювання ізолюючих властивостей гелеподібного шару по відношенню до пари горючих рідин

Для аналізу ізолюючої дії шару гелю необхідно спочатку оцінити стаціонарне значення потоку пари рідин крізь такий шар. В якості рідин для аналізу можна взяти індивідуальні горючі рідини, що можуть бути наявні у складі рідкого пального. Схема ситуації, що розглядається, зображена на рис. 3.1 [18]: на поверхню рідини нанесено шар гелю (механізм утримання гелю на поверхні рідини поки не розглядається). У такому разі утворюється дві поверхні міжфазних контактів: «рідина – гель» та «гель – повітря».

У зв'язку з малою текучістю гелю перенос пари рідини крізь гель має виключно дифузійний характер. Відповідне рівняння стаціонарного масопереносу в гелевому шарі має вигляд:

$$j_{\mu,w} = \frac{D_w}{h}(c_{w,1} - c_{w,2}), \quad (3.1)$$

де $j_{\mu,w}$ – поверхнева густина молярного потоку пари рідини крізь шар гелю, моль·м⁻²·с⁻¹; D_w – коефіцієнт дифузії парів у гелі, м²·с⁻¹; h – товщина шару гелю, м; $c_{w,1}$ і $c_{w,2}$ – концентрація рідини, що дифундує, на рівні “0” та на рівні “ h ” поверхонь шару гелю, моль·м⁻³ (рис. 3.1).

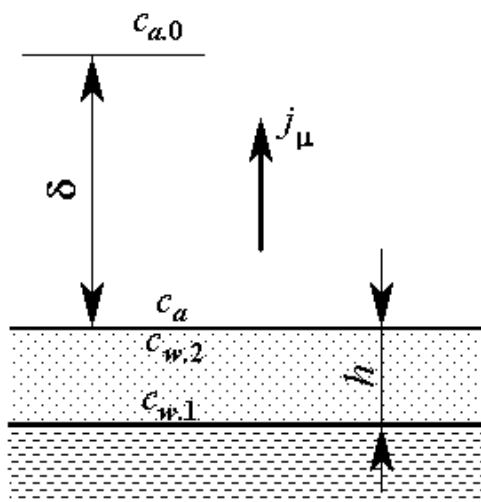


Рис. 3.1 – Просторова схема задачі переносу пари рідини крізь шар гелю

На межі між рідиною та гелевим шаром виконується умова рівноваги фаз, у зв'язку з чим концентрація $c_{w.1}$ пов'язана з рівноважною концентрацією пари поблизу поверхні рідини c_s співвідношенням:

$$c_{w.1} = \frac{c_s}{k_1}, \quad (3.2)$$

де k_1 – коефіцієнт розподілу на межі фаз.

Аналогічна умова рівноваги фаз пов'язує між собою концентрації пари рідини біля поверхні межі гелю з повітрям:

$$c_{w.2} = \frac{c_a}{k_2}, \quad (3.3)$$

де c_a – концентрація пари рідини в повітрі біля межі з гелем, моль·м⁻³; k_2 – коефіцієнт розподілу у відповідній межі (коефіцієнт k_1 є функцією температури, тому в разі ізотермічної дифузії $k_1 = k_2 = k$).

Поверхнева густина молярного потоку пари рідини в повітрі $j_{\mu.a}$ задовольняє рівнянню масовіддачі [256]:

$$j_{\mu.a} = \beta \cdot (c_a - c_{a.0}), \quad (3.4)$$

де $c_{a.0}$ – концентрація пари рідини в повітрі (в ядрі газової фази) на відстанях, що перевищують ширину перехідної області δ β – коефіцієнт масовіддачі пари рідини в повітрі, м·с⁻¹, пов'язаний з шириною перехідної області δ співвідношенням [256]:

$$\beta = \frac{D_a}{\delta}, \quad (3.5)$$

де D_a – коефіцієнт дифузії пари рідини в повітрі, м²·с⁻¹.

У свою чергу ширина перехідної області оцінюється співвідношенням:

$$\delta = \frac{l}{Nu_D}, \quad (3.6)$$

де l – характерний просторовий розмір задачі, м; Nu_D – дифузний критерій Нуссельта (синонімічна назва – критерій Шервуда Sh).

У нестационарному режимі виконується умова $j_{\mu,w} \leq j_{\mu,a}$; рівність досягається лише в разі виходу процесу масопереносу на стаціонарний режим. Тоді спільне розв'язання системи рівнянь (3.1)–(3.5) дозволяє отримати загальний вираз поверхневої густини молярного потоку рідини $j_{\mu,w} = j_{\mu,a} = j_{\mu}$, яке в разі ізотермічної дифузії має вигляд:

$$j_{\mu}(h) = \frac{\beta \cdot (c_s - c_{a,0})}{1 + \frac{\beta \cdot h \cdot k}{D_w}} = \frac{j_{\mu}(0)}{1 + k \cdot \frac{h}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_w}}. \quad (3.7)$$

З формули (3.7) випливає, що нанесення шару гелю зменшує потік пари рідини не менше, ніж в K разів:

$$K = 1 + k \cdot \frac{h}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_w}. \quad (3.8)$$

Максимальний потік (3.7) досягається у стаціонарному режимі, вихід на який відбувається за час, що перевищує характерний час дифузії пари рідини крізь шар гелю:

$$\tau_D = \frac{h^2}{D_w}. \quad (3.9)$$

Для проведення чисельної оцінки параметрів K і τ_D необхідно врахувати те, що властивості гелю, які визначаються, мало відрізняються від відповідних властивостей води [257]. В якості речовини, що дифундує, можна взяти основний компонент бензину – октан. Оцінка буде проводитись для температури 20 °С.

Значення коефіцієнта розподілу k можна отримати на підставі формули (3.2). При цьому для оцінки величини концентрації даної горючої рідини у воді c_w використовується довідкове значення коефіцієнта розчинності октану k_m [258], а для оцінки концентрації його насиченої пари c_s – емпірична формула Антуана:

$$\lg p_s = A - \frac{B}{t + C}, \quad (3.10)$$

де A , B , C – константи Антуана; t – температура за шкалою Цельсія, яка визначає тиск насиченої пари p_s , кПа, з подальшим перерахуванням його в концентрацію на основі рівняння стану ідеального газу.

Так, для обраної горючої рідини $k_m = 1,5 \cdot 10^{-5}$ грам октану на грам води. Такій розчинності відповідає наступна концентрація октану у воді:

$$c_w = \frac{k_m \cdot \rho_w}{\mu} = 0,13. \quad (3.11)$$

В оцінці (3.11) використані наступні вихідні дані: низьке значення розчинності ($k_m \ll 1$); значення густини води $\rho_w = 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ та молярної маси октану $\mu = 114 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

Константи Антуана з рівняння (3.10) для октану мають значення: $A = 6,094$, $B = 1379,6$, $C = 211,9$. Відповідний розрахунок для температури $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ дає тиск насиченої пари $p_s = 1,40 \text{ кПа}$. Такому тиску для стану ідеального газу відповідає концентрація:

$$c_s = \frac{p_s}{R \cdot T} = 0,57 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (3.12)$$

де R – універсальна газова стала, $R = 8,314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; T – абсолютна температура пари рідини, К.

Використовуючи результати розрахунків (3.11–3.12), можна отримати оцінку коефіцієнта розподілу октану за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$k = \frac{c_s}{c_w} = 4,4. \quad (3.13)$$

Коефіцієнт дифузії D_w будемо оцінювати за формулою коефіцієнта дифузії броунівської частинки (для молекули октану) в рідині (у воді – як рідкій складовій гелю):

$$D_w = \frac{k_B \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \rho_w \cdot \nu_w \cdot r_0}, \quad (3.14)$$

де величина k_B – стала Больцмана, $k_B = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$; ν_w – коефіцієнт кінематичної в'язкості води, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; r_0 – ефективний радіус частинки, що дифундує, м.

Враховуючи те, що за температури $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ довідкове значення коефіцієнта кінематичної в'язкості води $\nu_w = 1,005 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, а оціночне значення $r_0 = 3,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, то з виразу (3.14) коефіцієнт дифузії молекули октану у воді буде становити $D_w = 5,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Коефіцієнт дифузії пари октану в повітрі можна визначати з використанням емпіричного співвідношення:

$$D_a = D_{a.0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^2, \quad (3.15)$$

де T_0 – значення температури середовища за нормальних умов, $T_0 = 273$ К;
 $D_{a.0}$ – значення коефіцієнта дифузії за температури T_0 .

Для октану довідкове значення коефіцієнта дифузії за температури T_0 становить $D_{a.0} = 5.5 \cdot 10^{-6}$, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, відповідно для температури 20 °С цей параметр набуває значення $D_a = 6.3 \cdot 10^{-6}$ $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

З врахуванням отриманих значень величин k , D_w , D_a , на підставі формул (3.8) та (3.6), оцінку мінімального значення коефіцієнта зменшення потоку шаром гелю можна здійснити за співвідношенням:

$$K = 1 + 5,0 \cdot 10^4 \cdot \frac{h}{\delta} = 1 + 5,0 \cdot 10^4 \cdot Nu_D \cdot \frac{h}{l}. \quad (3.16)$$

Оскільки мінімальне значення $Nu_D \sim 1$, то зі співвідношення (3.16) отримаємо, що за характерних розмірів поверхонь $l \sim 10$ м гальмуюча дія гелевого шару для процесу випаровування є ефективною вже за його товщини $h \sim 1$ мм навіть у стаціонарному режимі. Для шару гелю товщиною $h = 2 \cdot 10^{-3}$ м коефіцієнт уповільнення випаровування становить вже 11.

Згідно зі співвідношенням (3.9,) вихід на це мінімальне значення коефіцієнта сповільнення випаровування (3.16) відбудеться за час, що перевищує:

$$\tau_D = 1,8 \cdot 10^3 \cdot h^2, \text{ с}, \quad (3.17)$$

де h – товщина гелевого шару, мм.

Це означає, що вихід процесу випаровування октану крізь шар гелю на стаціонарний режим за товщини гелевого шару 2 мм відбудеться за 2 години.

Таким чином, математичне моделювання процесу випаровування горючої рідини крізь шар гелю, який нанесено на поверхню певного газопроникного носія, показало, що процес випаровування сповільнюється зі зростанням товщини гелеподібного шару та зменшенням коефіцієнта дифузії молекул горючої рідини у цьому шарі. Гальмуюча дія гелевого шару по відношенню до процесу випаровування октану є ефективною починаючи з товщини даного шару $h \sim 1$ мм.

3.1.2 Експериментальне визначення ізолюючих властивостей гелевих шарів

На цей час методики визначення кількісних характеристик ізолюючих властивостей вогнегасних засобів [19, 22, 23, 30, 31, 259–260] були розроблені лише для пін. Найбільш докладно це питання розглянуто в роботі [261]. На-

ведені дані показують, що піни на основі перфторованих піноутворювачів мають більш високі ізолюючі характеристики по відношенню до пари горючих рідин, ніж піни на основі нефторованих ПУ. При цьому встановлено, що максимальний час захисної дії цих пін становить не більше 30 хвилин. Однак слід зауважити, що розроблені експериментальні методики дослідження ізолюючих властивостей пін не придатні для дослідження зазначеної характеристики гелевих шарів.

Для оцінки ізолюючих властивостей гелевих шарів по відношенню до пари ГР та ЛЗР був розроблений експрес-метод. В якості рідин було обрано горючі рідини різних гомологічних рядів: спирти (метанол, ізопропанол, ізопентанол); галогенпохідна вуглеводнів (1,2-дихлоретан); ароматична сполука (бензин); суміш насичених, ненасичених та ароматичних вуглеводнів (бензин). Для отримання шару гелю були використані наступні ГУС: $\text{CaCl}_2(5\%) + \text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2(5\%)$, $\text{CaCl}_2(10\%)+\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2(10\%)$, $\text{CaCl}_2(20\%) + \text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2(20\%)$, які виявили високі ізолюючі властивості у процесі гасіння пожеж класу «А» [227].

На першому етапі дослідження було вивчено швидкість випаровування рідин з вільної поверхні (табл. 3.1). Для цього 70 мл рідини було залито в чашку Петрі з внутрішнім діаметром 9,4 см. Після цього гравіметричним методом проводилось визначення втрати маси за одну годину. Визначення зміни маси здійснювалось за допомогою електронних ваг ТНВ.600, які забезпечують точність вимірювання $\pm 0,01$ г. Вимірювання проводилися за температури $(20\pm 1,5)^\circ\text{C}$. Відповідні середні значення маси рідини, що випарувалася (Δm_1), було отримано за результатами трьох паралельних дослідів.

Таблиця 3.1 – Характеристика випаровування рідин з вільної поверхні та крізь шар гелю

Рідина	Розчинність у воді, % мас	Δm_1 , г	Δm_2 , г	Φ , г/см ²	K
ГУС $\text{CaCl}_2(10\%)+\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2(10\%)$					
бензин	~0	16,02	0,58	0,13	27,6
ізопропанол	необмежена	2,03	1,28	0,13	1,6
ізопентанол	2,7	2,63	1,08	0,14	2,4
метанол	необмежена	4,92	1,90	0,13	2,6
1,2-дихлоретан	0,86	5,71	0,63	0,14	9,1
бензен	0,18	5,75	0,17	0,14	33,8
ГУС $\text{CaCl}_2(5\%)+\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2(5\%)$					
бензин	~0	16,02	0,60	0,14	26,7
бензен	0,18	5,75	0,17	0,14	33,8
ГУС $\text{CaCl}_2(20\%)+\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2(20\%)$					
бензин	~0	16,02	0,57	0,14	28,1
бензен	0,18	5,75	0,16	0,13	35,9

Результати цього дослідження та наступного (з нанесенням шару гелю) наведені в табл. 3.1 за характеристиками: розчинність рідин у воді; маса рідини,

що випарувалась з вільної поверхні (Δm_1); маса рідини, що випарувалась крізь шар гелю (Δm_2); поверхнева витрата гелю (Φ) та коефіцієнт уповільнення випаровування (K).

Вивчення процесу випаровування рідин крізь шар гелю спочатку було здійснено без його нанесення на тонку сітку з нержавіючої сталі. Далі сіткою з нанесеним гелем накривалася чашка Петрі з попередньо зваженою кількістю горючої легколеткої рідини. Через одну годину сітку знімали з чашки Петрі та за втратою маси розраховували масу рідини, що випарувалась (Δm_2). Також ваговим методом визначали масу гелю, який рівномірним шаром був нанесений на сітку. На підставі цих даних можна розраховувати поверхневу витрату гелю за співвідношенням:

$$\Phi = m_{\text{гел}} / S, \quad (3.18)$$

де S – площа сітки; $m_{\text{гел}}$ – маса гелю, який було нанесено на сітку в досліді.

У попередніх дослідах встановлено, що суцільний шар гелю на рівній поверхні утворюється за поверхневої витрати не менше $0,12 \text{ г/см}^2$. Тому для подальших експериментів було обрано значення поверхневої витрати гелю ($0,13 \div 0,14$) г/см^2 . На підставі отриманих результатів можна розрахувати коефіцієнт уповільнення випаровування за співвідношенням:

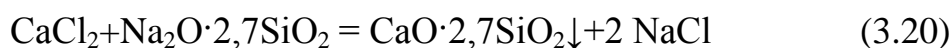
$$K = \Delta m_1 / \Delta m_2. \quad (3.19)$$

У табл. 3.1 наведено отримані результати: маса рідин, що втрачена крізь шар гелю за одну годину випробувань; поверхнева витрата гелю; коефіцієнт уповільнення випаровування; розчинності досліджених рідин у воді.

Аналіз наведених експериментальних даних дозволяє зробити висновок, що найбільші ізолюючі властивості гелевий шар проявляє по відношенню до речовин, які погано розчиняються у воді (бензен та бензин). Зі збільшенням розчинності ізолюючі властивості гелю зменшуються, наприклад для 1,2-дихлоретану. Найменший коефіцієнт уповільнення випаровування з досліджених рідин спостерігається для спиртів.

Оскільки у більшості випадків на практиці використовуються ГР класу вуглеводнів, основну увагу в дослідженнях було приділено ефективності гальмування випаровування бензину та бензену. Як видно з даних експерименту, для цих рідин коефіцієнт уповільнення випаровування мало змінюється зі складом гелю. Тому в подальшому був використаний гель з найменшим вмістом гелеутворювача й каталізатора гелеутворення, тобто ГУС зі складом $\text{CaCl}_2(5\%) + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2(5\%)$.

Для пояснення отриманих результатів необхідно оцінити коефіцієнти дифузії розглянутих речовин в рідкій фазі гелю та їх розчинність у ній [18]. Для цього потрібно визначити склад гелю. Відповідно необхідно спочатку визначити вміст рідкої та твердої фаз у гелі. На підставі стехіометрії реакції:



можна розрахувати масову частку твердого каркасу гелю, хлориду натрію та хлориду кальцію, який знаходиться в надлишку, в порівнянні з рідким склом. Відповідні дані наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Склад гелю, отриманого з ГУС $\text{CaCl}_2(5\%) + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2(5\%) + 2,7\text{SiO}_2(5\%)$.

Параметр	Речовина			
	CaCl_2	$\text{CaO} \cdot 2,7\text{SiO}_2$	NaCl	H_2O
агрегатний стан	рідка	тверда	рідка	рідка
вміст, мас. %	1,3	2,35	1,35	95

Таким чином, можна зробити висновок, що тверда фаза, з якої побудований каркас гелю, складає всього 2,35 % за масою або 0,85 % за об'ємом (густина полісилікатів кальцію дорівнює $\sim 2800 \text{ кг/м}^3$). Незначний вміст твердої фази у складі гелю вказує на те, що коефіцієнти дифузії речовин, розчинених у ньому будуть мати близькі значення до відповідних показників для водних розчинів [257]. Невеликі концентрації хлориду кальцію і натрію в рідкій фазі також не приводять до істотної зміни коефіцієнтів дифузії та розчинності розглянутих речовин у гелеподібному шарі. Звідси випливає, що ізолюючі властивості гелю будуть близькими до ізолюючих властивостей такого ж за товщиною шару води.

На підставі результатів з моделювання ізолюючих властивостей гелеподібного шару по відношенню до пари горючих рідин, що наведено в розд. 3.1.1 та роботі [18], можна зробити висновок, що збільшення ізолюючих властивостей гелевих шарів можна здійснити наступними шляхами:

- збільшенням товщини шару;
- введенням до складу композиції речовин, що зменшують розчинність горючих рідин у воді;
- підвищенням в'язкості рідкої фази гелю;
- збільшенням частки твердої фази у складі гелю.

Таким чином, суцільні гелеподібні шари зменшують швидкість випаровування горючих органічних рідин. Найбільші ізолюючі властивості гелеві шари виявляють по відношенню до рідин, що погано розчинні у воді. Для вуглеводневих рідин коефіцієнт уповільнення випаровування мінімально можливого суцільного шару гелю становить $\sim (26 \div 35)$. Склад гелю мало впливає на ізолюючі властивості шару гелю по відношенню до вуглеводневих рідин. Для збільшення ізолюючих властивостей гелевих шарів необхідно: збільшити їх товщину; ввести до складу системи речовини, які знижують розчинність та збільшують в'язкість; збільшити вміст твердої фази у складі гелю.

Наступним кроком дослідження було визначення температурної залежності щодо гальмування процесу випаровування горючих рідин гелевим ша-

ром. Для цього було проведено експериментальні дослідження ізолюючих властивостей гелевих шарів по відношенню до пари горючих рідин за різної товщини шару гелю та за різних температур. Одночасно визначали зміну ізолюючих властивостей шару гелю в часі.

В якості досліджуваних рідин були обрані горючі рідини різних гомологічних рядів: ізопропанол, 1,2-дихлоретан, бензен та бензин (АІ-92). Для отримання шару гелю було використано ГУС $\text{CaCl}_2(5\%) + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2(5\%)$, яка виявила високі ізолюючі властивості по відношенню до пари різних неполярних та малополярних рідин.

Визначення коефіцієнта уповільнення випаровування здійснено для температур 15 °С, 20 °С й 25 °С та поверхневих витрат гелю – 0,13, 0,25 та 0,4 г/см². Встановлення стабільності дії шару гелю в часі проводилось за результатами порівняння коефіцієнтів уповільнення випаровування відразу після нанесення гелю (K_1) та через 24 години (K_{24}). Отримані значення коефіцієнтів уповільнення випаровування (K_1 і K_{24}) для досліджених рідин за різних температур (t) (K_1 , K_{24}) для різних поверхневих витрат гелю (Φ) наведені в таблицях 3.3–3.6.

Таблиця 3.3 – Коефіцієнти уповільнення випаровування бензену в часі

$t, ^\circ\text{C}$	Поверхнева витрата гелю, Φ , г/см ²					
	0,13 г/см ²		0,25 г/см ²		0,40 г/см ²	
	K_1	K_{24}	K_1	K_{24}	K_1	K_{24}
15	29	15	33	23	37	32
20	34	16	36	24	37	30
25	33	14	35	24	38	30

Таблиця 3.4 – Коефіцієнти уповільнення випаровування бензину (АІ-92) в часі

$t, ^\circ\text{C}$	Поверхнева витрата гелю, Φ , г/см ²					
	0,13 г/см ²		0,25 г/см ²		0,40 г/см ²	
	K_1	K_{24}	K_1	K_{24}	K_1	K_{24}
15	30	11	35	19	37	28
20	28	10	33	20	37	29
25	31	9,5	34	18	34	26

Таблиця 3.5 – Коефіцієнти уповільнення випаровування 1,2-дихлоретану в часі

$t, ^\circ\text{C}$	Поверхнева витрата гелю, Φ , г/см ²					
	0,13 г/см ²		0,25 г/см ²		0,40 г/см ²	
	K_1	K_{24}	K_1	K_{24}	K_1	K_{24}
15	11	5,3	12	7,7	14	12
20	9,1	4,2	11	7,8	12	11
25	9,7	4,6	12	8,4	14	12

Таблиця 3.6 – Коефіцієнти уповільнення випаровування ізопропанолу в часі

$t, ^\circ\text{C}$	Поверхнева витрата гелю, Φ , г/см ²					
	0,13 г/см ²		0,25 г/см ²		0,40 г/см ²	
	K_1	K_{24}	K_1	K_{24}	K_1	K_{24}
15	1,8	1,4	2,6	2,0	2,8	2,6
20	1,6	1,4	2,5	1,8	2,9	2,7
25	1,7	1,3	2,8	2,1	2,7	2,6

Таким чином, ще одним важливим результатом дослідження є встановлення факту зменшення ізолюючих властивостей гелю з часом. Причому зі зростанням товщини шару гелю це зменшення коефіцієнта уповільнення випаровування з часом є істотним для тонких шарів гелю і невеликим для більш товстих шарів. Останній факт допомагають пояснити візуальні спостереження за шаром гелю. У всіх випадках, крім ізопропанолу, для тонких шарів ($\Phi = 0,13$ г/см²) спостерігається розтріскування шару гелю за рахунок його висихання. Для середньої товщини шару гелю ($\Phi = 0,25$ г/см²) розтріскування шару вже невелике. Відповідно для найбільшої товщини шару гелю ($\Phi = 0,40$ г/см²) протягом 24 годин розтріскування шару не спостерігалось.

Факт відсутності розтріскування шару гелю над ізопропанолом пояснюється необмеженою розчинністю цього спирту у водній фазі гелю. Це призводить до того, що частина води, що випарувалася з шару гелю, заміщається рідким ізопропанолом.

Необхідно відзначити, що зміна температури гелю в інтервалі (15÷25)°C слабо впливає на коефіцієнт уповільнення випаровування, що пов'язано з тим, що підвищення температури одночасно збільшує швидкість випаровування рідини з вільної поверхні та швидкість її проникнення крізь шар гелю.

Таким чином, гелеподібні шари зменшують швидкість випаровування горючих рідин. Температура слабо впливає на коефіцієнт уповільнення випаровування. З часом ізолюючі властивості гелевих шарів зменшуються у значній мірі для тонких шарів та у незначній – для товстих шарів.

Важливим є питання про степінь зміни ізолюючої здатності гелів за умови вітрового навантаження, але в літературі відповідні дані відсутні. Є досить багато даних щодо впливу швидкості повітряного потоку на швидкість випаровування рідин з вільних поверхонь [262–264]. Але для випадку наявності ізоляції поверхні рідини з частковим гальмуванням випаровування це питання не розглядалось. Таке становище вимагає проведення експериментальних досліджень з визначення впливу швидкості вітру на ізолюючі властивості гелевих шарів по відношенню до пари горючих рідин. Об'єктами відповідних досліджень було обрано рідкі речовини різних гомологічних рядів, властивості яких без вітрового навантаження вже було досліджено: одноатомний спирт – ізопропанол; галогенпохідний вуглеводень – 1,2-дихлоретан; ароматична сполука – бензен; суміш насичених, ненасичених та ароматичних вуглеводнів – бензин.

Для отримання шару гелю, як і раніше, була використана ГУС $\text{CaCl}_2(5\%) + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2(5\%)$, для якої було досліджено процес випаровування рідин без вітрового навантаження.

Розроблена раніше методика [236] була змінена у зв'язку з тим, що за вітрового впливу на вільну поверхню рідини та за малої висоти вільного борту ємності спостерігалися додаткові втрати рідини (переливання рідини через низький борт). Для усунення цього недоліку було збільшено висоту вільного борту до 1,5 см. В якості ємності для рідини була використана циліндрична посудина з нержавіючої сталі з внутрішнім діаметром 10,6 см та горизонтальним обідком борту шириною 0,7 см. Таким чином, площа «дзеркала» рідини становила 88,2 см², а рівень рідини було забезпечено на 1,5 см нижче верхнього краю ємності.

Попередні результати дослідів показали, що за відсутності повітряного потоку висота борту сильно впливає на швидкість випаровування рідини з вільної поверхні. У той же час встановлено, що за наявності ізолюючого шару гелю над поверхнею рідини швидкість випаровування слабо залежить від висоти вільного борту.

Як і у попередніх експериментах, початкова серія дослідів була спрямована на встановлення швидкості випаровування рідин з вільної поверхні за відсутності повітряного потоку. В ході дослідів визначення втрати загальної маси ємності з рідиною (Δm) проводилось гравіметричним методом протягом 30 хвилин. Зважування здійснювалось за допомогою електронних ваг ТНВ.600, що забезпечують точність вимірювання $\pm 0,01$ г. Вимірювання проводили за температури $(19 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Друга серія дослідів була проведена за аналогічною методикою для чотирьох швидкостей повітряного потоку. На підставі отриманих даних були розраховані швидкості випаровування рідин ($V_{\text{вип}}$) відповідно до співвідношення:

$$V_{\text{вип}} = \frac{\Delta m}{\tau}, \quad (3.21)$$

де τ – час випаровування.

Для дослідження випаровування рідин через шар гелю здійснювалось його попереднє нанесення на тонку сітку з нержавіючої сталі. Дана система розташовувалась на описаній вище циліндричній ємності з досліджуваною рідиною. Плоский ободок зазначеної циліндричної ємності забезпечує збільшення ступеня герметичності на межі «борт–сітка». Так, за 30 хвилин випаровування легколеткого бензину через сітку, покриту газонепроникною металеву фольгою, втрата загальної маси ємності не перевищувала 0,02 г.

Масу шару гелю в умовах рівномірного нанесення на сітку в різних дослідіах контролювали ваговим методом. На підставі отриманих даних розраховували поверхневу масову витрату гелю:

$$\Phi = m_{\text{гел}} / S, \quad (3.22)$$

де S – площа сітки, см²; $m_{\text{гел}}$ – маса гелю, нанесеного на сітку, г.

Попередні досліді показали, що суцільний шар гелю утворюється за пове-

рхневої витрати компонентів ГУС не менше $0,13 \text{ г/см}^2$. Тому в подальшому було обрано поверхневу витрату гелю ($0,13 \pm 0,14$) г/см^2 .

Для створення повітряного потоку було використано побутовий вентилятор. Для вимірювання швидкості повітряного потоку був задіяний анемометр чашковий У1.1. Зміна швидкості повітряного потоку здійснювалась за рахунок дискретної зміни швидкості обертання вентилятора та варіювання відстані між вентилятором і ємністю з рідиною. Вимірювання проводили за відсутності повітряного потоку та його наявності зі швидкостями 1, 2, 3 та 4 м/с.

Під час експериментів проводились візуальні спостереження стану гелевого шару. Вони дозволили встановити, що протягом 3–4 годин вітрового впливу на шар гелю товщиною $\sim 1,2$ мм останній зберігає свою цілісність. Це, у свою чергу, означає, що гель зберігає свої ізолюючі властивості.

Визначення маси рідини, що випарувалась, проводилось за тією ж методикою, що і в дослідженні випаровування з вільної поверхні рідини за відсутності повітряного потоку. Відповідні результати для чотирьох рідин (бензин, дихлоретан, бензен, пропанол-2) наведені на рис. 3.2.

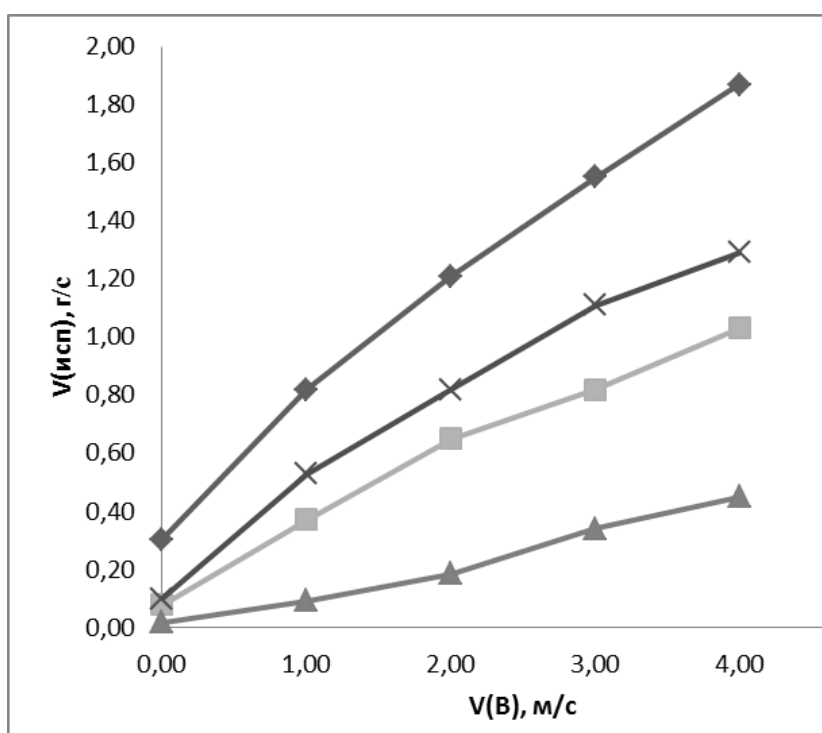


Рис. 3.2 – Залежність швидкості випаровування рідин з вільної поверхні від інтенсивності вітрового навантаження:

◆ – бензин, × – дихлоретан, ■ – бензен, ▲ – пропанол-2

Розраховані значення швидкості випаровування досліджуваних рідин крізь шар гелю з площі випаровування $88,2 \text{ см}^2$ наведені на рис. 3.3.

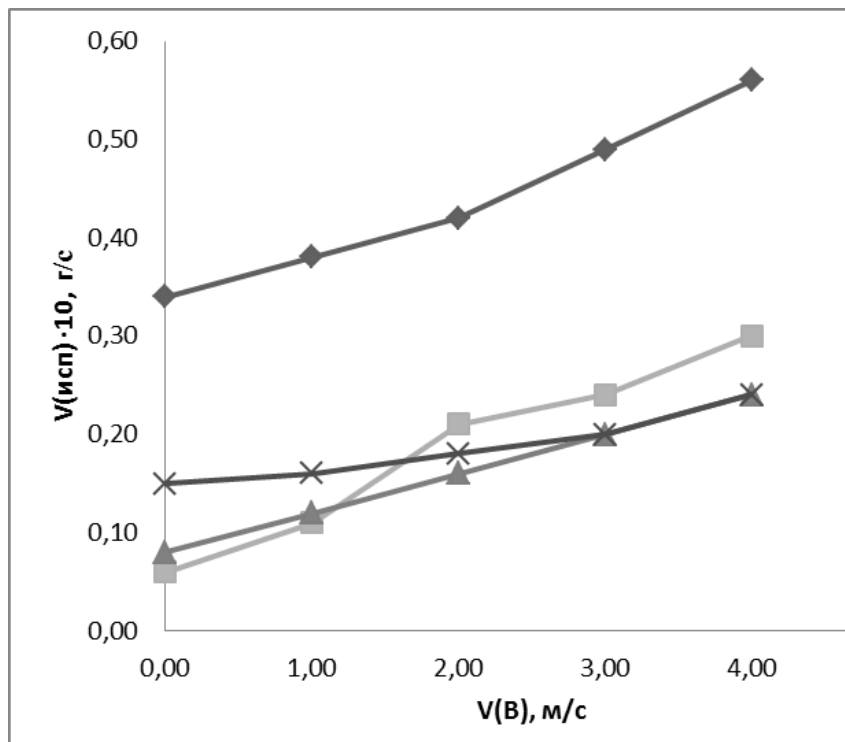


Рис. 3.3 – Залежність швидкості випаровування рідин крізь гелевий шар від інтенсивності вітрового навантаження:

◆ – бензин, × – дихлоретан, ■ – бензен, ▲ – пропанол-2

Виходячи з результатів експерименту, наведених на рис. 3.2, можна зробити висновок, що швидкість випаровування всіх досліджених рідин зростає зі збільшенням швидкості повітряного потоку. Причому характер цієї залежності близький до лінійної. Швидкість випаровування рідин через шар гелю також збільшується зі зростанням швидкості повітряного потоку (рис. 3.3), але відповідне збільшення є значно меншим у порівнянні з випаровуванням з вільної поверхні.

Для встановлення кількісного зв'язку між значенням шару гелю та швидкістю випаровування рідин за різних швидкостей повітряного потоку були розраховані коефіцієнти уповільнення випаровування (K):

$$K = \frac{V_{\text{вип}}}{V_{\text{вип(гел)}}} = \frac{\Delta m}{\Delta m_{\text{гел}}}, \quad (3.23)$$

де $V_{\text{вип}}$ – швидкість випаровування з вільної поверхні; $V_{\text{вип(гел)}}$ – швидкість випаровування крізь шар гелю; Δm , $\Delta m_{\text{гел}}$ – зміна маси рідини в умовах випаровування з вільної поверхні та крізь шар гелю.

У табл. 3.7 наведено відповідні результати визначення коефіцієнтів уповільнення випаровування (K) для досліджених рідин за вивчених швидкостей повітряного потоку ($V_{\text{віт}}$).

Аналіз даних табл. 3.7 дозволяє зробити висновок, що зі зростанням швидкості повітряного потоку коефіцієнт уповільнення випаровування рідин

гелевим шаром зростає. Для нерозчинних та малорозчинних у воді рідин (бензин, бензен, 1,2-дихлоретан) за швидкості вітру 4 м/с він досягає значень 33÷53. Для рідин необмежено розчинних у воді (ізопропанол) він значно менший, особливо за умови відсутності вітру.

Таблиця 3.7 – Коефіцієнти уповільнення випаровування шаром гелю (K) для рідин за різних швидкостей повітряного потоку ($V_{\text{віт}}$)

Швидкість вітру, $V_{\text{віт}}$, м/с	Коефіцієнт уповільнення випаровування, K			
	бензин	бензен	ізопропанол	1,2-дихлоретан
0	8,9	13,0	2,1	6,3
1	21,6	33,6	7,7	32,7
2	28,8	31,1	11,3	45,3
3	31,6	34,2	17,1	45,7
4	33,4	34,3	18,4	53,1

Таким чином, гелеподібні шари зменшують швидкість випаровування горючих органічних рідин. Ефективність застосування гелеподібних шарів зростає зі зростанням швидкості вітру. За швидкості вітру 4 м/с ізолюючі властивості гелеподібних шарів зберігаються протягом 3–4 годин.

3.2 Визначення охолоджуючих та ізолюючих характеристик шару легкого носія

3.2.1 Моделювання ізолюючих властивостей шару легкого носія по відношенню до пари горючих рідин

Для здійснення прогнозу ізолюючих властивостей шару легкого носія необхідно провести моделювання процесу переносу пари горючих газів крізь шар гранульованого матеріалу, нанесеного на поверхню рідини. В якості рідин для аналізу можна взяти індивідуальні горючі рідини, що можуть бути наявні у складі рідкого пального. Для демонстрації ізолюючої дії шару пористого носія, утвореного гранулами, необхідно спочатку оцінити стаціонарне значення потоку пари рідини крізь такий шар. Схема аналізованої ситуації зображена на рис. 3.4 [267].

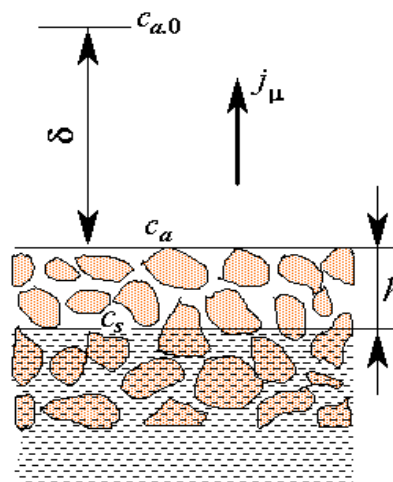


Рис. 3.4 – Просторова схема задачі переносу пари рідини крізь шар гранульованого покриття

На поверхню рідини нанесено гранульоване пористе покриття. Заштрихована область показує рівень рідини та наявність шару легкого носія, зануреного у рідину. Водночас, за рахунок плавучості, існує шар пористого

носія, який знаходиться над рівнем рідини. У такому разі утворюються дві поверхні, які характеризують зміну процесів масопереносу пари рідини, що випаровується: «рідина–шар гранул» та «шар гранул–повітря».

Перенос пари рідини крізь шар гранульованого пористого покриття має дифузійний характер. Відповідне рівняння стаціонарного масопереносу через пористий шар має вигляд:

$$j_{\mu.g} = \frac{D_g}{h}(c_s - c_a), \quad (3.24)$$

де $j_{\mu.g}$ – густина молярного потоку пари пального крізь шар гранул, в розрахунку на одиницю площі шару, моль·м⁻²·с⁻¹; D_g – коефіцієнт дифузії пари крізь шар гранул, м²·с⁻¹; h – товщина шару, м (рис. 3.4); c_s – рівноважна концентрація пари біля поверхні рідини, моль·м⁻³; c_a – концентрація пари у повітрі на межі з шаром гранул, моль·м⁻³.

Оскільки розміри областей між гранулами великі, у порівнянні з довжиною вільного пробігу молекул газу, концентрації c_s і c_a збігаються з концентраціями рідини в шарі простору між гранулами поблизу відповідних меж.

Коефіцієнт дифузії пари у повітрі крізь шар гранул (D_g) є пропорційним коефіцієнту дифузії пари рідини у повітрі без гранул (D_a), м²·с⁻¹:

$$D_g \leq D_a \cdot \left(\frac{h}{l_m}\right)^2 \cdot r_v, \quad (3.25)$$

де r_v – об'ємна частка порожнин у шарі гранул, крізь який рухається пара рідини; l_m – середнє значення довжини трубки струму між поверхнями шару, м (для проведення аналізу можна розбити потік пари між гранулами на паралельні векторам густини потоку трубки струму); співвідношення h/l_m практично не залежить від товщини шару h .

Поверхнева густина молярного потоку пари рідини у повітрі $j_{\mu.a}$ задовольняє рівнянню масовіддачі [256]:

$$j_{\mu.a} = \beta \cdot (c_a - c_{a.0}), \quad (3.26)$$

де $c_{a.0}$ – концентрація пари рідини у повітрі (в ядрі газової фази) на відстанях, що перевищують ширину перехідної області δ (рис. 3.4); β – коефіцієнт масовіддачі пари рідини у повітрі, м·с⁻¹.

Коефіцієнт β пов'язаний з шириною перехідної області δ співвідношенням:

$$\beta = \frac{D_a}{\delta}. \quad (3.27)$$

У свою чергу ширина перехідної області оцінюється за критерієм Нуссельта:

$$\delta = \frac{l}{Nu_D}, \quad (3.28)$$

де l – характерний просторовий розмір задачі, м; Nu_D – дифузний критерій Нуссельта (синонімічна назва – критерій Шервуда Sh).

У нестационарному режимі завжди виконується умова $j_{\mu.g} \leq j_{\mu.a}$, тому рівність $j_{\mu.g} = j_{\mu.a}$ досягається лише у разі виходу процесу масопереносу на стаціонарний режим. У цьому режимі спільне рішення системи рівнянь (3.24) – (3.28) дозволяє отримати загальний вираз поверхневої густини молярного потоку рідини $j_{\mu.g} = j_{\mu.a} = j_{\mu}$, який в разі ізотермічної дифузії має вигляд:

$$j_{\mu}(h) = \frac{\beta \cdot (c_s - c_{a,0})}{1 + \frac{\beta \cdot h}{D_g}} = \frac{j_{\mu}(0)}{1 + \frac{h}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_g}}. \quad (3.29)$$

З формули (3.29) випливає, що наявність шару гранул зменшує потік пари рідини не менше, ніж в K_g разів:

$$K_g = 1 + \frac{h}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_g} \geq K_{g,\min} = 1 + \frac{h}{\delta} \cdot \frac{1}{r_V} \cdot \left(\frac{l_m}{h}\right)^2. \quad (3.30)$$

Максимальний потік (3.29) досягається у стаціонарному режимі, вихід на який відбувається за час, що перевищує характерний час дифузії пари рідини крізь шар гранул:

$$\tau_g = \frac{h^2}{D_g}. \quad (3.31)$$

На прикладі октану, основного компонента бензину, можна провести чисельну оцінку коефіцієнта сповільнення випаровування K_g та часу виходу процесу випаровування на стаціонарний режим τ . Оцінка буде відповідати температурі 20 °С.

Для визначення коефіцієнта дифузії пари октану в повітрі можна скористатися емпіричним співвідношенням:

$$D_a = D_{a,0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^2, \quad (3.32)$$

де T_0 – значення температури середовища за нормальних умов, $T_0 = 273$ К; $D_{a,0}$ – значення коефіцієнта дифузії за температури T_0 .

Для октану довідкове значення коефіцієнта дифузії за температури T_0 становить $D_{a,0} = 5.5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Для температури 20°C згідно з формулою (3.32) цей параметр становить $D_a = 6.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Для оцінки коефіцієнта дифузії пари у повітрі крізь шар гранул D_g за співвідношенням (3.25) можна прийняти $(h/l_m)^2 = 0,5$ та $r_v = 0,25$. Такий розрахунок дає характерне значення даного коефіцієнту дифузії $D_g \cong 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Отриманому значенню коефіцієнта дифузії D_g відповідає, згідно (3.31), характерний час виходу на стаціонарний режим випаровування:

$$\tau_g = 1,25 \cdot 10^2 \cdot h^2, \quad (3.33)$$

де h – товщина шару гранульованого пористого покриття, що знаходиться вище рівня рідини, см.

Розрахунки показують, що вихід на стаціонарний режим відбувається за товщини шару легкого носія 5 см за 0,87 години, а за товщини шару 10 см – за 3,5 години.

На момент виходу процесу випаровування октану на стаціонарний режим величина коефіцієнта уповільнення випаровування шаром гранул, виходячи з (3.30), набуває значення:

$$K_g \geq K_{g,\min} = 1 + 8 \cdot \frac{h}{\delta} = 1 + 8 \cdot Nu_D \cdot \frac{h}{l}. \quad (3.34)$$

Зі співвідношення (3.34) випливає, що за мінімальних значень $Nu_D \sim 1$ та характерного розміру поверхні $l \sim 1$ м гальмуюча дія шару гранул на дифузії пари октану в стаціонарному режимі за товщини шару піноскла над поверхнею рідини $h = 0,1$ м становить 1,8, а за товщини 0,25 м – 3,0. До утворення стаціонарного режиму коефіцієнт уповільнення перевищує цю мінімальну величину.

Таким чином, процес випаровування уповільнюється зі зростанням товщини шару гранульованого матеріалу та зі зменшенням об'ємної частки пустот у цьому шарі. Гальмуюча дія шару гранул для процесу випаровування рідини у стаціонарному режимі стає помітною за досягнення товщини шару гранул ~ 10 см.

3.2.2 Експериментальне визначення ізолюючих властивостей шару гранульованого піноскла

Моделювання процесу дифузії пари крізь шар піноскла показав, що такий шар гальмує процес випаровування рідин. Це гальмування майже на два порядки менше, ніж гальмування випаровування суцільним шаром гелю. Але чисельні значення коефіцієнта уповільнення відносяться до часу після встановлення стаціонарного режиму. Час настання стаціонарного режиму становить від десятків хвилин до декількох годин і залежить від товщини шару піноскла. Початок гасіння резервуарів доцільно починати якомога раніше. Це викликає потребу в проведенні експериментального визначення коефіцієнта уповільнення випаровування за час менший, ніж час встановлення стаціонарного режиму [25–31, 268–269].

Як показник ізолюючої дії доцільно використовувати значення масової швидкості випаровування для певного ізолюючого шару, в порівнянні з випаровуванням з вільної поверхні. Кількісно масову швидкість випаровування рідини (V_m) [270] можна визначити за співвідношенням:

$$V_m = \frac{\Delta m}{\tau S}, \quad (3.35)$$

де Δm – зміна маси рідини внаслідок її випаровування; τ – час випаровування рідини; S – площа поверхні рідини.

Масова швидкість випаровування є основним параметром, який визначає інтенсивність вигорання рідини, тому що стадія випаровування є лімітуючою для процесу горіння рідин.

На першому етапі експерименту було вивчено швидкість випаровування бензину з вільної поверхні за умов знаходження у резервуарі. Для цього у тонкостінну металеву циліндричну ємність із внутрішнім діаметром 11,2 см ($S = 98,5 \text{ см}^2$) спочатку було залито 50 мл горючої рідини, а далі – таку кількість води, щоб поверхня бензину була нижче бортів ємності на 5 см. Визначення втрати маси проводилось гравіметричним методом протягом 16 хв. з інтервалом вимірювання в одну хвилину. Для визначення маси були використані електронні ваги ТНВ.600, що забезпечують точність вимірювання $\pm 0,01$ г. Вимірювання виконували за температури $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$.

У дослідах було проаналізовано процес випаровування автомобільного бензину А-92 (зимовий), який не містив добавок спиртів. Відповідні значення втрати маси бензину (m) за певний час випаровування з вільної поверхні наведені на рис. 3.5, лінія 1.

На другому етапі експерименту було досліджено зміну швидкості випаровування бензину за умови нарощування шару піноскла. У разі використання піноскла для гальмування випаровування необхідно враховувати, що з поданої кількості піноскла ізолюючу функцію виконує лише шар, який знаходиться над поверхнею рідини.

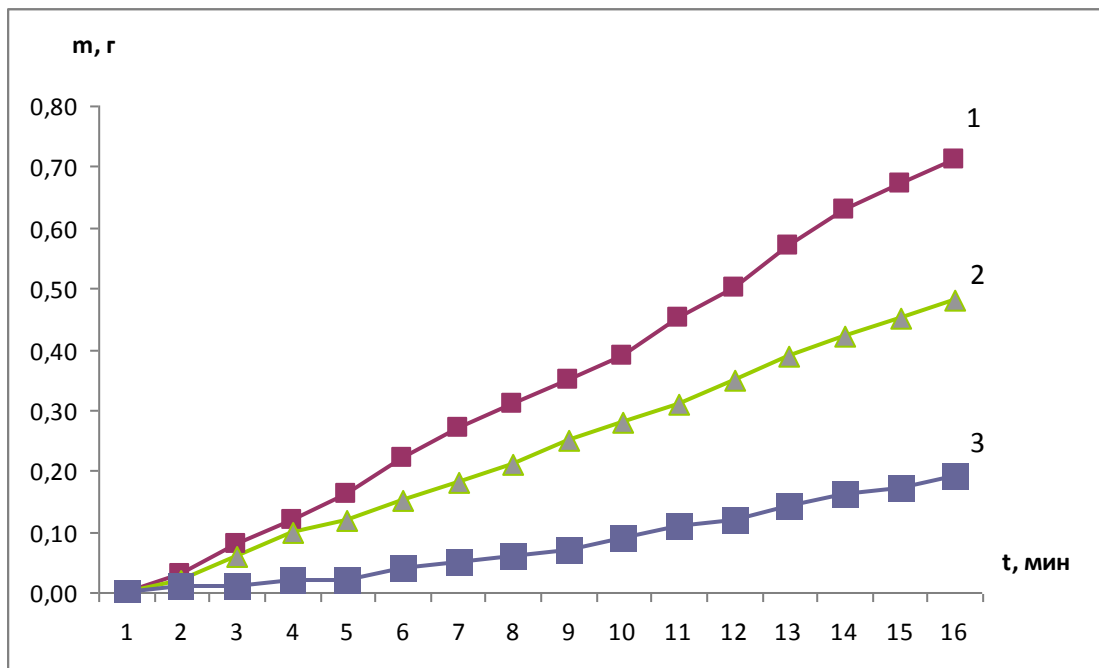


Рис. 3.5 – Зміна маси бензину в часі за різної товщини шару гранульованого піноскла: «1» – 0 см, «2» – 6 см, «3» – 9 см

У попередніх дослідях зі скляним циліндром такого ж діаметра, як і досліджувана металева ємність, в результаті візуальних спостережень було встановлено, що частка шару піноскла, що знаходиться над поверхнею бензину, становить $(52 \pm 3) \%$ від загальної товщини шару. Крім цього, візуальні спостереження показали, що поверхня гранул піноскла змочується бензином на висоту $\sim 1,5$ см. Причому висота змочування істотно залежить від способу засипки. У зв'язку з цим явищем всі дані наводяться для загальної товщини шару гранульованого піноскла (l), яку визначають попереднім вимірюванням у мірному циліндрі того ж діаметра, що і дослідна ємність.

Також можна зробити зауваження, що, незважаючи на перекриття гранулами піноскла частини поверхні «дзеркала» рідини, значення розміру поверхні випаровування внаслідок ефекту змочування залишається приблизно на тому ж самому рівні або навіть у незначній мірі збільшується.

Ізольуючі властивості шару піноскла було досліджено в діапазоні значень товщини шару (1,5÷13,5) см з інтервалом зміни шару піноскла 1,5 см. Методика експерименту була така сама, як і в досліді без нанесеного шару піноскла, але з додатковою операцією насипання на поверхню бензину гранульованого піноскла. У цьому разі після заливання бензину необхідно було додавати такий обсяг води, щоб верхня частина шару із гранул ПС була нижче бортів циліндра на 5 см. Гранули піноскла, які було використано у досліді, мають неправильну форму, їх максимальний розмір не перевищує 1,5 см.

Результати визначення втрати маси крізь шар піноскла наведені на рис. 3.5; випаровування крізь шар ПС товщиною 6 см відображає крива 2, крізь шар ПС товщиною 9 см – крива 3. Як видно з отриманих залежностей, характер

зміни маси бензину з часом, за умови випаровування з вільної поверхні та крізь шар піноскла протягом 15 хвилин, є близьким до лінійного. Це означає, що масова швидкість випаровування бензину в цьому інтервалі часу є сталою.

На підставі цих даних та співвідношення (3.35) були розраховані масові швидкості випаровування бензину для різної товщини шару піноскла. Залежності масової швидкості випаровування бензину від товщини шару піноскла наведені на рис. 3.6.

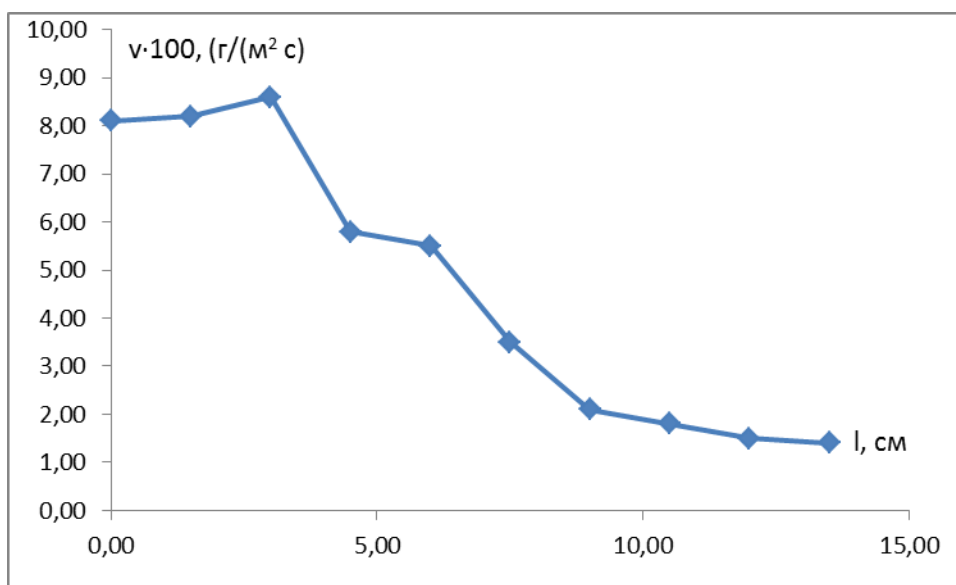


Рис. 3.6 – Залежність масової швидкості випаровування бензину (v) від товщини шару гранульованого піноскла (l)

Аналіз наведених результатів дозволяє зробити висновок:

- за товщини шару піноскла (1,5÷3) см швидкість випаровування бензину є більшою, ніж з вільної поверхні;

- починаючи з товщини шару піноскла 4,5 см швидкість випаровування бензину зменшується, в порівнянні зі швидкістю випаровування з вільної поверхні бензину;

- за загальної товщини шару ПС 13,5 см швидкість випаровування бензину зменшується в 5,6 рази, у порівнянні з випаровуванням з вільної поверхні.

Причину деякого збільшення швидкості випаровування бензину за товщини шару гранульованого піноскла 1,5 і 3 см можна пояснити змочуванням бензином поверхні гранул і відповідним збільшенням поверхні випаровування.

У розд. 3.1.2 та у роботі [236] наведено результати експериментального дослідження ізолюючих властивостей гелевих шарів по відношенню до пари органічних рідин, серед яких був вивчений і бензин. Встановлено, що навіть тонкі шари гелю (товщиною $\sim 1,5$ мм) уповільнюють випаровування бензину в 25÷30 разів.

Попередні досліди з нанесення гелю на шар гранульованого піноскла показали, що мінімальна товщина шару ПС повинна бути 5 см. Як видно з рис. 3.6, за такої товщини шару піноскла вже проявляється його ізолююча дія по відно-

шенню до пари бензину. Для такої товщини шару піноскла коефіцієнт уповільнення випаровування становить 1,5. Більш товсті шари гранульованого піноскла можуть уповільнювати випаровування бензину більш, ніж у 5 разів.

Таким чином, легкий негорючий носій – гранульоване піноскло – уповільнює швидкість випаровування бензину за товщини шару 4,5 см в 1,4 разу, а зі зростанням шару до 13,5 см – у 5,6 разу. Це означає, що, крім виконання функції забезпечення плавучості шару гелю, шар піноскла робить внесок у зменшення швидкості випаровування бензину.

3.2.3 Визначення охолоджуючих властивостей шару гранульованого піноскла

Спочатку піноскло було запропоновано як матеріал з густиною набагато меншою, ніж густина води. Основна роль піноскла полягала в забезпеченні плавучості ізолюючого шару гелю. Однак моделювання процесу дифузії пари рідин показало, що шар ПС виявляє й деякі ізолюючі властивості. Результати моделювання були підтверджені експериментально (розд. 3.2.2). Крім того, ПС контактує з розігрітим шаром рідини, що передбачає наявність у нього охолоджуючих властивостей, які створюють певний внесок у процес пожежогасіння.

Таким чином, виникає потреба в оцінці охолоджуючої дії ПС [268–269]. Якщо прийняти, що початкова температура піноскла $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$, а в результаті теплообміну з нагрітою рідиною його кінцева температура стала рівною $T_{\text{кін}} = 100\text{ }^\circ\text{C}$, то 1 кг піноскла поглине наступну кількість тепла:

$$Q(\text{ПС}) = C_{p(\text{ПС})} \cdot m_{(\text{ПС})}, \quad (3.36)$$

де $\Delta T = 62,4\text{ кДж}$, $C_{p(\text{ПС})}$ та $m_{(\text{ПС})}$ – питома теплоємність та маса ПС, відповідно.

Як видно з наведеного розрахунку охолоджуюча дія піноскла не висока. З урахуванням факту, що вода проявляє високу охолоджуючу здатність було запропоновано використання змоченого гранульованого піноскла для посилення ефекту його охолодження. Експериментально було встановлено, що вміст води у змоченому гранульованому піносклі з розміром гранул (1÷1,5) см досягає (30÷50) % від загальної маси піноскла.

Можна оцінити охолоджуючу здатність змоченого піноскла з врахуванням припущення, що водоутримання піноскла становить 50 % та вся вода буде випарувана. Тоді охолоджуюча здатність змоченого піноскла у перерахунку на 1 кг вогнегасної речовини (0,5 кг піноскла + 0,5 кг води) складе:

$$\begin{aligned} Q(\text{ПС} + \text{H}_2\text{O}) &= C_{p(\text{ПС})} \cdot m_{(\text{ПС})} = \\ &= \Delta T + C_p(\text{H}_2\text{O}) \cdot m(\text{H}_2\text{O}) = \Delta T + \Delta H_{\text{вип}}(\text{H}_2\text{O}) \cdot m(\text{H}_2\text{O}) = \\ &= 0,78 \cdot 0,5 \cdot 80 + 4,2 \cdot 0,5 \cdot 80 + 2254 \cdot 0,5 = 1326\text{ кДж}, \quad (3.37) \end{aligned}$$

де $C_p(\text{H}_2\text{O})$, $m(\text{H}_2\text{O})$ та $\Delta H_{\text{вип}}(\text{H}_2\text{O})$ – питома теплоємність, маса та питома теплота випаровування води, відповідно.

Розрахунок співвідношення $Q(\text{ПС} + \text{H}_2\text{O})/Q(\text{ПС})$ показує, що перевага змоченого піноскла над сухим в охолоджуючій дії становить 21,3 рази за однакових мас вогнегасних речовин.

Якщо провести перерахунок охолоджуючої дії для обох випадків на 1 кг сухого піноскла, тобто змочене піноскло містить 1 кг сухого піноскла та 1 кг води, то перевага змоченого піноскла становитиме 42,6 разу.

За умови подавання змоченого піноскла по рукавних матеріалопровідних лініях (як буде показано у розд. 5), частину води буде втрачено та її вміст зменшиться до 30 % (1 кг піноскла + 0,43 кг води). Розрахунок проведений з використанням співвідношення (3.37), дає охолоджуючу дію піноскла зі зменшеним водоутриманням (до 30 %), яка у 18,7 разу перевищує охолоджуючу дію сухого піноскла.

Наведені вище розрахунки враховують наступні припущення: повна відсутність втрат води після засипки змоченого ПС у ГР та випаровування всієї води з піноскла. Останнє припущення буде виконуватися, якщо кінцева температура рідини після подавання ПС буде суттєво перевищувати 100 °С.

Для перевірки результатів теоретичної оцінки охолоджуючої дії сухого та змоченого піноскла було проведено відповідне експериментальне дослідження [272]. В серії дослідів визначено фактичне зниження температури нагрітих рідин в результаті засипання на їх поверхню гранульованого піноскла. Реалізація прийому охолодження є одним з найважливіших механізмів припинення горіння для більшості вогнегасних речовин. За умови подавання будь-якого охолоджуючого агента на поверхню ГР температура верхнього шару рідини знижується. Відповідно, тиск пари над їх поверхнею зменшується і пропорційно зменшується концентрація пари та інтенсивність горіння. Таким чином, для визначення фактичних умов припинення горіння ГР потрібне знання температури рідин після теплообміну з вогнегасними речовинами. Теоретичні розрахунки зниження температури поверхні рідини можна провести для сухого ПС. Такі розрахунки для змоченого ПС провести складно, через те, що неможливо врахувати віднесення частини води в аерозольному стані в результаті закипання рідини та витискання її назовні, оскільки цей процес має індивідуальну залежність від розмірів пор. Також важко врахувати повноту випаровування води.

В якості горючої рідини було обрано додекан ($\text{C}_{12}\text{H}_{26}$) кваліфікації “Ч”. Він є представником гомологічного ряду алканів та входить до складу моторних палив. Він має досить високі температури кипіння (216 °С) і спалаху (74 °С), що спрощує проведення дослідів. За теплоємністю до декан є близьким до основних технічних вуглеводневих рідин (2,09 кДж/(кг·К)); його густина за температури 100 °С – 675 кг/м³.

Для експериментів було обрано подрібнене піноскло з розміром гранул (1÷1,5) см. Його характеристики наведені нижче:

- істинна густина – (186±19) кг/м³ (дані виробника);
- насипна щільність – (105±17) кг/м³;
- плавучість (відношення висоти шару піноскла над рівнем рідини до загальної товщини шару піноскла) у воді – 0,57±0,05;

- плавучість змоченого піноскла у додекані – $0,44 \pm 0,04$;
- водоутримання – $(50,7 \pm 5) \%$;
- теплоємність – $(0,78 \pm 0,03) \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ (дані виробника).

Існує деяка невизначеність у значенні істинної густини піноскла для його роботи у рідкому середовищі. Це пов'язано з тим, що зовнішні пори піноскла можуть заповнюватися рідиною та піносклом буде поводити себе як речовина з істинною густиною, відмінною від довідкових даних.

У ході експерименту спочатку додекан у кількості 350 мл було нагріто в металевій ємності до температури на $(10 \div 15)^\circ\text{C}$ вище обраної температури. Після цього нагріту рідину виливали в теплоізольовану металеву ємність циліндричної форми із внутрішнім діаметром 11,2 см ($S_{\text{пов}} = 98,5 \text{ см}^2$). Вимірювання температури здійснювалось ртутним термометром із точністю вимірювання 0,1 К. Розташування термометра передбачало його занурення в резервуар зі ртуттю до середини рівня горючої рідини після засипання піноскла. Висота шару рідини в циліндричній ємності становила $h = 3,55$ см. Внаслідок витискування об'єму рідини піносклом її рівень піднімається на деяку величину. Експериментально встановлено, що рівень рідини збільшився до $\sim 7,5$ см. Шар ПС такої висоти в досліді буде безпосередньо контактувати з додеканом.

Спочатку проводили «холостий», калібрувальний дослід в якому досліджувалась швидкість охолодження рідини без засипання ПС. За таких умов було встановлено, що зниження температури внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем за 5 хв. становить в залежності від температури $(0,9 \div 1,7)^\circ\text{C}$.

Далі виконували дослід із засипанням ПС. Об'єм піноскла складав 1000 мл, чого було достатньо для повного заповнення шару рідини із притискуванням піноскла до дна ємності. Як прийнято в калориметричних дослідах, вимірювання температури проводили протягом трьох періодів: попереднього, основного та кінцевого [273]. При цьому фіксацію температури здійснювали через кожні 30 с. Далі графічним методом визначали зміну температури, яка обумовлена засипанням ПС. За кінцеву температуру охолодження рідини масою піноскла приймали температуру через 10 хвилин після засипання ПС.

Початкові температури нагрітого додекану для проведення серії дослідів було прийнято рівними 80, 100, 120, 140 та 160°C , що відповідає температурам верхнього шару основних легкозаймистих рідин на початковому етапі пожежі в резервуарах. Відповідні результати для сухого піноскла наведено в табл. 3.8.

Також було проведено попередню теоретичну оцінку охолодження додекану сухим піносклом. При цьому було враховано зміну рівня додекану за рахунок засипання піноскла від 3,55 см до 7,5 см. Також було прийнято, що теплоємності додекану і піноскла не залежать від температури і вони дорівнюють відповідним значенням за температури 25°C . В розрахунках врахована та частина піноскла, яка занурена в додекан, а також маса металевої ємності (~ 200 г), яка контактує з рідиною. Теплоємність матеріалу ємності було обрано за даними для заліза за температури 100°C ($0,352 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$). Початкову температуру піноскла прийнято 20°C .

Для умови потрапляння холодного піноскла у рідину рівняння теплового балансу буде мати вигляд:

$$c_{\text{пс}} \cdot m_{\text{пс}} \cdot (T_2 - 20) = (c_{\text{д}} \cdot m_{\text{д}} + c_{\text{з}} \cdot m_{\text{з}}) \cdot (T_1 - T_2) \quad (3.38)$$

де $c_{\text{пс}}, c_{\text{д}}, c_{\text{з}}$ – питомі теплоємності ПС, додекану та заліза; $m_{\text{пс}}, m_{\text{д}}, m_{\text{з}}$ – маси ПС, додекану та заліза; T_1 і T_2 – початкова та кінцева температури додекану.

Результати теоретичної оцінки очікуваного ефекту охолодження додекану з температурою ($T_{\text{д}}$), за умови подавання холодного ПС, та відповідні експериментальні дані зниження температури наведено в табл. 3.8: після засипання сухого ПС за експериментом ($\Delta T_{\text{е}}$); після засипання сухого ПС із урахуванням охолоджуючого внеску стінок за розрахунком ($\Delta T_{\text{р1}}$); після засипання сухого піноскла без урахування внеску стінок за розрахунком ($\Delta T_{\text{р2}}$).

Таблиця 3.8 – Експериментальні та розрахункові дані щодо зниження температури додекану внаслідок засипання сухого піноскла

Температура додекану, T_0 °C	80	100	120	140	160
Сухе піноскло, $\Delta T_{\text{е}}$ °C	4,9	5,8	7,6	10,1	12,5
Прогноз: сухе піноскло $\Delta T_{\text{р1}}$ °C	4,9	6,5	8,1	9,7	11,3
Прогноз: сухе піноскло $\Delta T_{\text{р2}}$ °C	5,5	7,3	9,1	10,9	12,7

Співставлення експериментальних та розрахункових даних дозволяє зробити висновок про їх задовільний збіг. Але перенесення таких результатів на реальні резервуари є некоректним, оскільки теплоємність стінок резервуара на повномасштабних об'єктах набагато менша, у порівнянні з теплоємністю рідини в резервуарах. Тому для повномасштабних об'єктів було проведено розрахунки без врахування внеску стінок резервуара в охолоджуючий ефект вогнегасного засобу. В такому випадку рівняння теплового балансу (3.38) набуде вигляду:

$$c_{\text{пс}} \cdot m_{\text{пс}} \cdot (T_2 - 20) = (c_{\text{д}} \cdot m_{\text{д}}) \cdot (T_1 - T_2) \quad (3.39)$$

Відповідні результати розрахунків наведені в табл. 3.8.

Під час моделювання процесу охолодження рідин треба використовувати співвідношення (3.39), а поблизу стінок резервуара більш надійні результати буде отримано на основі співвідношення (3.38).

Попередні дослідження показали, що змочене піноскло утримує (30–50) % води та водночас зберігає плавучість у горючих рідинах. З урахуванням того, що вода має аномальну високу охолоджуючу дію, що визначається високими значеннями теплоємності й теплоти випаровування [237], було експериментально досліджено можливість підвищення охолоджуючої здатності піноскла за рахунок змочування. Експериментальні дані щодо зниження температури $T_{\text{д}}$ нагрітого додекану наведено у табл. 3.9.

Таблиця 3.9 – Експериментальні дані щодо зниження температури додекану внаслідок засипання змоченого піноскла

Температура додекану, T_d °С	80	100	120	140	160
Змочене піноскло, ΔT_e °С	19,0	24,2	33,8	49,8	68,7

Можливість проведення розрахунку величини зменшення температури додекану внаслідок засипання змоченого ПС існує лише у випадку, якщо відома частина води, що випарувалася або втратилася іншим шляхом. В інтервалі температур (80÷100) °С випаровування є неповним. В інтервалі температур (120÷160) °С є невідомими як повнота випаровування води, так і частина води, втрачена в результаті розбризкування рідин під час засипання піноскла, бурхливого кипіння та витискання крапель води з пор внаслідок перегріву.

Наявність у досліді неповного випаровування води було підтверджено експериментальним шляхом ваговим методом. Було співставлено маси піноскла за різних процесів змочування: маса піноскла після проведення експерименту з охолодження додекану; маса піноскла змоченого водою; маса піноскла, змоченого додеканом. Ще одним фактором, який ускладнює проведення теоретичного розрахунку охолоджуючої дії змоченого піноскла, є наявність процесу виділення частини води з пор піноскла під час їх занурення у верхній нагрітий шар ГР із наступним опусканням у нижні шари рідини. Цей процес візуально спостерігався в досліді засипання змоченого піноскла в розігріті ГР, які знаходились у скляних ємностях.

Співставлення даних таблиць 3.8 та 3.9 дозволяє констатувати, що перевага в охолоджуючій дії змоченого піноскла, у порівнянні з сухим, зі збільшенням температури від 80 до 160 °С зростає з 3,9 до 5,5 разу.

Таким чином, на підставі проведених розрахунків та експериментів встановлено, що змочене піноскло зберігає плавучість у додекані. Водночас, змочене піноскло знижує температуру розігрітого додекану в 3,9÷5,5 разу більше, ніж сухе піноскло. Математична модель, яку створено для розрахунку ефективності процесу охолодження рідин сухим піносклом, добре себе зарекомендувала на прикладі експериментальної перевірки розрахункового прогнозу значень зниження температур розігрітого додекану на підставі теплоємнісної складової процесу охолодження.

Розглянемо тепер процес охолодження верхнього шару рідини в резервуарі під час горіння з урахуванням динаміки цього процесу у разі внесення гранул сухого піноскла [274]. Будемо вважати, що піноскло покриває поверхню рідини шаром однакової товщини (рис. 3.7). ρ

При цьому товщина шару піноскла над поверхнею рідини h_1 і під поверхнею h_2 будуть пов'язані співвідношенням:

$$h_1 \rho_{\text{пс}} = h_2 (\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{пс}}), \quad (3.40)$$

де $\rho_{\text{пс}}$ – густина піноскла; $\rho_{\text{гр}}$ – густина горючої рідини, $\rho_{\text{гр}} < \rho_{\text{пс}}$.

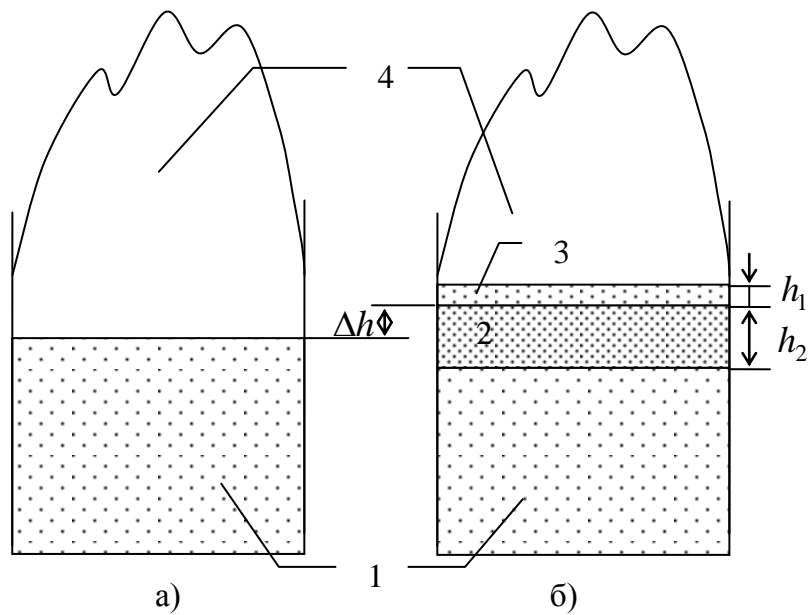


Рис. 3.7 – Горіння рідини в резервуарі:

а) до подавання гранул піноскла; б) після подавання гранул піноскла;

1 – горюча рідина; 2 – шар піноскла під поверхнею рідини; 3 – шар піноскла над поверхнею рідини; 4 – полум'я

Позначаючи $h = h_1 + h_2$ як загальну товщину шару піноскла і підставляючи її в (3.40), отримуємо:

$$h_1 = h \frac{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{пс}}}{\rho_{\text{гр}}}; \quad (3.41)$$

$$h_2 = h \frac{\rho_{\text{пс}}}{\rho_{\text{гр}}}. \quad (3.42)$$

Внаслідок витіснення рідини піносклом її рівень піднімається на величину Δh (рис. 3.7), значення якої визначається співвідношенням:

$$V_{2\text{гр}} = S(h_2 - \Delta h), \quad (3.43)$$

де S – площа дзеркала рідини в резервуарі; $V_{2\text{гр}}$ – об'єм горючої рідини в шарі піноскла, який визначається загальним об'ємом вільного простору між частинками піноскла, зануреного під поверхню рідини:

$$V_{2\text{гр}} = V_2 - V_{2\text{пс}}, \quad (3.44)$$

де $V_2 = Sh_2$ – загальний об'єм шару піноскла під поверхнею рідини; $V_{2\text{пс}}$ – сума об'ємів окремих гранул піноскла під поверхнею рідини, для яких існують співвідношення:

$$V_2 = \frac{m_2}{\rho_{\text{псн}}}; V_{2\text{пс}} = \frac{m_2}{\rho_{\text{пс}}}, \quad (3.45)$$

де m_2 – маса піноскла під поверхнею рідини; $\rho_{\text{псн}}$ – насипна густина піноскла. Із рівностей (3.45) випливає, що:

$$V_{2\text{пс}} = V_2 \frac{\rho_{\text{псн}}}{\rho_{\text{пс}}}. \quad (3.46)$$

Спільне розв’язання (3.44) та (3.46) дає:

$$V_{2\text{гр}} = V_2 \left(1 - \frac{\rho_{\text{псн}}}{\rho_{\text{пс}}} \right). \quad (3.47)$$

Підстановка (3.47) в (3.42), (3.43) дозволяє розрахувати рівень підйому рідини за подавання піноскла:

$$\Delta h = h_2 \frac{\rho_{\text{псн}}}{\rho_{\text{пс}}} = h \frac{\rho_{\text{псн}}}{\rho_{\text{гр}}}.$$

Таким чином, подача гранул піноскла приводить до того, що поверхневий шар рідини, який мав товщину

$$h_2 - \Delta h = h \frac{\rho_{\text{пс}}}{\rho_{\text{гр}}} - h \frac{\rho_{\text{псн}}}{\rho_{\text{пс}}} = h \frac{\rho_{\text{пс}} - \rho_{\text{псн}}}{\rho_{\text{гр}}}, \quad (3.48)$$

збільшується до товщини $h_2 = h \frac{\rho_{\text{пс}}}{\rho_{\text{гр}}}$ внаслідок розбавлення рідини гранулами піноскла. При цьому в горизонтальному перерізі, що проходить через шар піноскла під поверхнею рідини, площа, зайнята рідиною $S_{\text{гр}}$, буде складати:

$$S_{\text{гр}} = S \frac{h_2 - \Delta h}{h_2}.$$

На гранули піноскла буде припадати площа $S_{\text{пс}}$:

$$S_{\text{пс}} = S - S_{\text{гр}} = S \frac{\Delta h}{h_2}.$$

Тоді відношення площ, що припадають на рідину і піноскло в горизонтальному перерізі, дорівнює:

$$\frac{S_{\text{гр}}}{S_{\text{пс}}} = \frac{h_2 - \Delta h}{\Delta h} = \frac{\rho_{\text{пс}} - \rho_{\text{псн}}}{\rho_{\text{псн}}}. \quad (3.49)$$

Якщо розглянути випадок, коли горюча рідина не змочує поверхню піноскла, то зменшення площі поверхні рідини, з якої надходять пари в зону горіння, призводить до пропорційного зменшення інтенсивності її випаровування та вигорання. Таким чином, коефіцієнт послаблення інтенсивності вигорання рідини дорівнює:

$$k = \frac{S_{\text{гр}}}{S} = \frac{h_2 - \Delta h}{\Delta h} = \frac{\rho_{\text{пс}} - \rho_{\text{псн}}}{\rho_{\text{пс}}}.$$

З формули (3.49) випливає оцінка відношення лінійних розмірів областей, зайнятих рідиною $l_{\text{гр}}$ і піносклом $l_{\text{пс}}$:

$$\frac{l_{\text{гр}}}{l_{\text{пс}}} = \sqrt{\frac{S_{\text{гр}}}{S}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{пс}} - \rho_{\text{псн}}}{\rho_{\text{псн}}}}. \quad (3.50)$$

З метою спрощення, замість тривимірної задачі про теплообмін рідини і гранул піноскла в поверхневому шарі товщиною h_2 , розглянемо двовимірну задачу про теплообмін вертикального шару піноскла висотою h_2 з товщиною $\delta_{\text{пс}} = D/2$ та шару рідини тієї ж висоти з товщиною

$$\delta_{\text{гр}} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\rho_{\text{пс}} - \rho_{\text{псн}}}{\rho_{\text{псн}}}},$$

де D – середній діаметр гранул. Товщини шарів рідини і піноскла підібрано таким чином, щоб задовольняти виразу (3.50). Всі сторони утвореної прямокутної області (рис. 3.8) будемо вважати теплоізольованими.

Подача піноскла викликає перемішування верхнього шару рідини. Якщо прийняти, що по всій товщині шару рідини, що знаходиться між гранулами піноскла, відбувається усереднення температури, то кінцева температура шару буде визначатись формулою:

$$\bar{T} = \frac{1}{h_2 - \Delta h} \int_0^{h_2 - \Delta h} T(z) dz, \quad (3.51)$$

де $T(z)$ – температура рідини на глибині z .

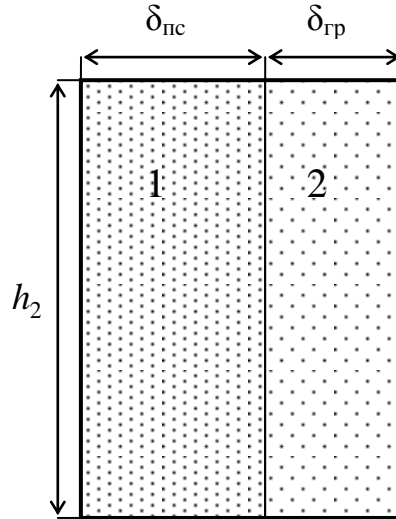


Рис. 3.8 – Модель для розрахунку теплообміну шарів піноскла і рідини:

1 – піноскло; 2 – рідина

У цьому випадку задача перетворюється на одновимірну задачу поширення тепла у скінченному стержні, який складається із двох матеріалів:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{\text{пс}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad -\delta_{\text{пс}} < x < 0, \quad (3.52)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{\text{гр}} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \delta_{\text{гр}}, \quad (3.53)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=-\delta_{\text{пс}}} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta_{\text{гр}}} = 0, \quad (3.54)$$

$$T|_{x=-0} = T|_{x=+0}, \quad \lambda_{\text{пс}} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=-0} = \lambda_{\text{гр}} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=+0}, \quad (3.55)$$

$$T|_{t=0} = \begin{cases} T_0, & -\delta_{\text{пс}} < x < 0 \\ \bar{T}, & 0 < x < \delta_{\text{гр}} \end{cases}, \quad (3.56)$$

де $\alpha_{\text{пс}}, \alpha_{\text{гр}}$ – коефіцієнти температуропровідності піноскла і горючої рідини, відповідно; $\lambda_{\text{пс}}, \lambda_{\text{гр}}$ – коефіцієнти їх теплопровідності.

Крайові умови (3.54) відповідають теплоізованим кінцям, а умови (3.55) описують температуру на межі розділу між піносклом та рідиною.

Задача (3.52)-(3.56) може бути розв'язана методом скінчених різниць. З цією метою розіб'ємо відрізок $[-\delta_{\text{пс}}, 0]$ точками $x_{-N} = -\delta_{\text{пс}}, x_{-N+1}, \dots, x_0 = 0$ на N рівних відрізків довжиною $\Delta x_{\text{пс}} = -\delta_{\text{пс}}/N$, а відрізок $[0, \delta_{\text{гр}}]$ – точками $x_0 = 0, x_1, \dots, x_M = \delta_{\text{гр}}$ на M рівних відрізків довжиною $\Delta x_{\text{гр}} = \delta_{\text{гр}}/M$. Вісь часу також розіб'ємо на відрізки довжиною Δt . Тоді рівняння (3.52) і (3.53) перетворюються на наступні:

$$T(x_i, t + \Delta t) = T(x_i, t) + \alpha_{\text{пс}} \frac{T(x_{i+1}, t) - 2T(x_i, t) + T(x_{i-1}, t))}{\Delta x_{\text{пс}}^2} \Delta t, \quad -N < i < 0,$$

$$T(x_i, t + \Delta t) = T(x_i, t) + \alpha_{\text{гр}} \frac{T(x_{i+1}, t) - 2T(x_i, t) + T(x_{i-1}, t))}{\Delta x_{\text{гр}}^2} \Delta t, \quad -0 < i < M.$$

Значення температури в точці контакту рідини і піноскла:

$$T(x_0, t) = \frac{\frac{\lambda_{\text{пс}}}{\Delta x_{\text{пс}}} T(x_{-1}, t) + \frac{\lambda_{\text{гр}}}{\Delta x_{\text{гр}}} T(x_1, t)}{\frac{\lambda_{\text{пс}}}{\Delta x_{\text{пс}}} + \frac{\lambda_{\text{гр}}}{\Delta x_{\text{гр}}}}.$$

Крайові умови (3.54) набувають вигляду:

$$T(x_{-N}, t) = T(x_{-N+1}, t), \quad T(x_M, t) = T(x_{M-1}, t).$$

Початкова умова (3.56) перетворюється на наступну:

$$T(x_i, 0) = \begin{cases} T_0, & -N \leq i < 0, \\ \frac{\frac{\lambda_{\text{пс}}}{\Delta x_{\text{пс}}} T_0 + \frac{\lambda_{\text{гр}}}{\Delta x_{\text{гр}}} \bar{T}}{\frac{\lambda_{\text{пс}}}{\Delta x_{\text{пс}}} + \frac{\lambda_{\text{гр}}}{\Delta x_{\text{гр}}}}, & i = 0, \\ \bar{T}, & 0 < i \leq M. \end{cases}$$

Застосовуючи схему скінчених різниць, можна послідовно знайти розподіли температур у ПС та ГР в моменти часу $\Delta t, 2\Delta t, \dots$ та інші.

Початкова умова (3.56) містить значення початкової температури рідини \bar{T} , яка визначається формулою (3.51) і залежить від розподілу температури за глибиною рідини, що горить. Характер розподілу температури вглиб визначається типом рідини за механізмом вигорання. Існують два типи горючих рідин:

- рідини, що горять без утворення гомотермічного шару, I роду;
- рідини, що горять з утворенням гомотермічного шару, II роду.

Оскільки утворюються різні за глибиною прогріті шари в процесі вигорання рідин, необхідно створити математичні моделі для прогнозу процесу охолодження їх поверхневого шару для кожної з можливостей температурного розподілу.

Для рідин, що горять з утворенням гомотермічного шару, розподіл температури за глибиною задається умовою:

$$T(z) = \begin{cases} T_{\text{гом}}, & 0 \leq z \leq vt, \\ T_0, & z > vt, \end{cases} \quad (3.57)$$

де $T_{\text{гом}}$ – температура гомотермічного шару; T_0 – початкова температура рідини в резервуарі; v – швидкість утворення гомотермічного шару; t – час вільного горіння рідини.

За умов (3.57) рівняння (3.51) дозволяє отримати температуру рідини в шарі між гранулами піноскла:

$$\bar{T} = \begin{cases} T_{\text{гом}}, & h_2 - \Delta h \leq vt, \\ \frac{T_{\text{гом}}vt + T_0(h_2 - \Delta h - vt)}{h_2 - \Delta h}, & h_2 - \Delta h > vt. \end{cases} \quad (3.58)$$

Якщо ввести у розрахунок безрозмірну товщину шару піноскла H_1 як:

$$H_1 = \frac{h_2 - \Delta h}{vt} = \frac{h}{vt} \frac{\rho_{\text{пс}} - \rho_{\text{псн}}}{\rho_{\text{пс}}}, \quad (3.59)$$

то розв'язок (3.58) набуде вигляду:

$$\bar{T} = \begin{cases} T_{\text{гом}}, & H_1 \leq 1, \\ T_0 + \frac{T_{\text{гом}} - T_0}{H_1}, & H_1 > 1. \end{cases}$$

Якщо ввести у дану систему безрозмірну температуру

$$\theta_1 = \frac{T - T_0}{T_{\text{гом}} - T_0},$$

можна отримати наступний розв'язок:

$$\bar{\theta}_1 = \begin{cases} 1, & H_1 \leq 1, \\ \frac{1}{H_1}, & H_1 > 1. \end{cases} \quad (3.60)$$

Аналіз виразу (3.60) показує, що в інтервалі $H_1 > 1$ температура верхнього шару рідини монотонно зменшується зі збільшенням товщини шару піноскла та асимптотично наближається до температури навколишнього середовища. Отже, за умови того, що температура рідини, за якої припиняється її горіння (температура спалаху даної горючої рідини), є вищою, ніж температура навколишнього середовища, то існує достатня товщина шару піноскла, що забезпечує гасіння рідини внаслідок охолодження поверхневого шару шляхом перемішування.

Якщо розглядати розподіл температур за глибиною у рідинах, що горять без утворення гомотермічного шару, то можна прийняти спрощення, що температура поверхні такої рідини дорівнює її температурі кипіння $T_{\text{кип}}$.

Розподіл температури за глибиною рідини наближено візьмемо таким, як і в напівнескінченному стержні [275]:

$$T(z) = T_{\text{кип}} - (T_{\text{кип}} - T_0) \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha_{\text{пр}}t}}\right), \quad z \geq 0. \quad (3.61)$$

Підстановка виразу (3.61) в (3.51) дає наступний результат:

$$\begin{aligned} \bar{T} &= \frac{1}{h_2 - \Delta h} \int_0^{h_2 - \Delta h} \left[T_{\text{кип}} - (T_{\text{кип}} - T_0) \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha_{\text{пр}}t}}\right) \right] dz = \\ &= T_{\text{кип}} - \frac{T_{\text{кип}} - T_0}{h_2 - \Delta h} \int_0^{h_2 - \Delta h} \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{\alpha_{\text{пр}}t}}\right) dz = \\ &= T_{\text{кип}} - (T_{\text{кип}} - T_0) \operatorname{erf}(H_2) + \frac{T_{\text{кип}} - T_0}{H_2 \sqrt{\pi}} (1 - \exp[-H_2^2]), \end{aligned} \quad (3.62)$$

де H_2 – безрозмірна товщина шару піноскла:

$$H_2 = \frac{h_2 - \Delta h}{2\sqrt{\alpha_{\text{пр}}t}} = \frac{h}{2\sqrt{\alpha_{\text{пр}}t}} \frac{\rho_{\text{пс}} - \rho_{\text{псн}}}{\rho_{\text{пр}}}. \quad (3.63)$$

Якщо ввести в математичну модель безрозмірну температуру θ_2 :

$$\theta_2 = \frac{T - T_0}{T_{\text{кип}} - T_0},$$

то вираз (3.62) набуває наступного вигляду:

$$\bar{\theta}_2 = 1 - \operatorname{erf}(H_2) + \frac{1}{H_2 \sqrt{\pi}} (1 - \exp[-H_2^2]),$$

що відображає залежність на рис. 3.9.

Аналіз залежності, наведеної на рис. 3.9, свідчить, що зі збільшенням шару піноскла температура поверхневого шару рідини монотонно спадає та асимптотично наближається до температури навколишнього середовища T_0 . Якщо температура рідини, за якої спостерігається ефект гасіння T_{Γ} (відповідає температурі спалаху рідини), більша за температуру навколишнього середовища, то за достатньої товщини шару піноскла припинення горіння рідини відбувається внаслідок охолодження її поверхневого шару за рахунок перемішування шарів.

З виразів (3.59) та (3.63) випливає, що зі збільшенням густини піноскла ρ_{nc} збільшується охолоджуючий ефект від перемішування поверхневого шару рідини, оскільки у цьому випадку в перемішуванні беруть участь більш глибокі та холодні шари рідини.

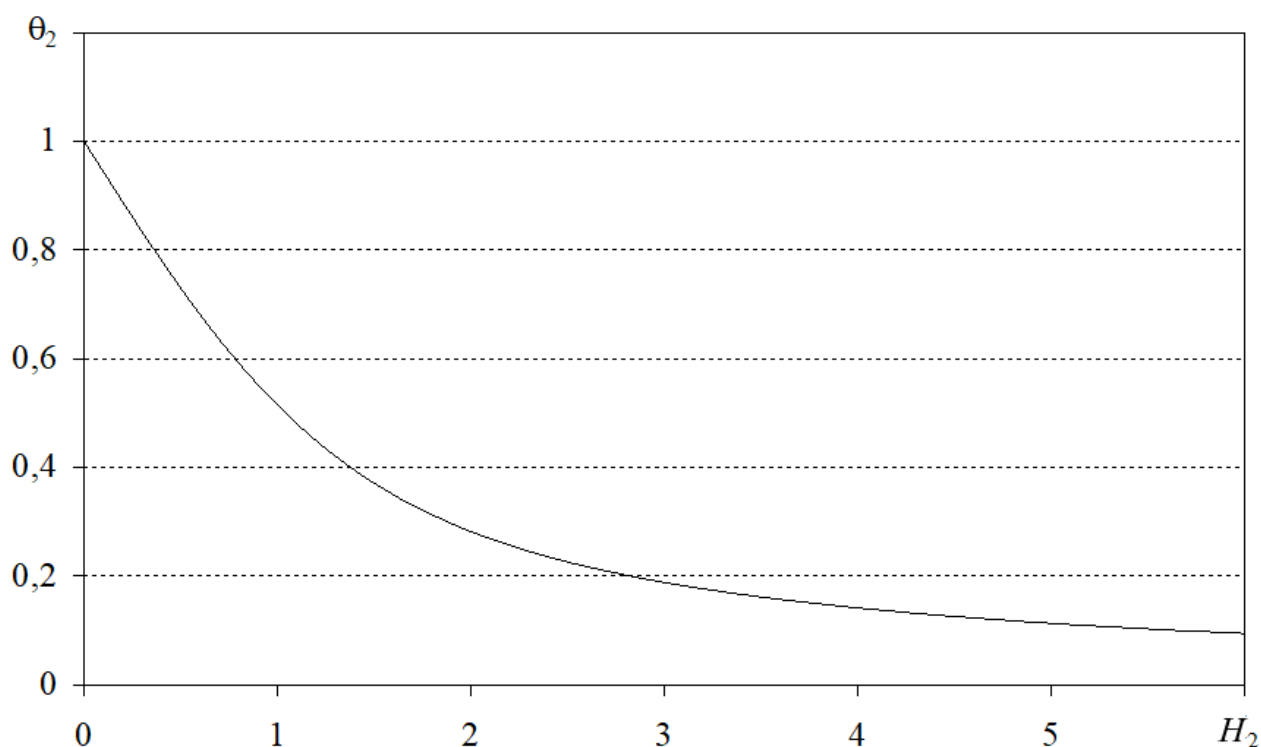


Рис. 3.9 – Залежність безрозмірної температури шару рідини між гранулами піноскла від безрозмірної товщини шару піноскла

Приклад оцінки охолоджуючої здатності піноскла по відношенню до поверхневого шару рідин I роду здійснено на підставі властивостей декану ($C_{10}H_{22}$), легкозаймистої рідини, що горить без утворення гомотермічного ша-

ру. Властивості декану: $\rho_{гр} = 734 \text{ кг/м}^3$, $T_{кип} = 174 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_r = 47 \text{ }^\circ\text{C}$ [61–62]; коефіцієнт температуропровідності $\alpha_{гр} = 0,87 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. У досліді час вільного горіння рідини прийнято за $t_1 = 120 \text{ с}$, що повинно забезпечити утворення стаціонарного прогрітого шару. Властивості піноскла як вогнегасного засобу: $\rho_{пс} = 200 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{псн} = 140 \text{ кг/м}^3$, $\alpha_{пс} = 7,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; середній діаметр гранул $D = 1 \text{ см}$; загальна товщина шару піноскла після подавання в ємність із рідиною $h = 15 \text{ см}$; початкова температура піноскла – $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розрахунки за формулами (3.41), (3.42) дають значення товщини шару піноскла над поверхнею рідини $h_1 = 11 \text{ см}$, під поверхнею – $h_2 = 4 \text{ см}$. При цьому в перемішуванні бере участь поверхневий шар рідини товщиною 2 см і його середня температура зменшиться до $\bar{T} = 49 \text{ }^\circ\text{C}$, що вище температури гасіння $T_r = 47 \text{ }^\circ\text{C}$. Подальше охолодження цього шару рідини відбувається за рахунок теплообміну із гранулами піноскла (рис. 3.10 – для гранули на межі «піноскло–рідина»).

Аналіз залежностей на рис. 3.10 свідчить, що протягом 80 с поверхневий шар горючої рідини охолоджується до температури $T = 46 \text{ }^\circ\text{C}$, що менше температури її гасіння. Відповідно розрахований режим подавання ПС дозволяє охолодити рідину до температури, меншої за температуру спалаху, та припинити горіння рідини (декану).

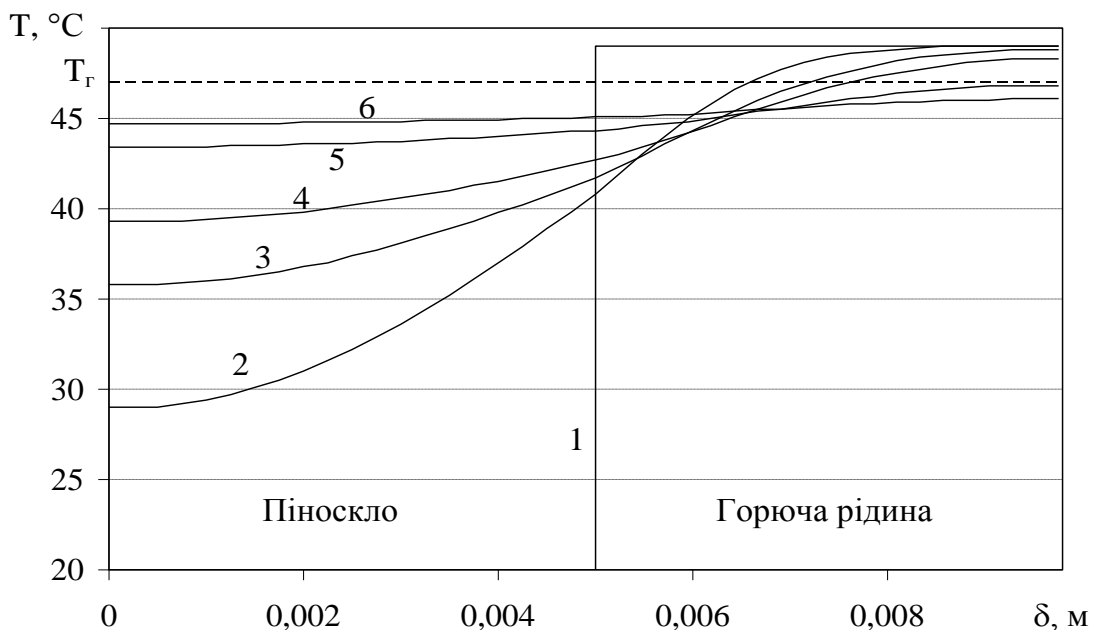


Рис. 3.10 – Розподіл температури в піносклі та поверхневому шарі рідини в часі: 1 – $t = 0 \text{ с}$; 2 – $t = 10 \text{ с}$; 3 – $t = 20 \text{ с}$; 4 – $t = 30 \text{ с}$; 5 – $t = 60 \text{ с}$; 6 – $t = 80 \text{ с}$

Водночас необхідно зауважити, що наявність піноскла над поверхнею рідини зменшує тепловий потік до неї від зони горіння, що також призводить до зменшення інтенсивності горіння.

На підставі вищесказаного можна зробити висновок, що, відповідно до

побудованої математичної моделі процесу охолодження поверхневого шару рідини, що горить у резервуарі, гранулами піноскла, охолоджувальна дія забезпечується двома механізмами. Спочатку відбувається механічне перемішування поверхневого шару рідини з її менш гарячими нижніми шарами, внаслідок процесу подавання гранул піноскла на поверхню рідини. Далі відбувається теплообмін між гранулами та рідиною, що їх оточує, за рахунок чого відбувається додатковий відбір тепла від поверхневого шару рідини, що може привести до згасання, якщо кінцева температура процесу охолодження буде меншою за температуру спалаху даної рідини.

3.3 Визначення параметрів бінарного шару «гель–піноскло»

3.3.1 Моделювання процесу переносу пари рідини крізь двошаровий матеріал «гель–піноскло»

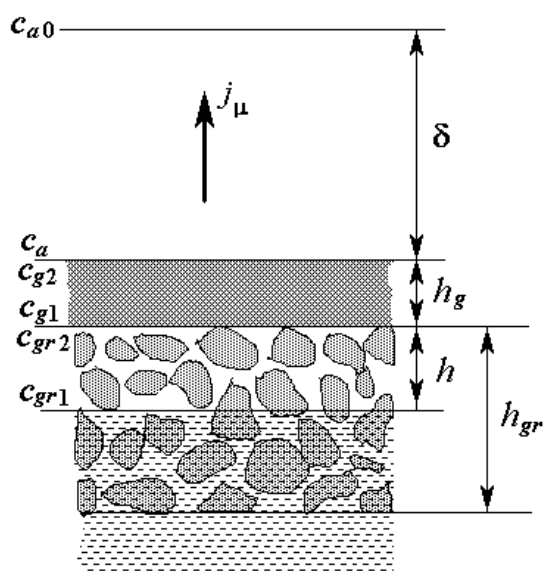


Рис. 3.11 – Просторова схема задачі переносу пари горючої рідини крізь двошаровий матеріал «гель–піноскло»

яка не занурена в рідину, має товщину h . Шар гранул відокремлений від зовнішнього (повітряного) середовища шаром гелю товщиною h_g . Над гелевим шаром розташований перехідний шар товщиною δ , в межах якого концентрація пари рідини c (моль·м⁻³) змінюється від свого значення у поверхневому шарі гелю до значень у зовнішньому просторі. На схемі індекси при концентраціях відповідають розташуванню в просторі: « a » – повітряний простір, « g » – гелевий шар, « gr » – порожнини у шарі гранульованого матеріалу; індекси «1» і «2» відповідають нижній та верхній частинам відповідного шару.

Існує однозначний взаємозв'язок висоти h з товщиною шарів h_{gr} та h_g відповідно до співвідношення:

Попередні дослідження показали наявність ізолюючих властивостей як у гелевого шару, так і у шару легкого носія. Для прогнозу можливості та ефективності гасіння рідин бінарною вогнегасною системою «гель–піноскло» необхідно провести моделювання процесу переносу пари рідини крізь зазначений двошаровий матеріал. Завданням моделювання є визначення характеристик цього процесу в стаціонарному режимі й оцінка часу виходу на цей режим.

Схему аналізованої ситуації зображено на рис. 3.11.

Заштрихована область відповідає рідині, на поверхні якої плаває шар гранул піноскла. Товщина цього шару позначена як h_{gr} . Частина шару піноскла,

$$h = h_{gr} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{gr}}{\rho_f} \right) - h_\varepsilon \frac{\rho_\varepsilon}{(1 - r_v) \rho_f},$$

де ρ_{gr} , ρ_ε , ρ_f – густина матеріалу гранул, гелю й рідини відповідно, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;
 r_v – об'ємна частка пустот у гранульованому матеріалі.

Перенос пари рідини крізь порожнини гранульованого матеріалу здійснюється шляхом дифузії. Відповідне рівняння стаціонарного масопереносу через цей шар має вигляд:

$$j_{\mu.gr} = \frac{D_{gr}}{h} (c_{gr1} - c_{gr2}), \quad (3.64)$$

де $j_{\mu.gr}$ – щільність молярного потоку пари крізь шар гранул, у розрахунку на одиницю площі шару, $\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; D_{gr} – коефіцієнт дифузії пари крізь шар гранул, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; c_{gr1} , c_{gr2} – концентрації пари в пустотах шару гранульованого матеріалу на нижній та верхній його межах (рис. 3.11).

Оскільки розміри областей між гранулами великі, у порівнянні з довжиною вільного пробігу молекул газу, виконується співвідношення:

$$c_{gr1} = c_s, \quad (3.65)$$

де c_s – рівноважна концентрація пари біля поверхні рідини, $\text{моль} \cdot \text{м}^{-3}$.

Коефіцієнт дифузії пари в повітрі крізь шар гранул D_{gr} є пропорційним коефіцієнту дифузії пари в повітрі без гранул D_a , $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. В роботі [276] отримано відповідну оцінку:

$$D_{gr} \leq D_a \cdot \left(\frac{h}{l_m} \right)^2 \cdot r_v, \quad (3.66)$$

де r_v – об'ємна частка пустот, що складається із гранул шару, крізь які рухаються пари рідини; l_m – середнє значення довжини трубки струму між поверхнями шару, м (утворюються трубки струму, паралельні векторам густини потоку пари рідини, що дифундує; співвідношення (h/l) практично не залежить від товщини шару h).

У зв'язку з малою текучістю гелю перенос пари горючої рідини крізь гель має виключно дифузійний характер. Відповідне рівняння стаціонарного масопереносу в гелевому шарі має вигляд:

$$j_{\mu,g} = \frac{D_g}{h_g} (c_{g1} - c_{g2}), \quad (3.67)$$

де $j_{\mu,g}$ – поверхнева густина молярного потоку пари рідини крізь шар гелю, моль·м⁻²·с⁻¹; D_g – коефіцієнт дифузії пари в гелі, м²·с⁻¹; c_{g1} , c_{g2} – концентрація пари в шарі гелю біля відповідних його поверхонь, моль·м⁻³, відповідно до рис. 3.11.

На межі порожнин гранульованого матеріалу з гелевим шаром виконується умова рівноваги фаз, у зв'язку з чим концентрації пари на цій межі пов'язані співвідношенням:

$$c_{g1} = \frac{c_{gr2}}{k_1}, \quad (3.68)$$

де k_1 – коефіцієнт розподілу.

Аналогічна умова рівноваги фаз пов'язує між собою концентрації пари рідини на межі гелю з повітрям:

$$c_{g2} = \frac{c_a}{k_2}, \quad (3.69)$$

де k_2 – значення коефіцієнта розподілу у відповідній межі (даний коефіцієнт є функцією температури, у зв'язку з чим, у разі ізотермічної дифузії, $k_1 = k_2 = k$).

Поверхнева густина молярного потоку пари в повітрі $j_{\mu,a}$ задовольняє рівнянню масовіддачі [256]:

$$j_{\mu,a} = \beta (c_a - c_{a0}), \quad (3.70)$$

де c_{a0} – концентрація пари рідини в повітрі (в ядрі газової фази) на відстанях, що перевищують ширину перехідної області δ (рис. 3.11); β – коефіцієнт масовіддачі пари в повітрі, м·с⁻¹.

Коефіцієнт β пов'язаний з шириною перехідної області δ співвідношенням:

$$\beta = \frac{D_a}{\delta}, \quad (3.71)$$

де D_a – коефіцієнт дифузії пари в повітрі, м²·с⁻¹.

У свою чергу, ширина перехідної області оцінюється співвідношенням:

$$\delta = \frac{l}{Nu_D}, \quad (3.72)$$

де l – характерний просторовий розмір задачі, м; Nu_D – дифузний критерій Нуссельта (синонімічна назва – критерій Шервуда Sh).

У нестационарному режимі завжди виконується умова $j_{\mu.gr} \geq j_{\mu.g} \geq j_{\mu.a}$ і рівність потоків досягається лише в разі повного виходу процесу масопереносу на стаціонарний режим. У цьому режимі спільне розв'язання системи рівнянь (3.64)–(3.70) дозволяє отримати загальне максимально можливе значення поверхневої густини молярного потоку пари рідини $j_{\mu.gr} = j_{\mu.g} = j_{\mu.a} = j_{\mu}$, яке, в разі ізотермічної дифузії, має вигляд:

$$j_{\mu}(h_g, h) = \frac{\beta \cdot \left(c_s \cdot \frac{k_2}{k_1} - c_{a0} \right)}{1 + \beta \cdot k_2 \cdot \frac{h_g}{D_g} + \beta \cdot \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{h}{D_{gr}}}. \quad (3.73)$$

Співвідношенню (3.73), з огляду на формулу (3.71), можна надати форму:

$$j_{\mu}(h_g, h) = \frac{j_{\mu}(0,0)}{1 + k_2 \cdot \frac{h_g}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_g} + \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{h}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_{gr}}} \approx \frac{j_{\mu 0}}{K}, \quad (3.74)$$

де символом $j_{\mu 0} = \beta(c_a - c_{a0})$ (3.75)

позначена густина потоку рідини, що випаровується з вільної поверхні, а параметр K задається співвідношенням:

$$K = 1 + k_2 \cdot \frac{h_g}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_g} + \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{h}{\delta} \cdot \frac{D_a}{D_{gr}}. \quad (3.76)$$

Використовуючи співвідношення (3.70), (3.73) і (3.76), можна визначити концентрацію пари безпосередньо над поверхнею шару гелю:

$$c_a = \frac{j_{\mu}}{\beta} + c_{a0} = \frac{c_s \cdot \frac{k_2}{k_1} + (K-1)c_{a0}}{K} \approx \frac{c_s}{K}. \quad (3.77)$$

З формул (3.74) і (3.77) випливає, що нанесення шарів гранульованого матеріалу і гелю на поверхню рідини в K раз зменшує як стаціонарний потік пари горючої рідини, так і її концентрацію на виході у повітряний простір.

Потік (3.73) досягається у стаціонарному режимі, вихід на який відбувається за час τ_{st} , що перевищує суму характерних часів дифузії пари крізь шари гранульованого матеріалу τ_{gr} та гелю τ_g :

$$\tau_{rg} = \frac{h^2}{D_{gr}}, \quad (3.78)$$

$$\tau_g = \frac{h_g^2}{D_g}. \quad (3.79)$$

Для проведення чисельної оцінки параметрів K , τ_{gr} і τ_g можна припустити, що властивості гелю мало відрізняються від відповідних властивостей води [257, 277], що розглянуто у розд. 3.1.1. Оцінка переносу пари буде здійснена на прикладі октану для температури 20 °С.

Значення коефіцієнта розподілу $k = k_2 \approx k_1$ можна отримати на підставі формули (3.69), обираючи для концентрації c_a максимально можливе значення c_s . При цьому для оцінки величини концентрації рідини у воді c_{g2} використовується довідкове значення коефіцієнта розчинності (наприклад, октану) у воді k_m [258], а для оцінки концентрації насичених парів октану c_s – емпірична формула Антуана:

$$\lg p_s = A - \frac{B}{t + C}, \quad (3.80)$$

де A , B , C – константи Антуана; t – температура за шкалою Цельсія, що визначає тиск насиченої пари p_s , кПа (з можливістю подальшого перерахування тиску в концентрацію на основі рівняння стану ідеального газу).

Так, для октану $k_m = 1,5 \cdot 10^{-5}$ г/г H_2O ; такій розчинності відповідає його концентрація:

$$c_{g2} = \frac{k_m \cdot \rho_w}{\mu} = 0,13 \text{ моль м}^{-3}. \quad (3.81)$$

В оцінці (3.81) прийнято низьке значення розчинності ($k_m \ll 1$), значення густини води $\rho_w = 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ та молярної маси октану $\mu = 114 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-3}$.

Константи Антуана рівняння (3.80) для октану мають значення $A = 6,094$, $B = 1379,6$, $C = 211,9$, що за температури $t = 20$ °С дає розрахунковий тиск насиченої пари $p_s = 1,40$ кПа. Такому тиску в разі ідеального газу відповідає концентрація:

$$c_s = \frac{P_s}{R \cdot T} = 0,57 \text{ моль} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (3.82)$$

де R – універсальна газова стала, $R = 8,314$ Дж·моль⁻¹·К⁻¹; T – абсолютна температура пари, К.

Використовуючи результати (3.81), (3.82) можна отримати оцінку коефіцієнта розподілу октану за температури 20 °С:

$$k = \frac{c_s}{c_{g2}} = 4,4. \quad (3.83)$$

Коефіцієнт дифузії D_g можна оцінити за формулою для визначення коефіцієнта дифузії броунівської частинки (на прикладі молекули октану) в рідині (воді):

$$D_g = \frac{k_B \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \rho_w \cdot \nu_w \cdot r_0}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad (3.84)$$

де k_B – стала Больцмана, $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹; ν_w – коефіцієнт кінематичної в'язкості води, м²·с⁻¹; r_0 – ефективний радіус дифундуючої частинки, м.

На підставі того, що за температури 20 °С довідкове значення $\nu_w = 1,005 \cdot 10^{-6}$ м²·с⁻¹, а оціночне значення $r_0 = 3,8 \cdot 10^{-10}$ м, з виразу (3.84) коефіцієнт дифузії для молекули октану становить $D_g = 5,6 \cdot 10^{-10}$ м²·с⁻¹.

Згідно зі співвідношенням (3.79) характерний час дифузії в гелевому шарі:

$$\tau_g = 1,8 \cdot 10^3 \cdot h_g^2, \quad (3.85)$$

де h – товщина гелевого шару, мм.

Коефіцієнт дифузії пари октану в повітрі можна визначати використовуючи емпіричне співвідношення:

$$D_a = D_{a,0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^2, \quad (3.86)$$

де $T_0 = 273$ К; $D_{a,0}$ – значення коефіцієнта дифузії за температури T_0 .

Для октану довідкове значення $D_{a,0} = 5.5 \cdot 10^{-6}$, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, в результаті за температури 20°C коефіцієнт дифузії пари октану в повітрі становить $D_a = 6,3 \cdot 10^{-6}$ $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Для оцінки D_g можна використати співвідношення (3.66), прийнявши $(h/l_m)^2 = 0,5$ та $r_v = 0,25$, тоді значення D становитиме: $D_{gr} = 0,8 \cdot 10^{-6}$ $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Така величина D дає (згідно (3.78)) характерний час виходу на стаціонарний режим випаровування:

$$\tau_{gr} = 1,25 \cdot 10^2 \cdot h^2, \quad (3.87)$$

де h – товщина шару гранульованого матеріалу, см.

Підставляючи отримані значення величин $k = k_2 \approx k_1$, D_g , D_{gr} , D_a у формулу (3.76) та користуючись (3.72), можна отримати оцінку величини мінімального значення коефіцієнта зменшення потоку шарами гранульованого матеріалу та гелю:

$$K = 1 + 5,0 \cdot 10^4 \cdot \frac{h_\varepsilon}{\delta} + \frac{h}{\delta} \cdot \frac{1}{r_v} \cdot \left(\frac{l_m}{h}\right)^2 = 1 + Nu_D \cdot \left(5,0 \cdot 10^4 \cdot \frac{h_\varepsilon}{l} + 8 \cdot \frac{h}{l}\right). \quad (3.88)$$

Враховуючи, що мінімальне значення $Nu_D \sim 1$, то співвідношення (3.88) дає наступну оцінку гальмування випаровування бінарним шаром «гель-піноскло»: за характерних розмірів поверхонь $l \sim 1$ м гальмуюча дія гелевого шару для процесу випаровування рідин у повітря є помітною вже за товщини $h_\varepsilon \sim 1$ мм навіть у стаціонарному режимі. Таким чином, ефект гальмування випаровування гелевим шаром перевищує ефект гальмування випаровування шаром пористого матеріалу майже на 4 порядки.

У проведених експериментальних дослідженнях [22, 236, 267] (розд. 3.1.2) встановлено, що мінімальна товщина суцільного гелевого шару, нанесеного на горизонтальну поверхню, повинна бути не менше 1 мм. У розд. 3.2.2 та роботах [19, 278] показано, що найбільш ефективно властивості піноскла реалізуються за його товщини більше за 5 см. Прийmemo ці товщини за мінімальні. Розраховане значення коефіцієнта зменшення потоку пари октану для такої товщини ізолюючих шарів за рівнянням (3.88) складе 51,4. За товщини шару гелю 2 мм значення K буде дорівнювати 101,4.

Таким чином, на підставі результатів математичного моделювання процесу випаровування пари рідини крізь бінарний ізолюючий шар, що складається з гелю, нанесеного на поверхню шару гранульованого піноскла, оцінка коефіцієнта зменшення швидкості випаровування октану за стаціонарного режиму дала наступні результати: для товщини шару гелю 2 мм й товщини шару піноскла 5 см швидкість випаровування октану зменшується більш, ніж у 100 разів, у порівнянні зі швидкістю випаровування з вільної поверхні рідини.

3.3.2 Експериментальне визначення ізолюючих властивостей бінарного шару «гель–піноскло»

В якості горючої рідини був обраний бензин АІ-92. Визначити швидкість випаровування бензину в той самий спосіб, як і у випадку моношару піноскла, неможливо [22, 45, 266]. Втрата маси у разі бінарного шару буде складатися із втрати маси води з шару гелю та бензину з об'єму рідини. Для визначення ізолюючих властивостей бінарного шару «ПС + гель» була задіяна модифікована методика з визначення ізолюючих властивостей шару гелю (розд. 3.1.2).

Спочатку було досліджено швидкість випаровування рідин з вільної поверхні. Для цього 150 мл бензину АІ-92 було розташовано у металевій ємності циліндричної форми діаметром 10,8 см (площа – 91,6 см²) з висотою борту 3,2 см. Після цього гравіметричним методом визначалась втрата маси за одну годину. Зважування здійснювалось за допомогою електронних ваг ТНВ.600, що забезпечують точність вимірювання $\pm 0,01$ г. Досліди проводили за температури $(21 \pm 1,0)^\circ\text{C}$.

Вивчення процесу випаровування бензину крізь бінарний шар «ПС + гель» було проведено за схемою: спочатку проводилось зважування посудини з бензином; далі досліджувалась зміна маси цієї посудини, накритої досліджуваною ізолюючою вогнегасною системою, див. рис. 3.12.



Рис. 3.12 – Зважування ємності з бензином, ізолюваної сіткою з бінарним шаром «ПС + гель»

Для утримання шару піноскла було використано ємність із сітчастим дном та вертикальним бортом висотою 4 см. Після засипання піноскла із розміром гранул (1÷1,5) см на сітку в ємності на ній утворювався шар гранульованого піноскла висотою 4 см. На поверхню піноскла наносився шар гелю.

Бічні поверхні сітки при набризкуванні закривалися екранами. Через одну годину витримування сітка з піноскла знімалася і проводилось зважування ємності з бензином. За зменшенням загальної маси розраховувалась маса бензину, що випарувалась. Паралельно проводився контроль динаміки зміни маси ємності з бензином та двошарової системи, яку було обрано для ізоляції випаровування. На рис. 3.12 наведено етап зважування ємності з сіткою та бінарним шаром «ПС + гель».

У табл. 3.10 наведено дані, які показують вплив поверхневої витрати гелю (Φ), нанесеного на шар піноскла товщиною 4 см, на втрату маса бензину (Δm) та коефіцієнт уповільнення випаровування (K).

Таблиця 3.10 – Вплив поверхневої витрати нанесення гелю на шар ПС на характеристики випаровування бензину

Витрата гелю, Φ , г/см ²	Втрата маси бензину, Δm , г	Коефіцієнт уповільнення випаровування, K
0	3,42	1
0,26	0,94	3,6
0,39	0,76	4,5
0,47	0,34	10,2
0,63	0,15	22,4
0,81	0,11	31,1

Аналіз наведених даних дозволяє зробити висновок, що за умови нанесення шару гелю на поверхню шару піноскла коефіцієнт уповільнення випаровування від деякого значення починає швидко збільшуватися. Це свідчить про наявність точки перегину цієї залежності та зміну механізму, який визначає ефективність механізму ізоляції продуктів випаровування від зони горіння. Для можливості аналізу такого становища було проаналізовано характер збільшення коефіцієнта уповільнення випаровування шляхом побудови характерних графічних залежностей для малих та великих витрат гелю (рис. 3.13).

На рис. 3.13 подано експериментальні дані: «1» – за рахунок звуження каналів випаровування; «2» – за рахунок появи суцільного шару гелю та нарощування його товщини. Таким чином, дані табл. 3.10 та рис. 3.13 демонструють наявність двох процесів, які реалізуються за умови утворення ізолюючого шару гелю на поверхні піноскла. Так, за витрат гелю до 0,4 г/см² спостерігається повільне зменшення інтенсивності випаровування бензину зі зростанням поверхневої витрати нанесення гелю на шар піноскла (пряма 1). Цей ефект можна пояснити звуженням каналів випаровування у процесі набризкування та обростання гелем поверхневих гранул шару піноскла. Другим процесом, який саме і призводить до ефективного гальмування випаровування, є поява суцільних осередків гелю, починаючи з його поверхневої витрати 0,45 г/см² (пряма 2). Дана залежність описується рівнянням:

$$K = 64,29\Phi - 20,714. \quad (3.89)$$

і дозволяє оцінювати коефіцієнт сповільнення випаровування для поверхневої витрати нанесення гелю на шар піноскла, більшої за $0,3 \text{ г/см}^2$.

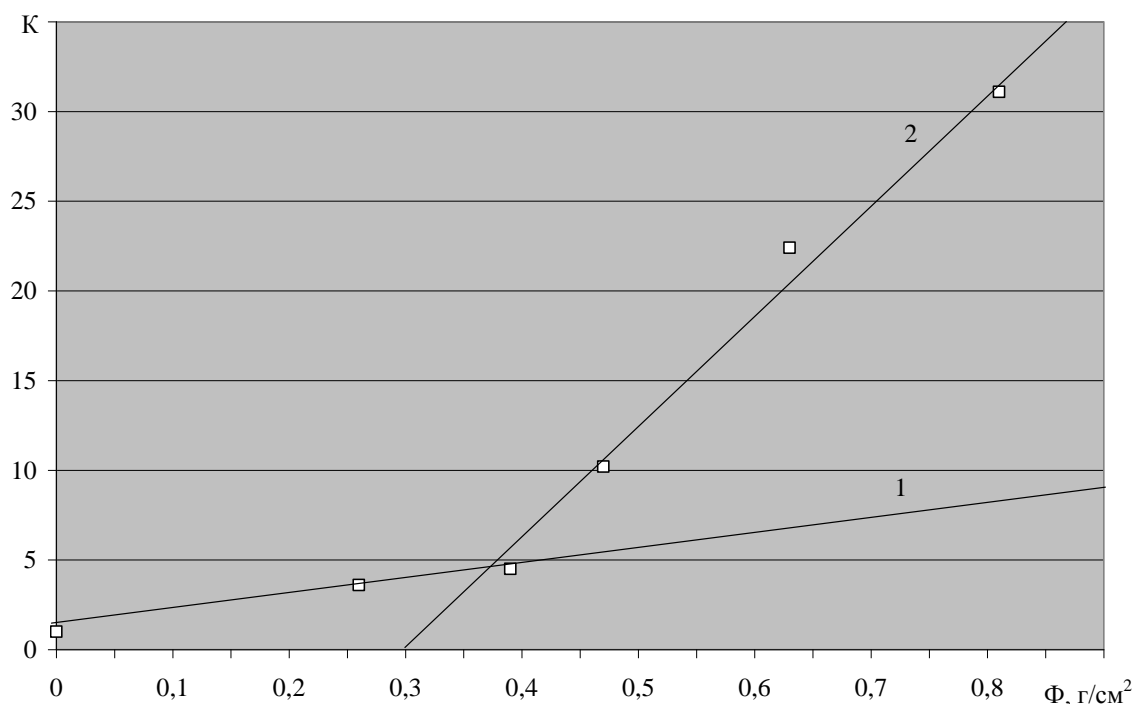


Рис. 3.13 – Характер сповільнення випаровування бензину в умовах збільшення поверхневої витрати нанесення гелю на шар піноскла

За результатами даних рис. 3.13 та візуальних спостережень можна казати про те, що, починаючи з витрати гелю $(0,65 \div 0,7) \text{ г/см}^2$, утворюється суцільний шару гелю на всій поверхні шару гранул піноскла фракції $(1 \div 1,5) \text{ см}$. За таких умов коефіцієнт уповільнення випаровування перевищує 20. У разі утворення суцільного шару гелю з товщиною шару між частками гранул не менше за 1,5 мм коефіцієнт уповільнення перевищує 30, що співпадає з даними розд. 3.1.2 для суцільного шару гелю на рівній поверхні.

3.3.3 Визначення охолоджуючих властивостей бінарного шару «гель–піноскло»

Для визначення охолоджуючої дії бінарного шару «гель–піноскло» були проведені експериментальні дослідження [271] з охолодження розігрітого додекану запропонованою вогнегасною системою, за умов попереднього утворення шару піноскла та наступного нанесення шару гелю з питомою поверхневою витратою $0,7 \text{ г/см}^2$. Як показали проведені раніше дослідження, така питома поверхнева витрата забезпечує утворення суцільного шару гелю на шарі піноскла з розміром гранул $(1 \div 1,5) \text{ см}$. Експеримент проводився за тією ж методикою, що і без нанесення шару гелю (розд. 3.2.3). Нанесення шару гелю здійснювалось, через одну хвилину після засипання піноскла. При цьо-

му стінки металевієї ємності захищалися екранами від потрапляння на них компонентів ГУС. У табл. 3.11 та на рис. 3.14 наведено отримані в досліді результати стосовно зниження температури після засипання сухого (ΔT_1) та змоченого піноскла (ΔT_2), за умови наступного нанесення шару гелю за різних температур нагрітого додекану (T_d).

Таблиця 3.11 – Зниження температури додекану сухим та змоченим піносклом із шаром гелю з питомою поверхневою витратою $0,7 \text{ г/см}^2$

Температура додекану, T_d °C	80	100	120	140	160
Гель на сухому піносклі: ΔT_1 °C	4,6	6,2	7,8	10,7	12,8
Гель на змоченому піносклі: ΔT_2 °C	19,8	24,4	33,5	50,9	70,2

На рис. 3.14 узагальнено результати дослідів, отриманих у даному та попередньому (розд. 3.2.3) експериментах з охолодження додекану сухим або змоченим піносклом без нанесення шару гелю та з його наявністю за різних температур додекану.

Співставлення отриманих даних (див. рис. 3.14) для бінарного шару з відповідними результатами без нанесення шару гелю (які отримані у розд. 3.2.3) дозволяє зробити висновок про незначний вплив шару гелю на ефект зниження температури нагрітої рідини. Це пояснюється тим, що гель за таких умов безпосередньо не контактує з розігрітою рідиною. Його охолоджуюча дія зумовлена контактом з парою розігрітої рідини.

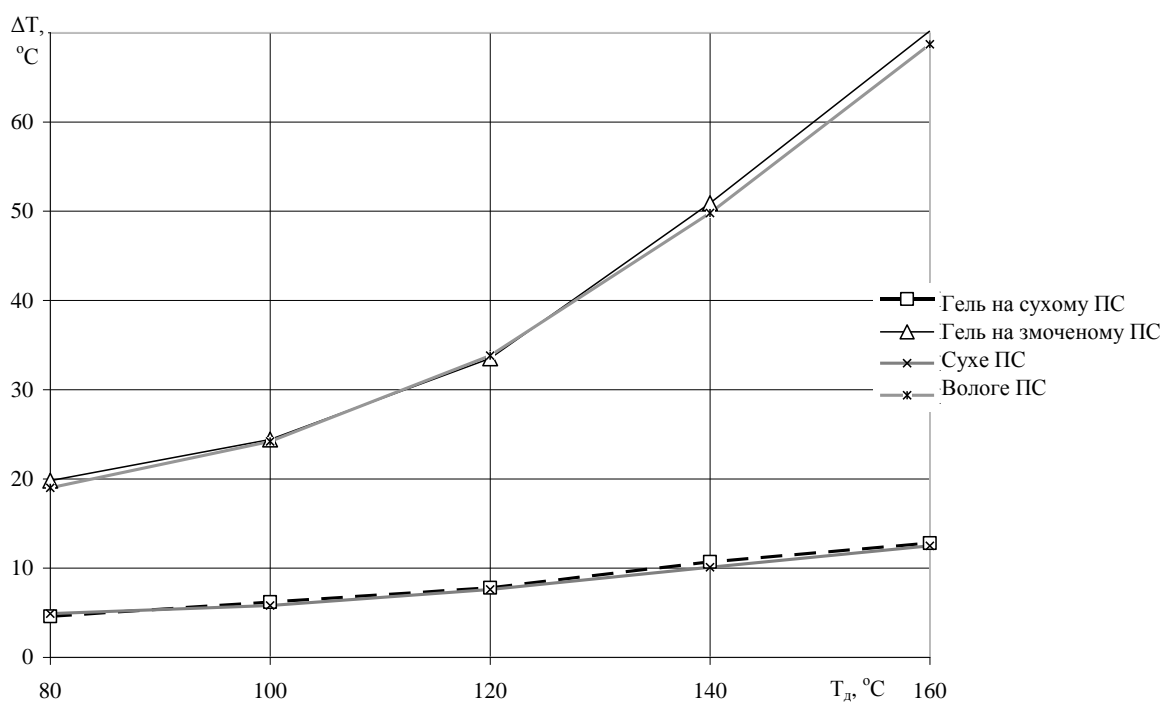


Рис. 3.14 – Ефект охолодження поверхневого шару горючої рідини (додекану) вогнегасними системами на основі піноскла

3.3.4 Визначення часу працездатності бінарного шару «гель–піноскло»

Однією з найважливіших характеристик систем пожежогасіння є час їх вогнегасної дії. Так найбільш поширений вогнегасний засіб для гасіння горючих рідин – повітряно-механічні піни – поступово руйнуються протягом часу гасіння пожежі в резервуарі. Час, виконання своїх вогнегасних функцій піни (стійкість) становить від декількох хвилин (на полярних рідинах, а також за високих інтенсивностей теплового потоку) до декількох десятків хвилин. Для успішного гасіння резервуарів з рідинами швидкість покриття горючої рідини піною повинна перевищувати швидкість її руйнування. Це вимагає забезпечення великої інтенсивності подавання піни та збільшення обсягів подавання піни. У будь-якому разі для гасіння пожежі резервуарів з горючими рідинами потрібно створити умови згасання на тривалий період. У разі самочинного охолодження стінок резервуара необхідний час підтримання вогнегасної дії може досягати однієї години. За цей час велика частина піни руйнується. Для зменшення цього часу необхідне штучне охолодження стінок резервуара. Використання ж гранульованого піноскла, як одного з компонентів вогнегасної системи дозволяє виключити цей недолік, оскільки воно за час пожежогасіння на змінює своїх властивостей.

На етапі вибору легкого пористого носія для шару гелю (розд. 2) було встановлено, що плавучість шару з гранульованого піноскла, отриманого механічним подрібненням блоків піноскла, зберігається необмежено довго. За 10 діб шар як сухого, так змоченого піноскла у бензині зберігся у незмінному вигляді.

На відміну від піноскла, шар гелю з часом втрачає вологу та поступово руйнується. Попередні дослідження показали, що за обраного способу подавання компонентів ГУС на гладку горизонтальну поверхню суцільний шар гелю утворюється за питомої витрати $(0,13 \div 0,14)$ г/см². У разі нанесення шару гелю на шар гранул піноскла розміром $(1,0 \div 1,5)$ см суцільний ізолюючий шар гелю утворюється за питомої поверхневої витрати гелю $\sim 0,7$ г/см². В такому випадку його розтріскування із втратою суцільності настає за температури $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ за час, що перевищує 3 доби. Підтримання вогнегасних умов протягом такого часу достатньо для повної ліквідації пожежі резервуара з ГР та ЛЗР.

3.4 Висновки за розділом 3

1. На основі результатів математичного моделювання процесу дифузії пари горючої рідини крізь шар гелю показано, що суцільний шар гелю з поверхневою витратою $(0,13 \div 0,14)$ г/см² у разі досягнення стаціонарного режиму забезпечує зниження швидкості випаровування більш, ніж у 10 разів. Зі зростанням товщини шару гелю ізолюючі властивості підвищуються.

2. Експериментально встановлено, що для вуглеводневих рідин коефіцієнт уповільнення випаровування тонким суцільним гелевим шаром із поверхневою витратою $(0,13 \div 0,14)$ г/см² перевищує 25. Температура мало впливає

на коефіцієнт сповільнення випаровування. З часом ізолюючі властивості гелевих шарів зменшуються суттєво для тонких шарів і у незначній мірі для товстих шарів.

3. Коефіцієнт уповільнення випаровування пари горючих рідин мало змінюється зі складом гелю. Тому в якості вогнегасного гелеутворюючого складу обрано систему з найменшим вмістом гелеутворювача й каталізатора гелеутворення – $\text{CaCl}_2(5\%) + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2(5\%)$.

4. На основі результатів математичного моделювання процесу переносу пари горючої рідини крізь шар гранульованого матеріалу встановлено, що сповільнююча дія цього шару загальною товщиною 10 см становить 1,8, за умови досягнення стаціонарного режиму. Час встановлення стаціонарного режиму за збільшення товщини шару від 5 см до 10 см збільшується від 0,87 години до 3,5 годин. До встановлення стаціонарного режиму коефіцієнт уповільнення випаровування буде перевищувати цю величину.

5. Експериментально встановлено, що зменшення швидкості випаровування бензину зростає зі зростанням товщини шару гранульованого піноскла і досягає 5,6 разу за товщини шару 13,5 см. Це означає, що шар піноскла, крім функції носія шару гелю, дає суттєвий внесок у зменшення інтенсивності випаровування рідини.

6. На основі теоретичних і експериментальних досліджень встановлено, що ізолююча здатність суцільного гелевого шару перевищує ізолюючу здатність шару піноскла більш, ніж на два порядки. У разі утворення суцільного шару гелю на поверхні піноскла коефіцієнт уповільнення випаровування для вуглеводневих рідин перевищує 30.

7. На основі розробленої математичної моделі охолоджуючої дії сухого піноскла встановлено, що сухе піноскло може припинити горіння висококиплячих рідин без застосування гелеутворюючих систем.

8. Експериментально встановлено, що зниження температури розігрітих рідин змоченим піносклом у $(3,9 \div 5,5)$ разів перевищує відповідний ефект охолодження рідин сухим піносклом.

9. На основі результатів математичного моделювання процесу випаровування пари рідини крізь бінарний ізолюючий шар, що складається з гелю, який нанесено на поверхню піноскла, встановлено, що за товщини шару гелю 2 мм та шару піноскла 5 см швидкість випаровування октану зменшується більше, ніж у 100 разів, порівняно зі швидкістю випаровування з вільної поверхні.

10. Охолоджуюча дія бінарного шару «піноскло–гель» по відношенню до вуглеводневих рідин незначно перевищує охолоджуючу дію моношару піноскла.

11. Бінарний шар «піноскло–гель» з товщиною шару гелю $(6 \div 7)$ мм за температури $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ зберігає суцільність та ізолюючу здатність на поверхні горючих рідин протягом більш, ніж 3 доби.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕГАСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ПОЖЕЖОГАСІННЯ НА ОСНОВІ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ГЕЛЕУТВОРЮЮЧИХ СИСТЕМ

У розділі 3 було показано, що шари піноскла створюють ізолюючу, екрануючу та охолоджуючу дію. Гелеві шари, нанесені на шар піноскла, мають у десятки разів вищу ізолюючу дію, ніж шари ПС такої самої товщини. Однак високу ізолюючу дію гелеві шари виявляють лише в разі утворення суцільного шару. Для утворення суцільного шару гелю на гладкій горизонтальній поверхні потрібне його нанесення з питомою поверхневою витратою не менш $0,13 \text{ г/см}^2$. Для утворення суцільного шару гелю на поверхні шару із гранул ПС фракції (1,0÷1,5) см за даними попередніх дослідів потрібно забезпечити питому поверхневу витрату компонентів ГУС не менш, ніж за $0,7 \text{ г/см}^2$. У разі розміру гранул (1,5÷2,5) см та (2,5÷4,0) см для утворення суцільного шару гелю потрібно збільшити питому поверхневу витрату ГУС до $0,9 \text{ г/см}^2$ та $1,3 \text{ г/см}^2$ відповідно. Для забезпечення плавучості таких шарів гелю потрібна загальна товщина шару ПС більше 10 см. В іншому випадку шари гелю затоплюють шар піноскла й горюча рідина витискається поверх шарів гелю.

4.1 Експериментальне дослідження параметрів гасіння горючих та легкозаймистих рідин сухим піносклом на лабораторних модельних вогнищах пожежі класу «В»

4.1.1 Експериментальне дослідження масової швидкості вигорання та умов гасіння бензину сухим піносклом на лабораторних модельних вогнищах пожежі класу «В»

На першому етапі досліджень в якості ЛЗР було обрано бензин, як найпоширенішу горючу рідину. Саме з наявністю бензину пов'язане виникнення більшості пожеж резервуарів. Метою застосування будь-яких вогнегасних засобів є зменшення інтенсивності горіння певної речовини. Індикацією можливості зменшення інтенсивності горіння рідин може бути зміна такого параметра горіння як масова швидкість вигорання. Метою даного експерименту було проведення експериментального визначення масової швидкості вигорання бензину за умови наявності нанесеного на його поверхню шару гранульованого піноскла. Кількісно масову швидкість вигорання рідин V [270] визначають за співвідношенням:

$$V = \frac{\Delta m}{\tau \cdot S}, \quad (4.1)$$

де Δm – зміна маси рідини під час горіння, г; τ – час горіння, с; S – площа поверхні рідини, м^2 .

В якості лабораторного модельного вогнища пожежі класу «В» було обрано металеву ємність циліндричної форми із внутрішнім діаметром 11,2 см ($S = 98,5 \text{ см}^2$). У зазначений циліндр заливалося 100 мл бензину А-92 (зимового). При цьому товщина шару бензину становила $\sim 1 \text{ см}$. Далі заливався такий об'єм води, щоб поверхня бензину була нижче борту циліндра на 1 см. Після цього бензин підпалювався та гравіметричним методом визначалася втрата його маси кожні 30 с досліду до моменту завершення експерименту, тривалість якого становила 10 хв. Зважування здійснювалось за допомогою електронних ваг безперервного зважування ВТА-60-3-7. Точність зважування становила 0,5 г. Вимірювання проводилися за температури навколишнього повітря $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Спочатку досліджувалась зміна масової швидкості вигорання бензину в залежності від часу [25, 26, 28, 47]. Тобто передбачається, що є певна відмінність даної залежності від лінійної, внаслідок накладання процесів збільшення в часі прогрітого шару рідини та ступеня перегріву бортів модельного резервуара. На рис. 4.1 наведено зміну маси бензину в часі за умови вигорання з вільної поверхні (верхній графік, який демонструє найбільшу інтенсивність вигорання).

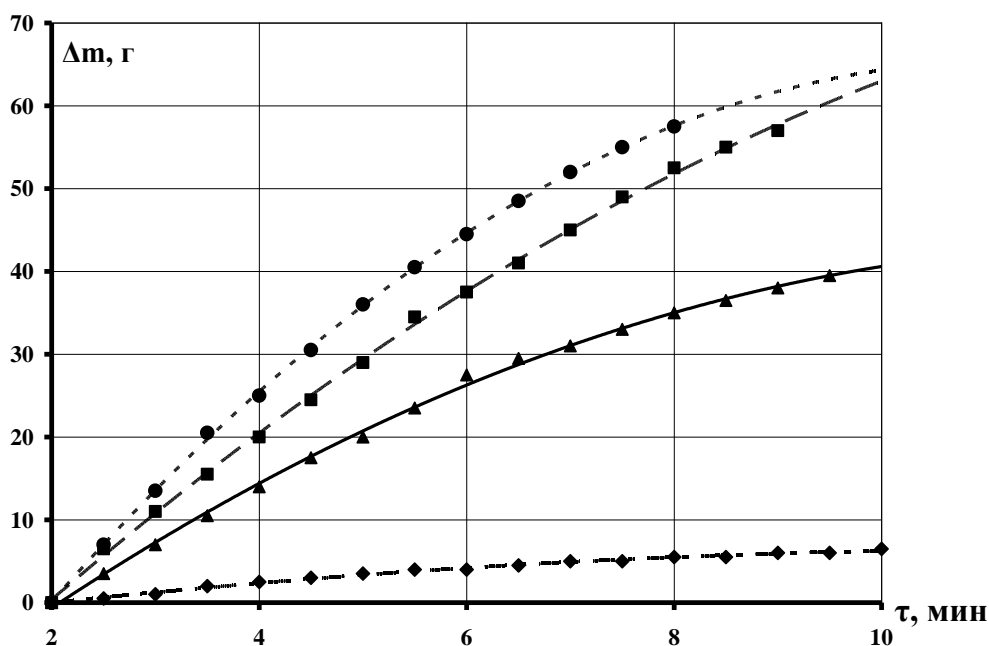


Рис. 4.1 – Зміна маси бензину (Δm) за час горіння (τ) за різної товщини шару гранульованого піноскла: ● – 0 см, ■ – 4 см, ▲ – 6 см, ◆ – 8 см

Надалі було досліджено швидкість вигорання бензину з нанесеним шаром піноскла. Експеримент проводився за тією ж методикою, що і без нанесеного шару, за винятком того, що об'єм води підбирався таким чином, щоб висота вільного борту становила 1 см після нанесення піноскла на поверхню бензину. Такий вибір стандартної висоти вільного борту в досліді зумовлений тим, що масова швидкість вигорання рідин сильно залежить від висоти вільного борту. А в попередньому досліді з визначення масової шви-

дкості вигорання бензину без шару піноскла (з вільної поверхні) проводилося саме за висоти вільного борту 1 см. Вимірювання товщини шару піноскла, що знаходиться вище рівня рідини, здійснювати у ході лабораторних досліджень у металевому (непрозорому циліндрі) важко. Тому всі дані, отримані в даному експерименті та у наступних, наводяться для загальної товщини шару гранульованого піноскла, яка складається з шару, що знаходиться нижче рівня рідини, та шару – вище рівня рідини. Відповідні значення втрати маси бензину (Δm), починаючи з другої хвилини після початку горіння, наведені на рис. 4.1.

У дослідях із піносклом шар легкого носія рівномірно засипався на поверхню, що горить, після однієї хвилини вільного горіння бензину. Фіксація значень втрати маси починалася після двох хвилин від початку горіння. Всього було досліджено швидкість вигорання бензину на 7 товщинах шару піноскла: 2, 4, 6, 7, 8, 9 та 10 см. Відповідні графічні залежності для трьох товщин шару піноскла з досліджених наведені на рис. 4.1. Аналіз результатів даного дослідження дозволяє зробити висновок, що в інтервалі часу від 2 до 6 хвилин спостерігаються залежності близькі до лінійних. Це означає, що масова швидкість вигорання бензину за цей проміжок часу є сталою.

На підставі отриманих даних щодо втрати маси бензину у процесі вигорання за рівнянням (4.1) були розраховані середні масові швидкості вигорання бензину за різної товщини шару піноскла. Загальна залежність зміни масової швидкості вигорання бензину від товщини шару ПС наведена на рис. 4.2.

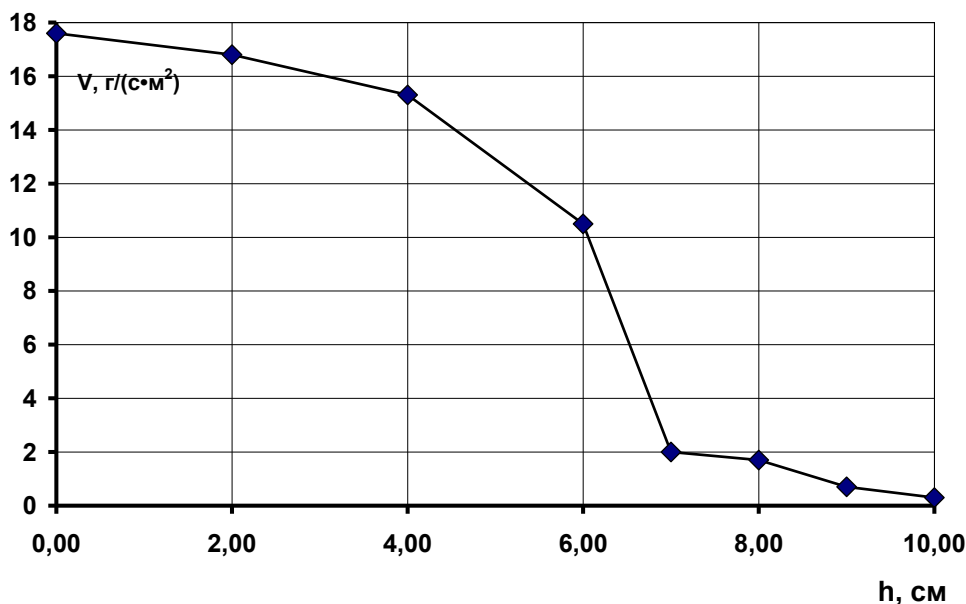


Рис. 4.2 – Залежність масової швидкості вигорання бензину (V) від товщини шару гранульованого піноскла (h)

Аналіз наведених графічних залежностей дозволяє дійти висновків:

– за умови збільшення товщини шару піноскла масова швидкість вигорання бензину зменшується;

– в інтервалі (0÷4) см зменшення масової швидкості вигорання є невеликим;

– в інтервалі (4÷7) см відбувається швидке зменшення масової швидкості вигорання бензину;

– в інтервалі товщин шару піноскла (7÷10) см масова швидкість вигорання бензину в десятки разів менше, ніж масова швидкість вигорання бензину з вільної поверхні.

Візуальні спостереження процесу горіння бензину з нанесеним шаром піноскла також показують, що за товщини шару піноскла більше за 7 см висота полум'я та швидкість конвекційних потоків над поверхнею шару піноскла є незначним. Причому за товщини шару (9÷10) см спостерігається лише локальне горіння на окремих ділянках із періодичним проскакуванням полум'я вглиб шару піноскла. У такому режимі горіння виявилось легко забезпечити остаточне згасання полум'я шляхом подавання будь-якого вогнегасного засобу з малою інтенсивністю. Так, у ході додаткових дослідів було встановлено, що згасання легко досягається за умови подавання розпорошеної води з малою витратою протягом 1 с. Такий самий результат забезпечується за короткочасного подавання компонентів ГУС або впливу повітряного потоку (зрив полум'я). Одночасно встановлено, що після припинення горіння такими засобами воно легко відновлюється – у разі внесення джерела запалювання в повітряний простір над поверхнею піноскла.

Співставлення результатів щодо впливу товщини шару піноскла на процес горіння бензину та його випаровування [278] дозволяє зробити наступні висновки. В інтервалі товщини шару піноскла (7÷10) см швидкість випаровування бензину зменшується в 2–5 разів, у порівнянні з випаровуванням з вільної поверхні. Однак у цьому ж інтервалі товщин шару піноскла, швидкість вигорання бензину зменшується в десятки разів, у порівнянні зі швидкістю горіння без нанесеного шару. Цю розбіжність можна пояснити тим, що швидкість випаровування, внаслідок наявності шару піноскла, зменшується лише за рахунок зменшення швидкості дифузії пари бензину крізь пористий матеріал. У той же час на швидкість вигорання бензину, крім зменшення швидкості дифузії, впливає ефект охолодження шару бензину під час горіння гранульованим піносклом та екранування шаром піноскла теплового потоку від полум'я до поверхні бензину.

Таким чином, запропонований для забезпечення плавучості шару гелю в горючих рідинах легкий негорючий носій – гранульоване піноскло – за товщин шару (7÷10) см дозволяє зменшити масову швидкість вигорання бензину в десятки разів. Це дозволяє знизити швидкість конвекційних потоків над поверхнею рідини, що горить, до рівня, який дозволяє успішно подавати компоненти ГУС в розпиленому вигляді.

4.1.2 Експериментальне дослідження масової швидкості вигорання та умов гасіння алканів сухим піносклом на лабораторних модельних вогнищах пожежі класу «В»

Продовження дослідження процесу вигорання горючих рідин, за умов наявності піноскла на їх поверхні, було здійснено на базі рідин ряду алканів, які входять до складу різних моторних палив: пентан, гептан, октан, декан і додекан [19, 45, 47, 280–285]. Так, гептан і октан містяться у великих кількостях у бензині. Декан наявний у значних кількостях у гасі. Параметри їх пожежної небезпеки наведені в табл. 4.1.

Перші дві рідини є низькокиплячими ($T_{\text{кип}} < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), октан, декан і додекан – висококиплячими ($T_{\text{кип}} > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Всі розглянуті алкани, крім додекану, відносяться до класу легкозаймистих рідин.

В експерименті було визначено швидкості вигорання рідких алканів як із вільних поверхонь, так і за різних товщин шару легкого носія (піноскла) на їх поверхні. Методика проведення експерименту була змінена у порівнянні з дослідом з бензином. Необхідність зміни пояснюється тим, що для багатьох з обраних алканів поверхневий шар рідини під час пожежі розігрівається вище за $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ і застосування води для регулювання рівня горючої рідини стає неможливим.

Таблиця 4.1 – Параметри пожежної небезпеки рідин ряду алканів.

Алкан	Температура, $^{\circ}\text{C}$			
	кипіння, $t_{\text{кип}}$	спалаху, $t_{\text{сп}}$	займання, $t_{\text{займ}}$	самоспалахування, $t_{\text{сс}}$
Пентан	36	-44	-34	286
Гептан	98	-4	-4	223
Октан	126	14	19	215
Декан	174	47	66	230
Додекан	216	77	103	202

Експеримент проводився за наступною методикою: 250 мл горючої рідини було розташовано в металеву ємність циліндричної форми із внутрішнім діаметром 11,2 см (поверхня випаровування – $S = 98,5\text{ см}^2$). Це дозволило створити шар рідини товщиною $\sim 2,5$ см. Після процедури запалювання факелом утворювалося дифузійне горіння над поверхнею рідини. У досліді з піносклом шар легкого носія рівномірно насипався на поверхню рідини, що горить, після двох хвилин вільного горіння. Фіксування значень втрати маси рідини для даного шару піноскла починалось через дві хвилини після моменту закінчення засипки піноскла з інтервалом 30 с. Вимірювання здійснювалось протягом трьох хвилин. Втрата маси рідини у процесі вигорання визначалася гравіметричним методом разом із лабораторною ємністю відомої маси. Зважування здійснювалось за допомогою електронних ваг безперервного зважування ГНВ-600. Точність зважування становила $\pm 0,01$ г. Експерименти проводилися за температури навколишнього повітря (18 ± 1) $^{\circ}\text{C}$. Після трьох хвилин горіння на

вказаному шарі піноскла засипався наступний шар піноскла та повторювалась процедура вимірювання втрати маси. Максимальна висота шару піноскла в експерименті становила 12 см. Кількісно експериментальну масову швидкість вигорання рідин (V_m) було визначено за співвідношенням (4.1) як середнє значення за час вимірювання. Відповідні результати розрахунків для досліджуваних горючих та легкозаймистих рідин наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Масові швидкості вигорання алканів за різної товщини шару сухого піноскла

Алкан	Масова швидкість вигорання вуглеводневих рідин V_m , г/(с·м ²), за товщини шару піноскла h , см						
	0 см	2 см	4 см	6 см	8 см	10 см	12 см
Пентан	17,8	15,2	13,9	10,9	8,1	5,4	4,1
Гептан	9,8	10	9,5	5,5	4,1	1,7	0,3
Октан	9,1	8,6	8,5	2,0	1,0	0,3	0
Декан	7,4	6,5	4,1	1,4	0	0	0
Додекан	6,2	5,4	2,2	0	0	0	0

За даними табл. 4.4 значення масової швидкості вигорання рідин “0” означає – припинення горіння. Точне значення критичної масової швидкості вигорання, за якої припиняється горіння рідин, не визначалось.

На рис. 4.3 наведено залежності зміни масової швидкості вигорання досліджених рідин ряду алканів від товщини шару сухого піноскла.

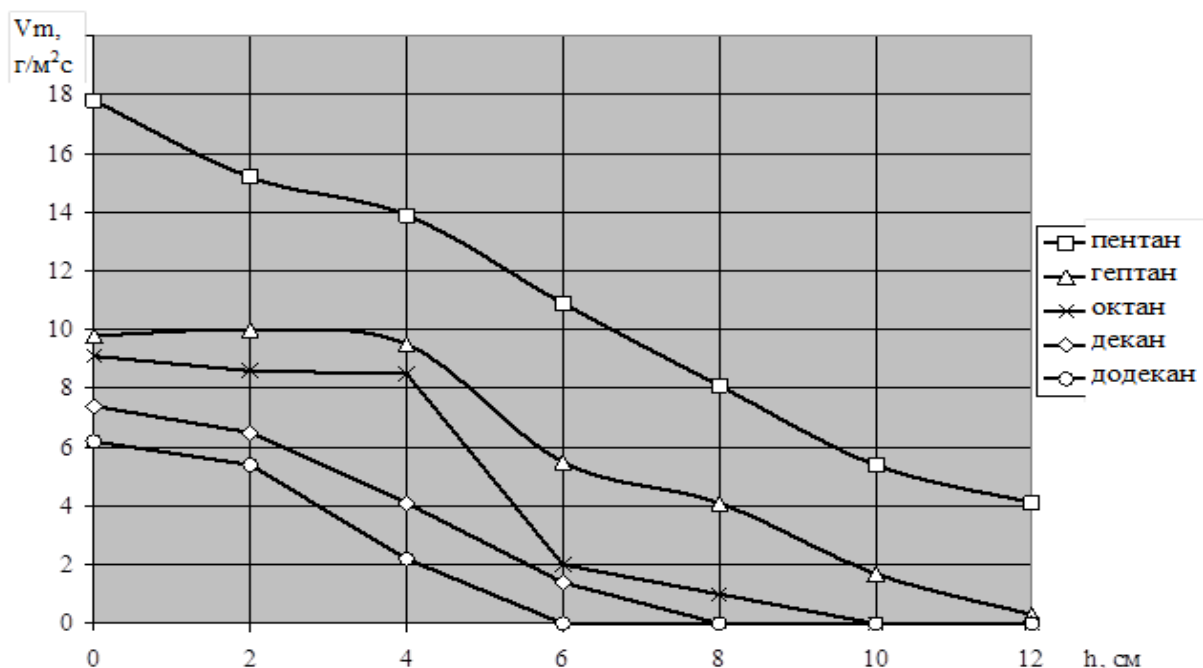


Рис. 4.3 – Залежність масової швидкості вигорання алканів від товщини шару сухого піноскла для лабораторного модельного вогнища

Результати, які наведено в табл. 4.2 та на рис. 4.3, показують, що зі збі-

льшенням висоти шару піноскла масова швидкість вигорання рідин ряду алканів знижується. Це вказує на наявність вогнегасних властивостей в легкого носія, оснований на його охолоджуючій, екрануючій та ізолюючій дії на процеси, що супроводжують горіння алканів. Відповідно виникає можливість пожежогасіння з використанням зазначених властивостей піноскла.

Ізолююча дія піноскла визначається тим, що його шар створює дифузійні ускладнення для проходження пари рідини в зону горіння. Охолоджуюча дія піноскла проявляється, головним чином, в момент його контакту з розігрітою під час пожежі рідиною та пов'язана з тим, що близько половини поданої маси гранульованого піноскла занурюється в розігрітий поверхневий шар рідкого вуглеводню. На першому етапі цього процесу відбувається перемішування поверхневих шарів рідини зі зменшенням їх середньої температури. На другому етапі – гранули піноскла за рахунок власної теплоємності поступово відбирають тепло від розігрітого шару рідини. Шар піноскла, що знаходиться вище рівня рідини, також проявляє охолоджуючу дію. Вона проявляється в охолодженні пари горючої рідини за рахунок її контакту з гранулами піноскла. У разі одночасного подавання вогнегасної кількості піноскла можна також говорити про дію гранульованого ПС як вогнеперешкоджувача.

Також важливим фактором є екранування поверхні рідини шаром піноскла від теплового випромінювання факела полум'я. Піноскло створює проміжний шар між полум'ям та рідиною, що горить, тому припиняється безпосередня дія теплового випромінювання на поверхню рідини та дисипація енергії теплового потоку в поверхневому шарі. За таких умов розігріву підлягає лише верхня частина шару піноскла. З такої точки зору розмір шару сухого піноскла над поверхнею рідини повинен бути більшим, ніж прогрітий внаслідок теплової дії полум'я шар, значення якого визначається очікуваним часом гасіння.

Всі означені ефекти призводять до поступового зменшення швидкості горіння рідини. У разі, якщо сумісна дія ефектів охолодження, ізоляції та екранування знизять тиск пари рідини нижче нижньої КМПП, буде досягнута умова згасання та настане повне припинення полум'яного горіння.

Згідно з даними експерименту нарощування шару піноскла призводить до припинення горіння, за умови досягнення товщини шару для декану та додекану – 8 см, а горіння октану – за шару 10 см; горіння пентану й гептану не припиняється за товщини шару піноскла 12 см.

За результатами аналізу впливу шару піноскла на випаровування рідин в умовах відсутності та наявності горіння можна дійти висновку, що у процесі горіння шар піноскла уповільнює випаровування у багато разів більш інтенсивно, ніж за відсутності горіння. Так, шар піноскла товщиною 10 см уповільнює випаровування пентану в процесі горіння в шість разів інтенсивніше, ніж в дослідях без горіння. Це підтверджує наявність двофакторної дії піноскла на швидкість випаровування алканів: якщо на процес випаровування впливають тільки дифузійні ускладнення (ізолююча дія), то у разі горіння виникають ефекти охолодження поверхні масою піноскла та її екранування від прогріву випромінюванням полум'я (теплоізолююча дія).

Візуальні спостереження процесу горіння рідких алканів з наявністю

шару піноскла показують, що за товщини шару піноскла більше 7 см висота полум'я і швидкість конвекційних потоків над поверхнею шару піноскла є незначними. У разі пентану та гептану, за товщини шару піноскла 12 см, спостерігаються лише осередки локального горіння з періодичним проскакуванням полум'я вглиб шару піноскла. У цьому випадку виявилось легко досягти припинення горіння пентану. Наприклад, встановлено, що згасання можна досягти подаванням розпорошеної води протягом 1 с. Аналогічний результат має місце за умови короткочасного подавання ГУС. Після припинення горіння пентану або гептану будь-яким з описаних способів воно знов виникає у разі дії джерела запалювання на пароповітряний простір над поверхнею ПС.

Для октану за товщини шару піноскла 12 см горіння припиняється. Спроба дії джерелом запалювання через одну хвилину після досягнення умови припинення горіння викликає спалах пари октану без подальшого продовження горіння. Для більш висококиплячих рідких алканів (декан та додекан) після припинення горіння в результаті нанесення шару ПС вплив відкритого полум'я не призводить до виникнення спалаху або до стійкого горіння.

Таким чином, шар гранульованого піноскла товщиною більше 10 см зменшує масову швидкість вигорання рідких вуглеводнів ряду алканів (крім пентану та гептану) на порядок. Водночас зменшується швидкість конвекційних потоків над поверхнею рідини, що горить, до рівня, який дозволяє успішно подавати компоненти ГУС у вигляді розпорошених струменів.

Нанесення шару піноскла товщиною (6–8) см дозволяє досягти припинення горіння висококиплячих рідин. Для пентану і гептану шар піноскла 12 см дозволяє знизити інтенсивність горіння до рівня, за якого згасання легко досягається імпульсним подаванням ГУС або розпорошеної води.

Результати дослідів з гасіння алканів сухим піносклом, одержані експериментально, відрізняються від теоретично розрахованих у розд. 3.2.3. Так, гасіння декану за рахунок охолодження, згідно з теоретичними розрахунками, досягається за товщини шару ПС 15 см. В експерименті визначено товщину шару ПС, яка забезпечує гасіння декану, – 8 см. Це пояснюється двома основними причинами. В реальному експерименті, окрім охолодження ГР, свій внесок у припинення горіння вносить ізоляція та екранування поверхні рідини. Іншим фактором пожежогасіння є додатковий вплив на процес згасання ефекту охолодження пари рідини за рахунок контакту з ПС. Тобто немає протиріччя між теоретичною моделлю охолодження та експериментальними результатами.

Таким чином, існує можливість гасіння рідин ряду алканів лише за умови застосування сухого піноскла в якості вогнегасної речовини. Відповідно виникає необхідність дослідження цих вогнегасних властивостей сухого піноскла на прикладі технічних рідин, пожежі яких на практиці трапляються частіше.

4.1.3 Експериментальне дослідження масової швидкості вигорання й умов гасіння технічних рідин сухим піносклом на лабораторних модельних вогнищах пожежі класу «В»

Продовження дослідження зміни масової швидкості вигорання рідин за різних товщин шарів піноскла було проведено з використанням ряду технічних рідин, деякі характеристики пожежної небезпеки яких наведено у табл. 4.3. Рідини було обрано таким чином, що їх пожежонебезпечні властивості охоплюють діапазон в інтервалі температур спалаху ($-36 \div 175$)°С, що відповідає класам легкозаймистих (ЛЗР) та горючих (ГР) рідин. Значення температури спалаху характеризує початок випаровування рідин у концентрації, рівній нижній КМПП з утворенням вибухонебезпечної пари; значення температури самоспалахування характеризує легкість повторного спалаху пари горючої рідини від перегрітого борту резервуара у процесі пожежогасіння.

Методика для проведення експерименту була застосована така сама, як і в досліді з визначення масової швидкості вигорання алканів (розд. 4.1.2) [26, 45–47, 280–283]. Результати дослідження процесу вигорання обраних технічних рідин за товщини шарів піноскла (0–10) см із фракцією гранул піноскла (1÷1,5) см наведено в табл. 4.4. Для порівняння інтенсивності процесів випаровування та вигорання рідин було проведено додатковий дослід з визначення масових швидкостей випаровування на прикладі бензину за тих самих товщин шару піноскла, що і в досліді з визначення масової швидкості вигорання (ці дані також наведено в табл. 4.4).

Таблиця 4.3 – Параметри пожежної небезпеки деяких технічних горючих рідин

Горюча рідина	Температура, °С				Група горючості
	кипіння $t_{кип}$	спалаху $t_{сп}$	займання $t_{займ}$	самоспалахування $t_{сс}$	
Бензин АІ-92	>33	-36	-30	375	ЛЗР
Нафта (Юліївська)	>50	-22	-10	325	ЛЗР
Гас тракторний	>170	28	36	240	ЛЗР
Дизельне паливо	>180	64	72	220	ГР
Маш. мастило І-20	>240	175	180	270	ГР

У табл. 4.4 також відзначено позначкою “*” шари піноскла, за яких існує можливість зменшення інтенсивності вигорання до критичного рівня та, відповідно, можливість пожежогасіння, за умови подавання ГУС з малою поверхневою витратою $0,2 \text{ г/см}^2$.

За даними табл. 4.4 значення масової швидкості вигорання рідин “0” означає – припинення горіння.

Також було експериментально встановлено, що для фракції гранул ПС (1÷1,5) см згасання бензину відбувається за товщини шару сухого ПС 14 см, за умови наступного подавання ГУС з поверхневою витратою $0,2 \text{ г/см}^2$.

Таблиця 4.4 – Масові швидкості вигорання горючих технічних рідин за різної товщини шару сухого піноскла

Горюча рідина	Масова швидкість вигорання вуглеводневих рідин V_m , г/(с·м ²), за товщини шару піноскла h , см					
	0	2	4	6	8	10
Бензин АІ-92	17,6	16,7	15,3	10,5	1,7	0,3
Нафта (Юліївська)	14,9	14,1	12,7	8,5	1,3*	0,5*
Уайт-спірит	14,7	13,9	11,2	6,0	1,3*	0,5*
Денатурат	12,5	13,8	9,6	3,8	1,4*	0
Гас	11,8	11,0	5,1	1,7*	0,3*	0
Дизельне паливо (зимне)	4,4	3,4	2,2*	0	0	0
Маш. мастило І-20	4,1	2,0*	0	0	0	0

“*” – гасіння відбувається після подавання ГУС з поверхневою витратою 0,2 г/см².

На рис. 4.4 наведено залежність масової швидкості вигорання від товщини шару піноскла для деяких із досліджених горючих технічних рідин.

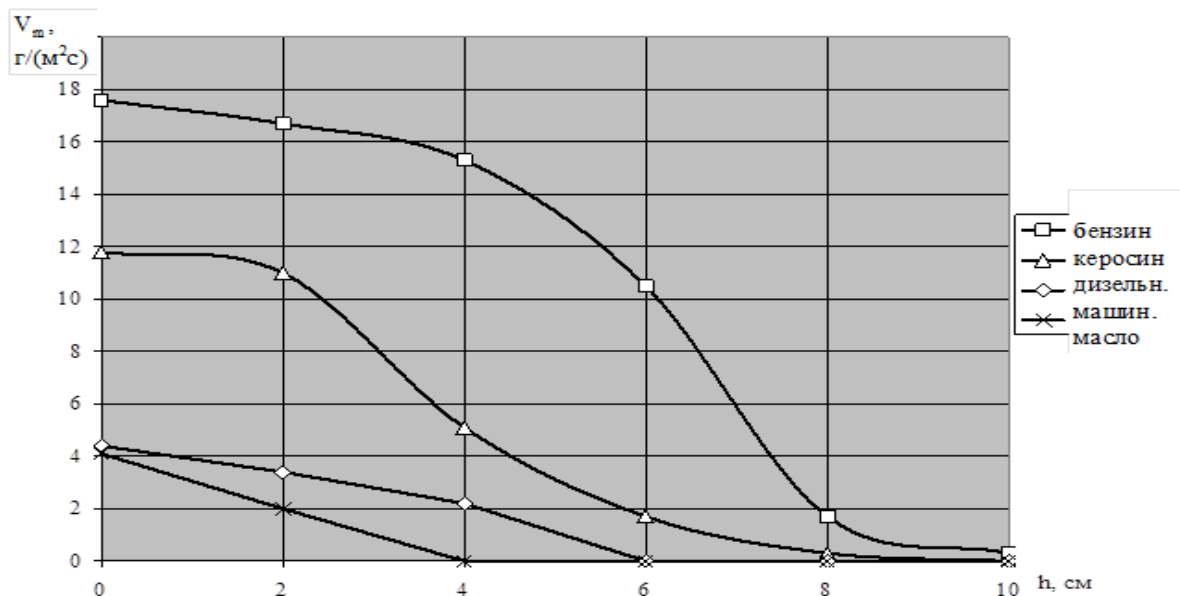


Рис 4.4 – Залежність масової швидкості вигорання горючих рідин від товщини шару сухого піноскла для лабораторного модельного вогнища

Аналіз даних табл. 4.3 та рис. 4.4 дозволяє зробити такі висновки:

- масова швидкість вигорання бензину з вільної поверхні та за товщини шару ПС (2÷6) см на 2 порядки перевищує масову швидкість випаровування;
- за умови збільшення товщини шару піноскла масова швидкість вигорання рідких вуглеводнів зменшується;
- для висококиплячих рідин (дизельне паливо та машинне мастило) масова швидкість вигорання в 3–4 рази менша, ніж у низькокиплячих;
- горіння дизельного палива та машинного мастила припиняється за товщини шару піноскла 6 та 4 см, відповідно;

– для ЛЗР існує нерівномірність зменшення масової швидкості вигорання зі збільшенням шару піноскла: в інтервалі значень шару піноскла (0÷2) см це зменшення незначне; а в інтервалі (4÷7) см спостерігається інтенсивне зменшення масової швидкості вигорання;

– горіння гасу та бензину припиняється за товщини шару піноскла 10 та 14 см, відповідно;

– нанесення гелю на поверхню піноскла з поверхневою витратою 0,2 г/см² дозволяє здійснити гасіння рідин шаром піноскла на (2÷4) см меншим, ніж без нанесення шару гелю.

Візуальні спостереження процесу горіння легкокиплячих рідких вуглеводнів із нанесеним шаром піноскла показують, що за товщини шару піноскла більше за 7 см висота полум'я та швидкість конвекційних потоків над поверхнею шару піноскла є невеликими.

В результаті дослідження швидкості горіння бензину, встановлено, що за товщини шару піноскла 10 см спостерігається лише локальне горіння на окремих ділянках. За умови збільшення товщини шару піноскла на поверхні бензину до 14 см легко досягти повного згасання полум'я шляхом подавання компонентів ГУС із поверхневою витратою 0,2 г/см².

У разі дослідження процесу вигорання гасу, за товщини шару піноскла 10 см горіння припиняється. Але за умови повторного впливу відкритого полум'я відбувається спалах, з подальшим короткочасним горінням залишків пароповітряної суміші. Тобто за даних умов швидкість випаровування вже є меншою швидкості згорання пари рідини, що надходить під час горіння.

У разі припинення горіння високикипаючих рідких вуглеводнів шаром сухого піноскла вплив відкритого вогню після згасання на область безпосередньо над піносклом не призводить до спалаху і виникнення горіння.

Можна узагальнити ефект припинення горіння технічних рідин, які мають різну температуру спалаху, необхідним для цього шаром піноскла. Як показано на рис. 4.5, зі зменшенням температури спалаху шар піноскла, що забезпечує гасіння рідких вуглеводнів (бензин, гас, дизельне паливо, машинне мастило І-20) зростає від 4 до 14 см. На даному рисунку ефект припинення горіння бензину наведений за даними для випадку гасіння з подальшим нанесенням шару гелю з поверхневою витратою 0,2 г/см². Тому можна передбачати у подальших експериментах отримання залежності з більш інтенсивним наростанням необхідного шару піноскла для пожежогасіння рідин із від'ємною температурою спалаху.

На рис. 4.6 наведено узагальнену залежність для вогнегасного шару ПС від температури спалаху рідин ряду алканів та алканвмісних технічних сумішей без подавання ГУС на лабораторному модельному вогнищі пожежі.

Апроксимаційну залежність, наведену на рис. 4.6, можна представити наступною формулою:

$$h_{\text{заг}} = -4,02 \cdot 10^{-08} t_{\text{сп}}^3 + 1,64 \cdot 10^{-05} t_{\text{сп}}^2 - 2,23 \cdot 10^{-03} t_{\text{сп}} + 0,150, \text{ м}, \quad (4.2)$$

яка дозволяє прогнозувати вогнегасний шар піноскла за значенням температури спалаху $t_{сп}$ рідких вуглеводнів з коефіцієнтом кореляції $R = 0,99$.

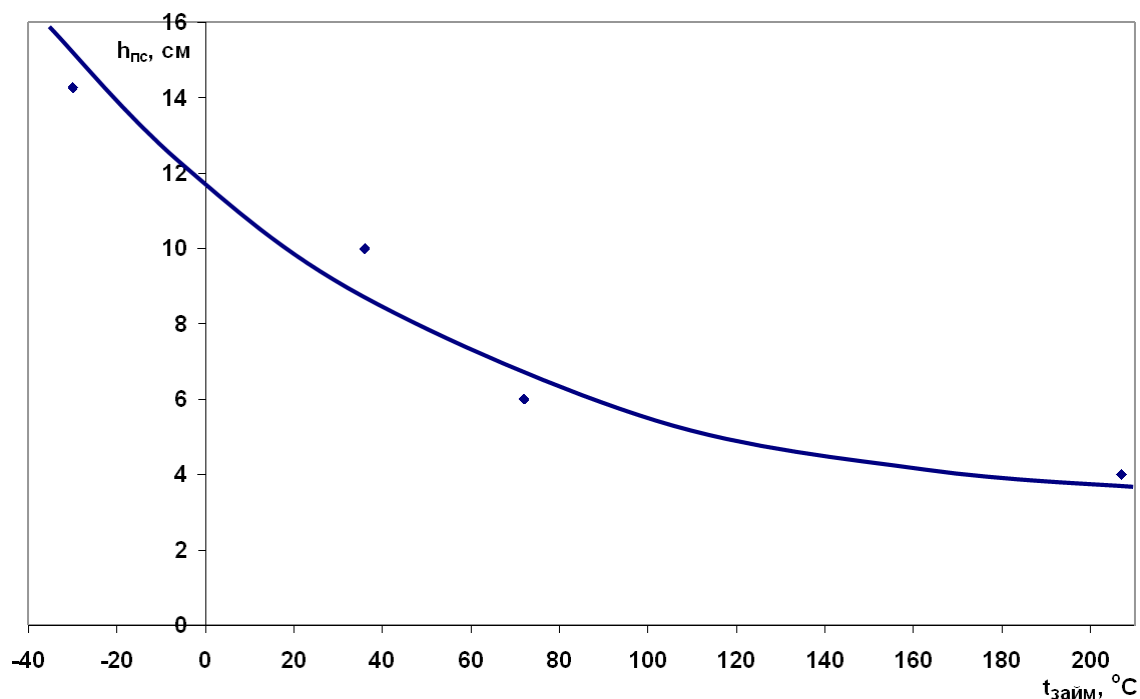


Рис. 4.5 – Залежність вогнегасної товщини шару сухого ПС від температури спалаху технічних рідин (бензин, гас, дизельне паливо, машинне мастило)

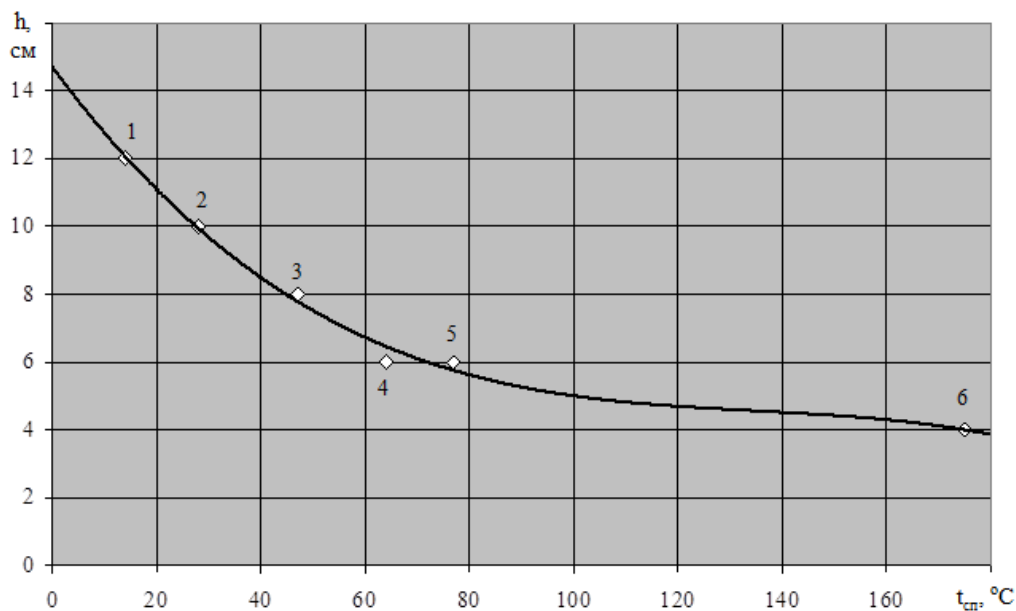


Рис. 4.6 – Залежність вогнегасної товщини шару сухого ПС на лабораторному вогнищі пожежі для індивідуальних алканів та їх технічних сумішей:

1 – октан; 2 – гас; 3 – декан; 4 – дизельне паливо; 5 – додекан; 6 – маш. мастило

Аналізуючи отримані дані за порівнянням швидкості випаровування та швидкості вигорання за наявності піноскла різної товщини, можна зробити висновок, що ізолюючий ефект наявності ПС проявляється набагато більше в

умовах горіння. Так, шар піноскла на бензині товщиною 10 см уповільнює випаровування бензину без горіння лише в 4,2 разу, а в умовах горіння – в 59 разів (див. табл. 4.4), тобто спостерігається ефект ізоляції в чотирнадцять разів більш інтенсивний. Цей факт можна пояснити тим, що швидкість випаровування під дією шару піноскла зменшується тільки за рахунок зменшення швидкості дифузії пари вуглеводню крізь пористий матеріал (ефект ізоляції). На швидкість горіння горючої рідини, крім зменшення швидкості дифузії пари, впливає охолодження поверхневого шару рідини, що горить, гранульованим піносклом, а також екранування теплового потоку від полум'я до її поверхні, що разом приводить до зменшення температури рідини та можливості згасання, за умови досягнення температур, менших за температуру спалаху.

Таким чином, запропонований для забезпечення плавучості шару гелю у рідинах легкий неорганічний носій (гранульоване ПС) за товщини шару (7÷10) см зменшує масову швидкість вигорання легкозаймистих рідких вуглеводнів у десятки разів. Це дозволяє знизити швидкість конвекційних потоків над поверхнею рідини, що горить, до рівня, який дозволяє успішно подавати компоненти ГУС в розпиленому вигляді. Припинення горіння висококиплячих рідин можна досягти за умови нанесення шару піноскла товщиною 4–6 см.

4.2 Експериментальне дослідження умов гасіння горючих рідин змоченим піносклом на лабораторних модельних вогнищах пожежі класу «В»

У розд. 2 показано, що змочене піноскло має набагато кращі охолоджуючі властивості, ніж сухе. Крім того, для змоченого піноскла в суттєвій мірі може проявитися додаткова складова вогнегасної дії такої системи – ефект розведення зони горіння парою води. Пара води, що утворюється під час контакту змоченого піноскла з нагрітим шаром рідини, знижує концентрацію в газовій фазі над поверхнею піноскла кисню повітря та пари горючої рідини. Це приводить до зниження швидкості горіння та може забезпечити повне припинення горіння. Але змочене піноскло має меншу плавучість, ніж сухе, що зменшує його ізолюючу дію. Для встановлення вогнегасних характеристик змоченого піноскла було проведено серію експериментальних досліджень його плавучості, охолоджуючої та ізолюючої здатності [19, 21, 22, 27, 30, 31, 43, 45–47, 53, 278].

На відміну від досліджень сухого піноскла, в разі змоченого піноскла існують суттєві ускладнення для експериментального визначення масової швидкості вигорання рідин. Це пов'язано з тим, що втрата маси під час горіння рідин буде зумовлена не тільки процесом вигорання, а і процесом випаровування води зі змоченого піноскла. Тому в якості кількісної характеристики інтенсивності процесу вигорання необхідно обрати інший параметр. Попередньо проведені дослідження масової швидкості вигорання рідин сухим піносклом дозволяють запропонувати в якості оціночної характеристики інтенсивності горіння – висоту полум'я. Крім того, для малих висот полум'я та знижених інте-

нсивностей горіння доцільно додатково врахувати частку площі поверхні шару піноскла, яка охоплена полум'ям.

Таким чином, для цілей характеристики інтенсивності горіння запропоновано шкалу швидкості горіння рідин, яку наведено у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Якісна шкала характеру горіння рідин без шару змоченого ПС

Бали	Характеристика полум'я	Висота полум'я
5	дуже сильне горіння	близька до висоти полум'я
4	сильне горіння	близька до 1/2 висоти полум'я
3	помірне горіння	близька до 1/10 висоти полум'я
2	слабке горіння	менше 1/10 висоти полум'я
1	дуже слабке горіння	менше 1/10 висоти полум'я, полум'я охоплює до 1/2 поверхні ПС
0	повне загасання полум'я	-

Для дослідження умов впливу шару змоченого піноскла на інтенсивність горіння горючих рідин та умов згасання було обрано такі індивідуальні рідини ряду алканів та їх технічні суміші: бензин АІ-92, уайт-спірит, гас тракторний, дизельне паливо (зимне), машинне мастило І-20, октан, декан і додекан. Досліди проводились за тією ж самою методикою, як і у випадку гасіння сухим піносклом (розд. 4.1), але без фіксації зміни маси та із застосуванням розробленої шкали інтенсивності горіння. Відповідні результати експерименту у вигляді якісної оцінки, які було отримано на лабораторному модельному вогнищі, наведено в табл. 4.6. Позначкою “*” у таблиці відзначено, за яких товщин шару піноскла зменшується інтенсивність горіння до рівня “1” або “2” та, відповідно, існування можливості пожежогасіння за умови подавання ГУС із малою поверхневою витратою 0,2 г/см². Інтенсивність горіння “0” за шкалою табл. 4.5 відповідає масовій швидкості вигорання “0 г/(с·м²)”.

Таблиця 4.6 – Оцінка результатів гасіння горючих рідин подрібненим змоченим піносклом на лабораторному модельному вогнищі пожежі за шестибальною шкалою

Горюча рідина	Якісна оцінка характеру горіння за товщини шару ПС, см								
	2 см	3 см	4 см	5 см	6 см	7 см	8 см	10 см	12 см
Бензин	5	–	5	–	5	–	4	3	2*
Уайт-спірит**	5	–	5	–	4	–	3	2	1*
Октан	5	3	4	–	2	–	1*	0	–
Гас	5	3	4	3	2*	1*	0	–	–
Декан	5	3	4	3	2*	0	–	–	–
Дизельне паливо	4	2	1*	0	–	–	–	–	–
Додекан	3	1*	0	–	–	–	–	–	–
Машинне мастило	1*	0	–	–	–	–	–	–	–

“*” – гасіння відбувається після подавання ГУС із поверхневою витратою 0,2 г/см²;

“**” – температура спалаху “–10 °С”.

На рис. 4.7 наведені графічні залежності необхідної для припинення горіння товщини шару сухого і змоченого ПС без додаткового подавання ГУС і з подаванням ГУС на лабораторному модельному вогнищі пожежі. На даному рисунку не враховані дані для бензину та уайт-спіриту, гасіння яких не було досягнуто сухим та змоченим піносклом без додаткового подавання ГУС.

Аналіз дослідних даних дозволив встановити емпіричну залежність, яка прогнозує товщину шару піноскла для гасіння пожеж класу «В», від температури спалаху рідини та способу використання піноскла для гасіння:

$$h_{\text{заг}} = h_0 \left(\frac{273}{T_{\text{сп}}} \right)^k + h_b, \quad (4.3)$$

де k – коефіцієнт, пов'язаний з охолоджуючою та ізолюючою дією піноскла; h_0 – базовий шар піноскла для гасіння горючих рідин, м; h_b – нормувальний коефіцієнт, який показує значення додаткового шару піноскла для гасіння рідини з $T_{\text{сп}} = 273$ К, м; $T_{\text{сп}}$ – температура спалаху рідини, К.

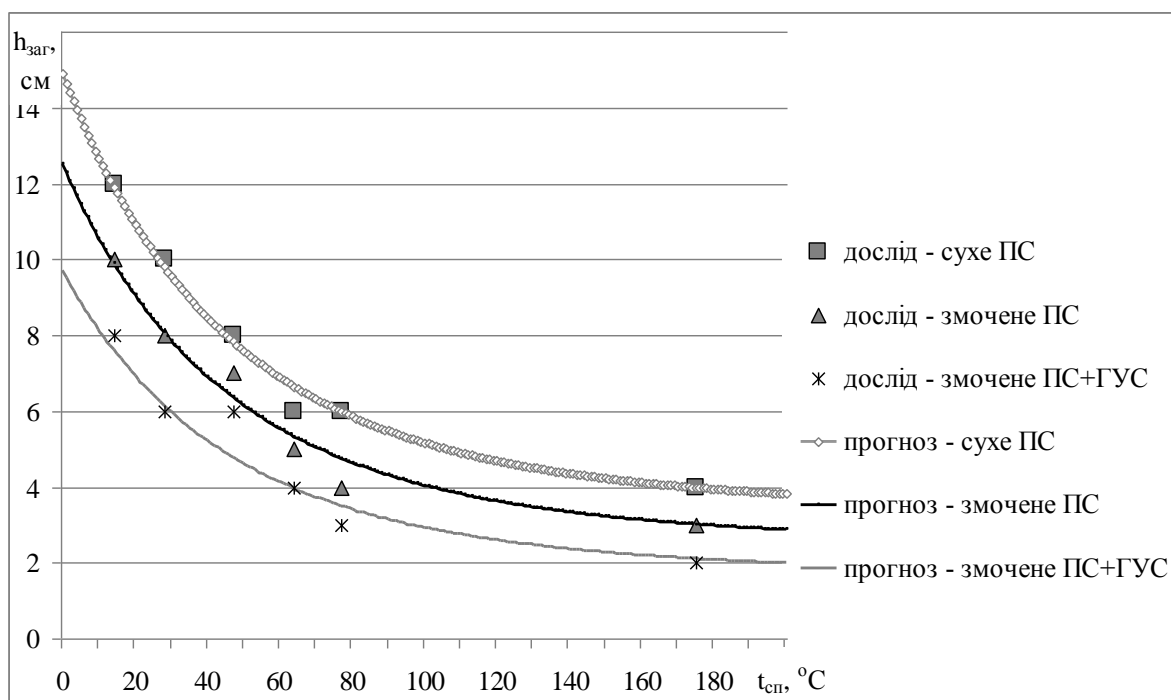


Рис. 4.7 – Залежність вогнегасного шару ПС від температури спалаху рідин на лабораторному модельному вогнищі пожежі класу «В» для сухого та змоченого ПС без подавання та з подаванням ГУС

З наведених графічних залежностей та даних табл. 4.6 можна зробити наступні висновки:

- зі зростанням температури спалаху рідин зменшується товщина шару, як сухого, так і змоченого піноскла, яка потрібна для гасіння рідин;
- змочене піноскло має кращі вогнегасні властивості, порівняно із сухим піносклом для висококиплячих рідин;

– перевага змоченого піноскла, порівняно із сухим, за товщиною вогнегасного шару становить (1÷2) см, що становить ~25 % для найменш горючих рідин (з випробуваних рідин – машинне мастило I-20);

– перевага змоченого піноскла за умови подавання другим шаром ГУС із поверхневою витратою 0,2 г/см², у порівнянні із сухим піносклом, за товщиною вогнегасного шару піноскла становить (3÷4) см.

За результатами комплексу проведених досліджень встановлено, що для прогнозу умов гасіння ГР сухим піносклом на лабораторному вогнищі коефіцієнти рівняння (4.3) становлять: $h_b = 0,034$ м, $h_0 = 0,115$ м; для змоченого піноскла: $h_b = 0,025$ м, $h_0 = 0,10$ м; для змоченого піноскла із завершенням гасіння шляхом подавання ГУС з витратою 0,2 г/см²: $h_b = 0,017$ м, $h_0 = 0,08$ м; для усіх способів гасіння пожеж класу «B» із застосуванням піноскла коефіцієнт $k = 6$. Розрахункові залежності наведені на рис. 4.7.

З наведених у табл. 4.6 даних видно, що бензин та уайт-спірит на лабораторному вогнищі неможливо загасити лише гранульованим ПС без наступного подавання ГУС. Для цього є недостатньою висота вільного борту модельних вогнищ. Тому досліди з гасіння рідин було продовжено на модифікованому модельному вогнищі пожежі 2B з нарощеними бортами [45, 281, 285]. Експеримент показав, що для гасіння бензину необхідна загальна товщина шару змоченого ПС: 65,5 см; сухого ПС: 50 см. Для уайт-спіриту відповідні товщини шару ПС склали 32 см для змоченого ПС та 24 см для сухого ПС (рис. 4.8).

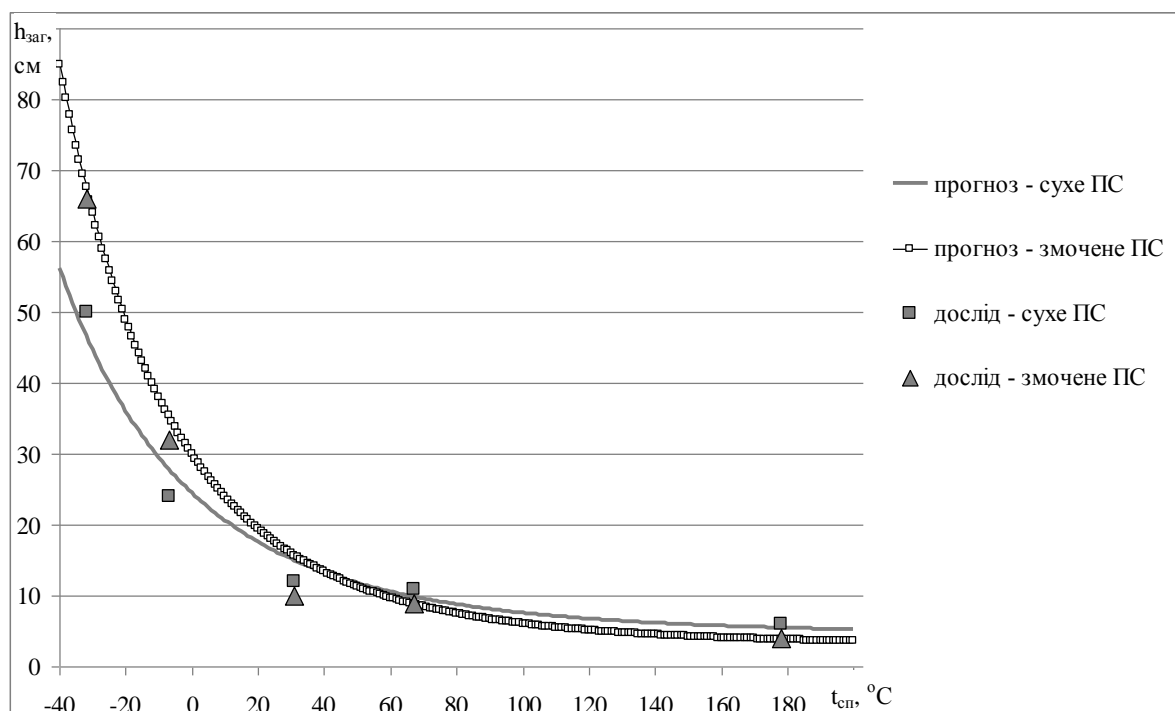


Рис. 4.8 – Залежність вогнегасного шару сухого та змоченого ПС від температури спалаху рідких алканів на модельному вогнищі пожежі класу «B»

Розрахункові залежності прогнозованого вогнегасного шару сухого та змоченого піноскла для горючих рідин ряду алканів, за умови гасіння пожежі

на модельному вогнищі 2В наведено на рис. 4.8. Розрахунок проведено з коефіцієнтами рівняння (4.3) для сухого піноскла – $h_b = 0,045$ м, $h_0 = 0,2$ м; $k = 6$; для змоченого – $h_b = 0,003$ м, $h_0 = 0,27$ м; $k = 7$.

Наведені дані показують, що рідини з низькими температурами спалаху краще гасити сухим піносклом. Цей факт можна пояснити тим, що температуру верхнього шару рідини, що горить, неможливо охолодити нижче температури її спалаху шляхом подавання вогнегасної речовини з температурою навколишнього середовища (температура спалаху бензинів становить (-20÷-40 °С). Основний внесок у вогнегасні властивості випробуваних вогнегасних систем надає ізолююча здатність шару піноскла. Змочене піноскло має меншу плавучість у горючих рідинах, ніж сухе, тому шар такого піноскла, який знаходиться вище рівня рідини, та його ізолююча дія будуть меншими. Але водночас збільшується його охолоджуюча здатність для поверхневого шару рідини, внаслідок наявності води та більшої зануреної маси піноскла.

За даними рис. 4.8 гасіння усіх ЛЗР із температурою спалаху, меншою за 30 °С (з досліджених рідин – бензин та уайт-спірит), доцільно здійснювати не змоченим піносклом, а сухим. Зменшити загальну товщину шару сухого ПС, за умови гасіння таких ЛЗР, можна за рахунок використання ГУС із поверхневою витратою ВР 0,2 г/см² на несучий шар ПС товщиною (12÷14) см. За таких умов припинення горіння бензину на модельному вогнищі 2В досягається за товщини шару сухого ПС, зменшеної на 38 см (тобто на 76 %); для гасіння уайт-спіриту цей параметр зменшується на 12 см (на 50 %).

В разі гасіння ГР із температурою спалаху, більшою за 60 °С, перевагу має змочене ПС. В інтервалі температур спалаху (30÷60) °С вогнегасні характеристики сухого та змоченого ПС є близькими. Порівняння результатів гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі класу «В», як сухим так і змоченим ПС, дозволяє заключити, що нанесення гелю на поверхню ПС із поверхневою витратою 0,2 г/см² дозволяє забезпечити гасіння рідин з температурою спалаху вище 30 °С шаром ПС на (2÷4) см меншим, ніж без нанесення шару гелю.

4.3 Експериментальне дослідження умов гасіння горючих рідин сухим та змоченим піносклом на стандартних модельних вогнищах 2В

У розділах 4.1 і 4.2 наведено дані з гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі класу «В» малого розміру. Це модельне вогнище являє собою металеву ємність циліндричної форми із внутрішнім діаметром 11,2 см ($S = 98,5$ см²). Однак умови горіння та пожежогасіння модельного вогнища істотно залежать від його розмірів. Так, масова швидкість вигорання бензину багаторазово змінюється за зміни діаметра резервуара від декількох сантиметрів до 1,2 м. Подальше зростання діаметра резервуара понад 1,2 м не призводить до зміни швидкості горіння. Крім того, швидкість горіння істотно залежить від висоти вільного борту резервуара. Тому визначені раніше експериментально на лабораторних малорозмірних модельних вогнищах значення показ-

ника вогнегасної здатності вимагають уточнення на модельних вогнищах великих розмірів [18, 43, 45–47].

Для визначення умов гасіння було обране стандартне модельне вогнище пожежі 2В (виконання 2), яке має характеристики: діаметр – 28,8 см, вільна площа поверхні рідини – 650 см², що в 6,6 разу більше, ніж для лабораторного модельного вогнища. У якості горючих рідин були обрані наступні: бензин (АІ-92), уайт-спірит, гас, дизельне паливо (зимове) і машинне мастило І-20. Відповідні дані наведені в розділах 4.3.1–4.3.3. Для дослідження процесу пожежогасіння перших трьох нафтопродуктів (легкокиплячих) в дека модельного вогнища було залито 4 л води та 2 л бензину. Висота вільного борту при цьому забезпечувалась 11,6 см.

Для дослідження можливості гасіння легкокиплячих нафтопродуктів спочатку здійснювалось запалювання горючої рідини з візуальною фіксацією через одну хвилину вільного горіння висоти полум'я. Після цього на поверхню рідини, що горить, засипалась заздалегідь приготована кількість сухого або змоченого піноскла (з водоутриманням (30÷50) %), яка забезпечувала загальну товщину шару 2 см. Досліджувалась вогнегасна дія піноскла наступних фракцій: (1,0÷1,5) см; (1,5÷2,5) см; (2,5÷4,0) см. Через одну хвилину після засипання піноскла візуально фіксувалась висота полум'я. В подальшому процедура засипання вогнегасної речовини та фіксації висоти полум'я повторювалась до повного припинення горіння або досягнення шаром піноскла верхньої частини борту модельного вогнища.

У разі досягнення ефекту припинення горіння до поверхні шару піноскла через одну хвилину після згасання підносився запалений факел і фіксувався ефект відсутності або наявності повторного запалювання. У разі, якщо після повторного запалювання полум'я не горіння самочинно припинялося протягом 30 секунд, стандартне вогнище вважалось згашеним даним шаром піноскла. В іншому випадку досипалась чергова порція піноскла з утворенням його загального шару на 2 см більше за попередній. Експеримент було проведено за температури навколишнього повітря (25±2)°С.

У разі випробування дизельного палива та машинного мастила методика заповнення дека модельного вогнища була змінена у зв'язку з тим, що за умови горіння висококиплячих рідин температура поверхневого шару рідини перевищує 100 °С, що викликає кипіння нижнього водяного шару. Тому для отримання результатів, які можна порівнювати з попередніми, у дека модельного вогнища пожежі заливалося 6 л дизельного палива або машинного мастила без заливання шару води. Це забезпечувало однакову висоту вільного борту дека. Всі інші процедури з гасіння модельного вогнища не змінювалися.

4.3.1 Експериментальне дослідження масової швидкості вигорання бензину та умов гасіння сухим піносклом на стандартному модельному вогнищі пожежі 2В

У випадку гасіння бензину сухим піносклом було визначено його масові швидкості вигорання за різних товщин шару піноскла. З урахуванням

результатів роботи [43, 45], для проведення експерименту був обраний інтервал товщини шару піноскла ($6 \div 14$) см.

Треба відмітити, що, у зв'язку з наявністю в шарі гранульованого ПС порожнин, сумарна висота шару піноскла і шару рідини може бути більше висоти дека. У всіх випадках за товщину шару ПС приймається його загальна товщина, яка обумовлена висотою шару ПС, зануреного в бензин, та висотою шару ПС над його поверхнею. У якості легкого пористого матеріалу використано подрібнене ПС трьох фракцій: ($1 \div 1,5$) см; ($1,5 \div 2,5$) см і ($2,5 \div 4$) см. Насипна щільність ПС цих фракцій склала 105 ± 6 , 93 ± 5 і (92 ± 6) $\text{кг}/\text{м}^3$ відповідно. Істинна густина ПС у межах однієї партії перебуває в діапазоні значень (146 ± 16) $\text{кг}/\text{м}^3$. Фракція ПС менше 1 см не розглядалася, оскільки внаслідок того, що піноскло має відкриті зовнішні пори, у дрібних фракцій збільшується частка змоченої частини гранул, ступінь занурення шару в рідину збільшується до 75 %, що погіршує плавучість та ізолюючі властивості шару ПС [20].

Деко модельного вогнища заповнювалось 4 л води та 2 л бензину і встановлювалось на ваги TCS-100. Після цього здійснювалось запалення вогнища. Після однієї хвилини вільного горіння в деко засипався попередньо відмірений об'єм ПС, який забезпечував первинну товщину шару ПС 2 см. Через одну хвилину після засипання ПС починався відлік часу, в ході якого фіксувалась втрата маси бензину за дві хвилини. Для гасіння пожежі класу «В» сухим ПС із розміром гранул ($1,0 \div 1,5$) см та наступною подачею ГУС було проведено серію з 5 дослідів. В чотирьох із них гасіння бензину було досягнуто при товщині шару ПС 10 см, а в одному – 12 см. У результаті проведених дослідів отримано числові значення втрати маси бензину в процесі його вигорання за наявності шару ПС у різні моменти часу. Дані втрати маси було перераховано в масову швидкість вигорання бензину в умовах експерименту для кожного шару піноскла.

Результати розрахунку зведено в табл. 4.7. Оскільки гасіння бензину на стандартних модельних вогнищах за умови нанесення піноскла не досягається (хоча й відзначається зниження інтенсивності горіння), було досліджено можливість припинення горіння шляхом додаткового подавання на шар піноскла обмеженої порції компонентів ГУС (з поверхневою витратою $0,2 \text{ г}/\text{см}^2$). Тому в таблиці для деяких критичних випадків (з позначкою “*”) відзначено можливість гасіння модельного вогнища пожежі в результаті подавання компонентів ГУС на шар піноскла, над яким спостерігається залишковий ефект горіння.

Наведені у табл. 4.7 дані демонструють перевагу фракції ($1 \div 1,5$) см щодо сповільнення масової швидкості вигорання та за меншого шару піноскла дозволяють припинити горіння бензину.

На рис. 4.9 наведено співставлення даних щодо швидкостей вигорання бензину на лабораторному [25–26] та стандартному модельному вогнищі пожежі 2В крізь шар піноскла різної товщини, за умови застосування піноскла різних фракцій. Дане співставлення дозволяє перевірити попереднє припущення щодо збільшення значення вогнегасного шару піноскла та обрати шлях для подальших досліджень.

Таблиця 4.7 – Масові швидкості вигорання бензину для різних фракцій і товщин шару ПС для стандартного модельного вогнища пожежі 2В

Фракція ПС, см	Масова швидкість вигорання бензину V_m , г/(с·м ²) за товщини шару піноскла h , см					
	0 см	6 см	8 см	10 см	12 см	14 см
1÷1,5	11,9	10,3	7,2	4,8*	3,0*	1,7*
1,5÷2,5	11,9	11,2	10,2	8,9	6,1*	4,5*
2,5÷4	11,9	11,5	10,6	9,4	7,4*	5,9*

“*” – горіння припиняється у разі подавання ГУС з поверхневою витратою 0,2 г/см².

Аналіз наведених графічних залежностей дозволяє зробити загальні висновки щодо впливу наявності та розміру шару піноскла на інтенсивність горіння бензину на стандартному модельному вогнищі пожежі класу «В»:

- зі зростанням товщини шару піноскла інтенсивність горіння бензину зменшується;
- в інтервалі товщин шару ПС (0÷6) см ізолююча дія ПС є незначною;
- збільшення товщини шару піноскла понад 6 см забезпечує швидке зменшення інтенсивності горіння бензину з нарощуванням шару піноскла;
- найбільш інтенсивно гальмує горіння бензину піноскло фракції (1÷1,5) см.

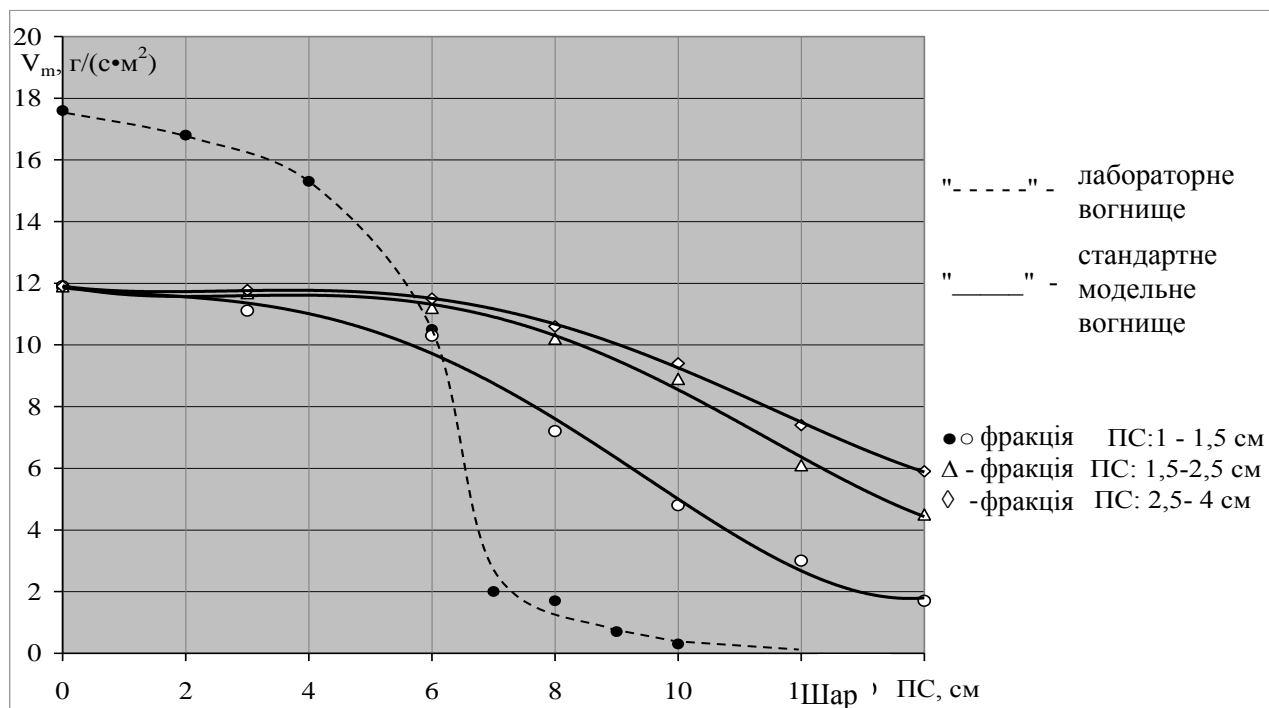


Рис. 4.9 – Залежність масової швидкості вигорання бензину від товщини шару, фракційного складу піноскла та типу вогнища пожежі класу «В»

Співставлення результатів, отриманих на лабораторному та стандартному модельному вогнищі пожежі 2В, показує, що характер розглянутої залежності для обох вогнищ пожежі є однотипним, однак чисельні значення

масових швидкостей вигорання істотно відрізняються. Звертає на себе увагу той факт, що масова швидкість вигорання бензину з вільної поверхні на малорозмірному лабораторному вогнищі істотно вище, ніж на стандартному вогнищі 2В. Таке спостереження суперечить відомому характеру даної залежності, а саме: зі збільшенням діаметра резервуара – масова швидкість вигорання повинна зростати. Це протиріччя можна пояснити наявністю вільного борту більшої висоти у стандартного модельного вогнища, ніж у лабораторного. Різна висота бортів визначає різну інтенсивність їх внеску в прогрів поверхневого шару рідини, що горить. Водночас необхідно зауважити, що менший об'єм має більшу питому поверхню, тобто прогрів рідини від бортів з підтриманням однакової температури буде більш інтенсивним для вогнища з меншими розмірами дека. Але, у той же час, можна відзначити, що зі збільшенням товщини шару піноскла в лабораторному модельному вогнищі пожежі понад (5÷6) см спостерігається більш інтенсивне зниження масової швидкості вигорання бензину з нарощуванням шару ПС. Це знову ж можна пояснити нівелюванням впливу вільного борту на процес вигорання бензину.

Візуальні спостереження процесу горіння бензину з нанесеним шаром піноскла показують, що для всіх трьох фракцій за товщини шару ПС 14 см висота полум'я і швидкість конвекційних потоків над поверхнею шару ПС є незначними (рис. 4.10). Горіння відбувається в основному біля стінок дека для фракцій ПС (1÷1,5) см та (1,5÷2,5) см. Для найбільшої фракції піноскла (2,5÷4) см горіння по поверхні шару піноскла розподілене більш рівномірно. При цьому спостерігається лише локальне горіння на окремих ділянках із періодичним проскакуванням полум'я вглиб шару ПС. У такому режимі горіння виявилось легко досягти повного згасання полум'я. У ході дослідів було встановлено, що припинення горіння легко досягається за короткочасного подавання компонентів ГУС із поверхневою витратою 0,2 г/см² (рис. 4.11). Одночасно встановлено, що після припинення горіння таким способом воно легко відновлюється за умови внесення зовнішнього джерела запалювання (смолоскип). Але в разі нанесення товстого шару піноскла із поверхневою витратою більше за 0,5 г/см² (рис. 4.12) після забезпечення згасання повторне займання не відбувається (рис. 4.13).

У випадку подавання на поверхню піноскла компонентів ГУС горіння бензину припиняється, у разі застосування для пожежогасіння фракції піноскла із розмірами гранул (1÷1,5) см за загальної товщини шару піноскла 10 см та більше. Для інших двох фракцій піноскла горіння бензину припиняється за товщини шару піноскла 12 см та більше.

Відсутність повторного запалювання в умовах дії відкритого полум'я на пароповітряну область над поверхнею піноскла досягається у разі утворення суцільного шару гелю. Для формування такого шару гелю необхідно забезпечити поверхневу витрату подавання гелю 0,7 г/см² на шар піноскла фракції (1÷1,5) см та 0,9 г/см² для фракції піноскла (1,5÷2,5) см.

Утворення суцільного шару гелю на шарі піноскла фракції (2,5÷4) см за попередніми даними, досягається за поверхневої витрати подавання ГУС – 1,3 г/см². Але за таких умов не вдається забезпечити відсутність повторного

запалювання або навіть припинити горіння через те, що суцільний шар гелю на грубозернистій фракції піноскла утворюється лише за такої великої маси гелю, що плавучості піноскла не вистачає, відповідно – шар піноскла занурюється вглиб і бензин виходить на поверхню гелевого шару. Тобто пожежога-сіння не досягається.



Рис. 4.10 – Інтенсивність горіння бензину за максимального шару ПС (стандартне вогнище 2В)



Рис. 4.11 – Завершення гасіння шляхом подавання ГУС – $0,2 \text{ г/см}^2$ (стандартне вогнище 2В)



Рис. 4.12 – Припинення горіння у разі подавання ГУС (витрата $0,5 \text{ г/см}^2$)



Рис. 4.13 – Перевірка відсутності повторного займання

У разі менших витрат ГУС із нанесенням шару гелю товщиною $\sim 1 \text{ см}$ на дану фракцію піноскла плавучість вогнегасної системи ще зберігається та досягається згасання з можливістю повторного запалювання через одну хви-

лину. Але після запалювання за таких умов пари бензину на поверхні піноскла встановлюється слабке горіння, інтенсивність якого з часом поступово зменшується. Через 1÷2 хвилини такого горіння полум'я самочинно згасає.

Аналіз візуальних спостережень дозволяє зробити наступні висновки:

– горіння бензину припиняється за умови подавання компонентів ГУС із поверхневою витратою не менше, ніж $0,2 \text{ г/см}^2$ за товщини шару ПС 10 см для фракції ПС (1÷1,5) см і 12 см – для фракцій (1,5÷2,5) см та (2,5÷4) см;

– за умов згасання, досягнутих з поверхневою витратою $0,2 \text{ г/см}^2$ на шарі піноскла, який забезпечує слабке горіння, можливе повторне запалювання пари у разі внесення відкритого полум'я;

– відсутність повторного запалювання пари досягається за умови утворення суцільного шару гелю з поверхневою витратою $0,7 \text{ г/см}^2$ для фракції піноскла (1÷1,5) см та $0,9 \text{ г/см}^2$ – для фракції піноскла (1,5÷2,5) см.

Таким чином, нанесення шару сухого піноскла на поверхню бензину під час горіння знижує його масову швидкість вигорання. В умовах збільшення товщини шару піноскла спостерігається зменшення інтенсивності горіння. Шар піноскла товщиною менше 6 см знижує цей параметр у незначній мірі. Збільшення товщини шару піноскла більше 6 см інтенсивно знижує масову швидкість вигорання. Найбільш інтенсивно масову швидкість вигорання бензину знижує подавання піноскла із розміром гранул (1÷1,5) см. Відповідно ця фракція піноскла має найкращий баланс ізолюючих властивостей та плавучості. Припинення горіння, за умови подавання компонентів ГУС із низькою інтенсивністю ($0,2 \text{ г/см}^2$), досягається у разі забезпечення товщини шару піноскла 10 см для фракції (1÷1,5) см та за товщини 12 см для фракцій (1,5÷2,5) см й (2,5÷4) см. Відсутність повторного запалювання пари бензину, внаслідок дії відкритого полум'я на область над поверхнею шару піноскла, досягається за умови утворення шару гелю з поверхневою витратою подавання $0,7 \text{ г/см}^2$ для фракції піноскла (1÷1,5) см та $0,9 \text{ г/см}^2$ для фракції піноскла (1,5÷2,5) см.

4.3.2 Експериментальне дослідження умов гасіння бензину змоченим піносклом на стандартному модельному вогнищі пожежі 2В

Досліди з гасіння бензину змоченим піносклом проводились за тією самою методикою, що й сухим піносклом, на прикладі фракції піноскла (1÷1,5) см. Але замість визначення втрати маси візуально оцінювалась висота полум'я. Відповідні результати дослідження з використанням запропонованої якісної шестибальної шкали характеру горіння (табл. 4.5) наведено у табл. 4.8 [45–47, 278, 285]. Для порівняння результатів дослідження у чисельнику наведено відповідні результати для сухого піноскла.

Водночас було досліджено можливість припинення горіння за умови подавання ГУС, відповідні режими гасіння відмічено у таблиці позначками: “*” (поверхнева витрата ГУС $0,2 \text{ г/см}^2$) та “***” (поверхнева витрата ГУС $0,5 \text{ г/см}^2$). Також було досліджено можливості повторного запалювання бензину за умови внесення відкритого полум'я в область над поверхнею піноскла. Встановлено, що відсутність повторного запалювання досягається за умо-

ви нанесення суцільного шару гелю на шар змоченого піноскла товщиною 14 см з поверхневою витратою 0,7 г/см².

Таблиця 4.8 – Якісна оцінка результатів гасіння бензину сухим/змоченим гранульованим ПС

Якісна оцінка характеру горіння за товщини шару сухого/змоченого ПС, см						
2 см	4 см	6 см	8 см	10 см	12 см	14 см
5/5	5/5	5/5	4/4	3**/3	3*/2*	2*/2*

* – гасіння відбувається після подавання ГУС із поверхневою витратою 0,2 г/см²;

** – гасіння відбувається після подавання ГУС із поверхневою витратою 0,5 г/см².

Звертає на себе увагу майже ідентичність якісної оцінки сповільнення горіння сухим та змоченим піносклом із незначною перевагою для змоченого піноскла за значень шару піноскла – 10 см та 12 см.

Аналіз одержаних результатів дозволяє сформулювати наступні висновки:

– гасіння бензину не досягається за умови утворення загального шару змоченого гранульованого піноскла 14 см;

– за товщини шару змоченого гранульованого ПС 12 см горіння бензину можна припинити шляхом подавання ГУС із поверхневою витратою 0,2 г/см²;

– відсутність повторного запалювання досягається у разі нанесення суцільного шару гелю з поверхневою витратою 0,7 г/см² на шар змоченого гранульованого піноскла товщиною 14 см;

– у випадку пожежогасіння бензину змочене гранульоване піноскла не має переваг перед сухим.

4.3.3 Експериментальне дослідження умов гасіння вуглеводневих рідин сухим піносклом на стандартних модельних вогнищах пожежі 2В

Досліди з гасіння вуглеводневих рідин сухим піносклом на стандартних модельних вогнищах пожежі 2В проводились за тією самою методикою, що і для бензину, але без фіксації втрати маси.

Інтенсивність горіння характеризувалась за якісною шестибальною шкалою (табл. 4.5). Крім того, за умови гасіння висококиплячих рідин (дизельного палива та машинного мастила), замість води в деко додатково заливалось 4 л ГР. Відповідні результати дослідження якісної оцінки експериментальних результатів гасіння горючих рідин подрібненим сухим ПС наведено у табл. 4.9. Можливість завершення гасіння шляхом мінімального подавання ГУС із поверхневою витратою 0,2 г/см² за певних шарів піноскла відмічено позначкою “*”.

Таблиця 4.9 – Якісна оцінка результатів гасіння горючих рідин сухим піносклом

Горюча рідина	Якісна оцінка характеру горіння за товщини шару ПС, см						
	2 см	4 см	6 см	8 см	10 см	12 см	14 см
Уайт-спірит	5	5	5	4	3	3*	2*
Гас	5	4	3	2	1*	0	–
Дизельне паливо	5	3	2	1*	0	–	–
Маш. мастило І-20	4	2	0	–	–	–	–

* – гасіння відбувається після подавання ГУС із поверхневою витратою 0,2 г/см².

На підставі аналізу даних табл. 4.9 й візуальних спостережень можна зробити наступні висновки гасіння дека з нафтопродуктами сухим ПС:

- шар сухого ПС товщиною 2 см слабо зменшує інтенсивність горіння;
- найбільша витрата ПС потрібна для гасіння уайт-спіриту, його не вдається загасити без застосування ГУС за товщини шару сухого ПС 14 см;
- гасіння уайт-спіриту досягається за товщини шару сухого піноскла 12 см з наступним подаванням на його поверхню гелю з витратою 0,2 г/см²;
- гасіння гасу, дизельного палива й машинного мастила можна досягти нанесенням сухого піноскла із товщиною шарів 12, 10 та 6 см відповідно.

4.3.4 Експериментальне дослідження умов гасіння вуглеводневих рідин змоченим піносклом на стандартних модельних вогнищах пожежі 2В

Досліди з гасіння вуглеводневих рідин змоченим піносклом на стандартних модельних вогнищах пожежі 2В проводились за тією самою методикою, що й за умов гасіння сухим піносклом.

На рисунках 4.14–4.17 наведено етапи гасіння гасу змоченим піносклом (вільне горіння, засипання змоченого піноскла, слабе горіння та повне згасання), на рисунках 4.18–4.21 – етапи гасіння уайт-спіриту змоченим піносклом (інтенсифікація горіння в початковий момент засипання піноскла, послаблення горіння, слабе горіння та згасання за умови подавання ГУС).



Рис. 4.14 – Вільне горіння гасу



Рис. 4.15 – Засипання змоченого ПС



Рис. 4.16 – Слабе горіння гасу



Рис. 4.17 – Повне погасання гасу



Рис. 4.18 – Інтенсифікація горіння на початку подавання змоченого ПС



Рис. 4.19 – Послаблення горіння під час подавання другої порції змоченого ПС



Рис. 4.20 – Слабке горіння



Рис. 4.21 – Повне згасання

Для гасу, дизельного пального й машинного мастила було проведено по три паралельних досліди, які дали однакові результати.

У випадку гасіння уайт-спіриту для різних партій рідини розбіг результатів досягав 4 см; для подальшого аналізу взято найгірші результати з одержаних.

Результати дослідження зведено у табл. 4.10 з використанням якісної оцінки результатів гасіння за шестибальною шкалою (відповідно до табл. 4.5); отримані дані співвіднесено з даними щодо гасіння сухим ПС.

Таблиця 4.10 – Якісна оцінка результатів гасіння горючих рідин сухим/змоченим подрібненим ПС на модельному вогнищі 2В

Горюча рідина	Якісна оцінка характеру горіння за товщини шару ПС, см						
	2 см	4 см	6 см	8 см	10 см	12 см	14 см
Уайт-спірит	5/5	5/5	5/4	4/3	3/2	3*/2*	2*/1*
Гас	5/5	4/4	3/2	2/1*	1*/0	0/0	–
Дизельне паливо	5/5	3/0	2*/-	1*/-	0/-	–	–
Машинне мастило I-20**	4/2	2*/0	0/0	–	–	–	–

* – гасіння відбувається після подавання ГУС з поверхневою витратою 0,2 г/см²;

** – гасіння відбувається за товщини шару змоченого піноскла 3 см.

Досліджено також можливість завершення гасіння вуглеводневих рідин на модельному вогнищі 2В шляхом подавання ГУС із поверхневою витратою 0,2 г/см² на етапі утворення певного шару змоченого піноскла, який забезпечує для даної рідини зниження інтенсивності горіння до слабого рівня. У таблиці 4.10 такий режим гасіння відмічено позначкою “*”. Окремо відмічено, що достатній шар змоченого піноскла для гасіння машинного мастила становить 3 см.

На підставі аналізу наведених у табл. 4.10 результатів і даних візуальних спостережень можна зробити висновки щодо ефективності гасіння модельного вогнища пожежі 2В з нафтопродуктами сухим та змоченим піносклом:

– для всіх ГР, крім уайт-спіриту, змочене піноскло виявляє більші вогнегасні властивості, у порівнянні з сухим;

– гасіння уайт-спіриту досягається за товщини шару сухого піноскла 12 см, за умови наступного нанесення на його поверхню шару гелю з поверхневою витратою 0,2 г/см²;

– за товщини шару ПС на уайт-спіриті 14 см без подавання компонентів ГУС спостерігаються осередки слабого локального горіння поблизу стінок дека;

– гасіння гасу, дизельного палива й машинного мастила можна досягти без додаткового подавання шару гелю лише за рахунок нанесення змоченого піноскла з товщиною шарів 10, 4 і 3 см відповідно.

Причина переваги змоченого піноскла над сухим полягає в його істотно більшій охолоджуючій дії, що показано у попередніх розділах. Ця перевага обумовлена більшою теплоємністю води, порівняно з піносклом, та наявністю дуже великого ендотермічного ефекту випаровування води. Обидва ефекти проявляються в більшій мірі для горючих рідин із більшою температурою поверхневого шару під час пожежі (з більшою температурою кипіння). Але якщо температура поверхневого шару рідини внаслідок процесу горіння перевищує 100 °С, то внесок в охолоджуючу дію піноскла ендотермічного ефекту випаровування води набагато зростає. Цей висновок співпадає з результатами теоре-

тичного аналізу та експериментальних досліджень охолоджуючих характеристик шару піноскла (розд. 3.2.3). Описаний ефект чітко проявляється для висококиплячих рідин (гас, дизельне паливо й машинне мастило).

Для процесу гасіння легкокиплячих рідин (бензин та уайт-спірит) охолоджуюча дія змоченого піноскла дає менший внесок у загальну вогнегасну дію. До того ж, ця позитивна дія шару змоченого піноскла на процес гасіння нівелюється зменшенням його ізолюючих властивостей. Це пов'язано з фактом, що змочене піноскло має меншу плавучість і, відповідно, меншу висоту шару піноскла над поверхнею рідини. Для легкокиплячих рідин спостерігається додатковий ефект зменшення плавучості ПС, внаслідок їх меншої густини відносно висококиплячих, що призводить до подальшого зменшення ізолюючої дії піноскла. Якщо врахувати і зменшення охолоджуючої дії для легкокиплячих рідин (з меншою температурою поверхневого шару) змоченого піноскла, то стає зрозумілою якісна відмінність у процесах гасіння рідин із температурами кипіння більше та менше за 100°C.

Співставлення значень загальної висоти вогнегасного шару сухого (h_c) та змоченого піноскла (h_s) у процесі гасіння горючих вуглеводневих рідин на лабораторному і стандартному модельному вогнищі пожежі класу «В» у випадку додаткового подавання ГУС із поверхневою витратою 0,2 кг/см² наведено у табл. 4.11.

Таблиця 4.11 – Співставлення вогнегасних властивостей сухого та змоченого піноскла на лабораторному та стандартному модельному вогнищі пожежі класу «В»

Горюча рідина	Лабораторне вогнище		Стандартне вогнище 2В	
	h_c , см	h_s , см	h_c , см	h_s , см
Бензин	14	12	10	12
Гас	6	6	10	8
Дизельне паливо	4	4	8	4
Машинне мастило I-20	2	2	6	3

Наведені дані з порівняння гасіння на лабораторному та стандартному вогнищі демонструють помітну різницю у значеннях вогнегасного шару для сухого піноскла і близькість результатів для змоченого піноскла для тієї самої рідини. Але якісний хід залежностей є однаковим для двох видів вогнищ пожежі. В подальшому в рекомендаціях щодо гасіння пожеж класу «В» будуть враховані результати дослідів, отримані на стандартному модельному вогнищі 2В.

4.3.5 Експериментальне дослідження умов гасіння бензину сухим та змоченим піносклом на модифікованому модельному вогнищі пожежі 2В без використання ГУС

Дослідження вогнегасних властивостей ПС на стандартному модельному вогнищі пожежі 2В не дозволило встановити товщину шару ПС без використання ГУС, що забезпечує гасіння бензину та уайт-спіриту. Це обумовлено обмеження-

ми в утворенні шару ПС більше 14 см у стандартному модельному вогнищі пожежі 2В (з урахуванням наявності шару рідини). Під час реальних пожеж в резервуарах із горючими рідинами таких обмежень у висоті борта зазвичай не існує. Тому було проведено аналогічні дослідження на модельному вогнищі пожежі з діаметром дека таким самим, як у стандартному модельному вогнищі пожежі 2В, але зі збільшеною висотою борту на 20 см [45, 278, 285], рис. 4.22. Тобто було створено модифіковане модельне вогнище 2В з висотою борту 40 см.

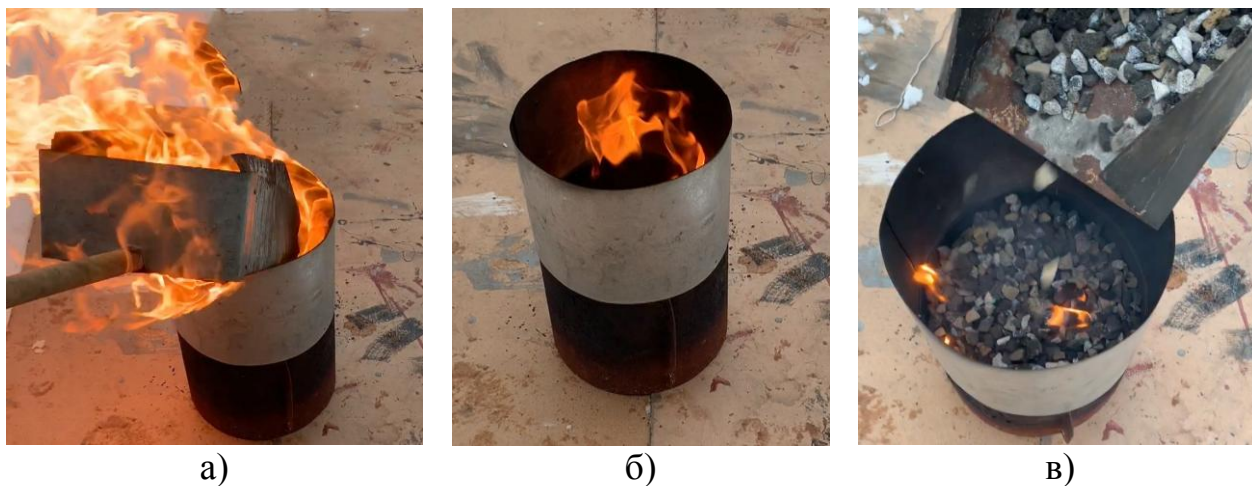


Рис. 4.22 – Етапи гасіння модифікованого вогнища 2В:

а) засипання ПС; б) уповільнення горіння; в) дуже слабке горіння

За стандартною процедурою в модифіковане вогнище пожежі 2В заливалось 2 л бензину (АІ-92), але для забезпечення меншого рівня наливання бензину під час досліду, а також більшої висоти вільного борту, вода у вогнище додатково не заливалась. В попередніх дослідах було встановлено, що в разі засипання великої кількості ПС фракції (1÷1,5) см у стандартне вогнище пожежі 2В рівень бензину становив 4,5 см від дна. Відповідно у запропонованій методиці було використано можливість експериментально визначати не загальну товщину шару піноскла, а висоту шару піноскла, що знаходиться вище рівня зазначеної легкозаймистої рідини. За іншими положеннями методика проведення експерименту повністю повторювала використану раніше для дослідження вогнегасних властивостей піноскла (розд. 4.3.1). На рис. 4.22 зображено етапи гасіння бензину сухим піносклом на модифікованому модельному вогнищі 2В: засипання сухого піноскла; уповільнення горіння над шаром піноскла; дуже слабке горіння над шаром піноскла.

Після засипання шару сухого ПС, виходячи зі співвідношення [43]

$$\Pi = \frac{h \uparrow}{h_{\text{зар}}} = \frac{h \uparrow}{h \uparrow + h \downarrow}$$

було розраховано загальну товщину шару піноскла ($h_{\text{зар}} = h \uparrow / \Pi$), яка повинна була утворитися в шарі бензину не менше за 0,5 м. В подальшому, як і в інших випа-

дках, в обговоренні буде наведено загальну товщину шару піноскла.

Результати проведених досліджень можна узагальнити наступним чином:

– за умови досягнення товщини шару піноскла 12 см спостерігається слабке горіння бензину;

– за товщини шару піноскла (16÷45) см відбувається слабке локальне горіння бензину вздовж борту дека;

– після досягнення товщини шару ПС 50 см горіння припиняється;

– за товщини шару піноскла 50 см під дією відкритого полум'я відбувається загорання, яке самочинно припиняється протягом (20÷30) с.

Аналогічні дослідження було проведено для змоченого піноскла. Вони показали, що для припинення горіння бензину потрібен менший шар змоченого піноскла, що знаходиться вище поверхні ГР на 19 см. Але, у зв'язку із суттєво меншою плавучістю змоченого піноскла ($\Pi_1 = 0,29$), для гасіння за реальних умов потрібна більша загальна товщина шару піноскла:

$$h_{\text{зар}} = \frac{h \uparrow}{\Pi} = \frac{19}{0,29} = 65,5 \text{ см.}$$

Тобто процес гасіння бензину сухим піносклом без застосування ГУС за значенням вогнегасного шару має перевагу порівняно зі змоченим ПС.

На рис. 4.23 наведено залежність вогнегасної товщини шару сухого ПС без додаткового подавання ГУС від температури спалаху різних горючих рідин, з урахуванням результатів, які було отримано на модифікованому модельному вогнищі пожежі 2В.

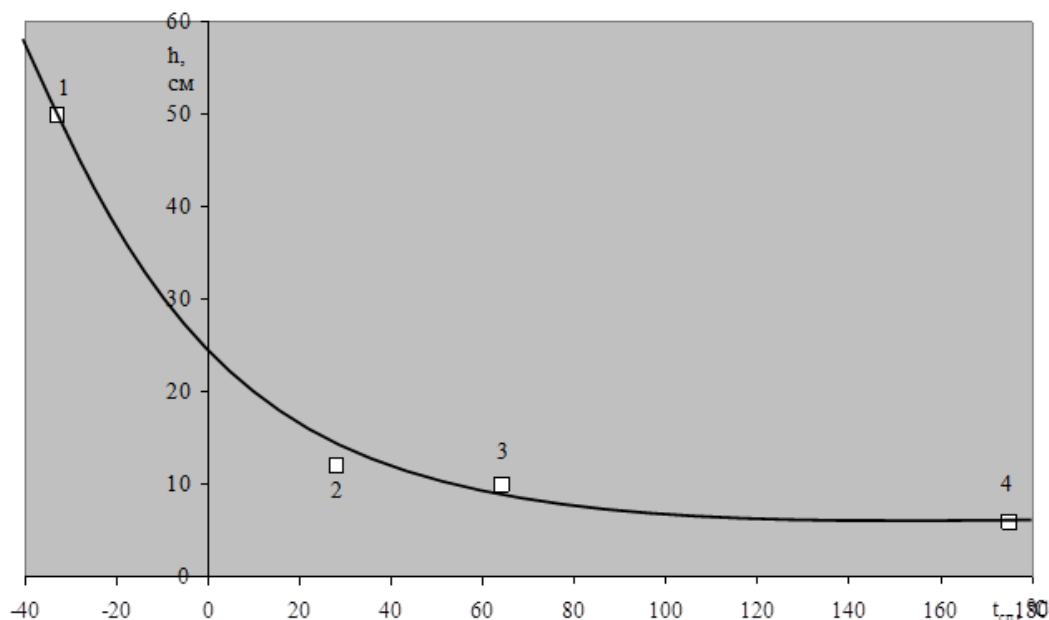


Рис. 4.23 – Залежність вогнегасної товщини шару сухого піноскла від температури спалаху горючих рідин:

1 – бензин; 2 – гас; 3 – дизельне паливо; 4 – машинне мастило I-20

Графічна залежність, наведена на рис. 4.23, у дослідженому діапазоні температур спалаху вуглеводнів ($-40 \div 180$) $^{\circ}\text{C}$ апроксимується рівнянням:

$$h_{\text{заг}} = 0,2 \frac{273}{t_{\text{сп}} + 273} + 0,045, \quad (4.4)$$

де $t_{\text{сп}}$ – температура спалаху горючої рідини, $^{\circ}\text{C}$.

4.4 Гасіння бензину на модифікованому модельному вогнищі пожежі 8В

У розділах 4.1–4.3 наведено дані щодо гасіння пожежі класу «В» на лабораторному модельному вогнищі малого розміру та стандартному модельному вогнищі пожежі 2В. Відмічено, що умови горіння та результати гасіння залежать від розмірів вогнища пожежі. Це потребує додаткових досліджень на модельних вогнищах великих розмірів.

Для визначення умов гасіння було створено модифіковане модельне вогнище пожежі 8В (виконання 2) з характеристиками: діаметр – 60 см, вільна площа поверхні рідини – $0,28 \text{ м}^2$, що в 4,3 разу більше, ніж у стандартного модельного вогнища пожежі 2В. Висоту борту стандартного модельного вогнища було обрано на 8 см більше за висоту борту стандартного модельного вогнища пожежі 8В, тобто – 28 см [287–290]. Це пояснюється потребою забезпечити плавучість шару піноскла у горючих рідинах без осідання його на дно дека. В якості горючої рідини в даному дослідженні було обрано бензин (АІ-92). Відповідно до даних, наведених у роботі [270], масова швидкість вигорання бензину на такому вогнищі пожежі становить близько 80 % від значень для великих за площею вогнищ.

Експеримент проводився аналогічно до методики, описаної вище (розд. 4.3), але в деко було налито вже 24 л води та 8 л бензину. Кількість води було збільшено на 8 л, порівняно зі стандартним модельним вогнищем пожежі 8В, для забезпечення плавучості шару піноскла без осідання його на дно дека. Після утворення вказаної горючої системи було проведено запалювання пари над поверхневим шаром бензину, і після однієї хвилини вільного горіння візуально фіксувалася висота полум'я. Потім в деко засипались заздалегідь виміряні порції піноскла, кожна з яких забезпечувала збільшення загальної товщини шару піноскла на 2 см. У дослідах було використано подрібнене піноскло фракції (1÷1,5) см. Через одну хвилину після подавання кожної порції піноскла візуально фіксувалася висота полум'я. В подальшому процедура засипання й фіксації висоти полум'я повторювалася аж поки інтенсивність горіння не зменшувалася до якісного рівня 1, згідно з табл. 4.5. Після цього на поверхню ПС подавалися компоненти ГУС за допомогою побутових розпилювачів ОЗ-2. Експеримент було проведено за температури 14°C та швидкості вітру 2 м/с.

На рис. 4.24 наведено основні етапи гасіння бензину на модифікованому модельному вогнищі пожежі 8В: вільне горіння, подавання ПС, зменшення інтенсивності горіння крізь ПС, слабе горіння; подавання ГУС, згасання вогнища.



Рис. 4.24 – Етапи гасіння модифікованого вогнища пожежі 8В:

а) вільне горіння бензину; б) подавання ПС; в) зменшення інтенсивності горіння; г) слабке горіння; д) подавання ГУС; е) згасання вогнища

В табл. 4.12 наведено відповідні результати щодо характеру горіння бензину в процесі подавання піноскла та ГУС, спираючись на якісну шестибальну шкалу оцінки інтенсивності горіння. Позначкою “*” у таблиці відмічено можливість завершення гасіння шляхом подавання ГУС із певною інтенсивністю.

Таблиця 4.12 – Якісна оцінка результатів гасіння бензину сухим ПС

Якісна оцінка характеру горіння за товщини шару сухого ПС, см							
2 см	4 см	6 см	8 см	10 см	12 см	14 см	16 см
5	5	5	4	3	2**	1*	1*

* – гасіння відбувається після подавання ГУС із поверхневою витратою 0,2 г/см²;

** – гасіння відбувається після подавання ГУС із поверхневою витратою 0,5 г/см².

Порівняння результатів із гасіння бензину в модельному вогнищі пожежі 8В з відповідними результатами, що отримані на лабораторному модельному вогнищі пожежі та модельному вогнищі пожежі 2В (табл. 4.11), вказують на близькість результатів для усіх трьох вогнищ пожежі.

4.5 Експериментальне дослідження умов гасіння аварійних розливів горючих рідин із використанням піноскла та гелеутворюючих систем

Пожежі, які пов'язані з горінням аварійних розливів ГР можна поділити на два види: пожежі в обвалуваннях резервуарів із ГР та пожежі розливів ГР на поверхні за відсутності огороження. Гасіння пожеж розливів ГР в обвалуванні мало відрізняється від гасіння пожеж у резервуарах. У випадку розливу ГР на горизонтальні поверхні, не здатні до просочування, та за відсутності огороження утворюється шар рідини товщиною не більше за 2 мм [291–292]. Шар горючих рідин такої товщини вигорає за час менший однієї хвилини. Такий час не дозволяє навіть почати процес гасіння пожежі. В разі розливу ГР на поверхні, які не здатні до просочування, процес вигорання ГР може відбуватися протягом десятків хвилин. В багатьох випадках така ситуація може викликати потребу в пожежогасінні.

Попередні дослідження показали, що інтенсивне горіння ґрунту, просоченого ГР, відбувається тільки у випадку ЛЗР. Тому в якості ГР було обрано найбільш поширену ЛЗР – бензин. В якості матеріалу, який може всмоктувати великі кількості рідини, було обрано пісок. В попередніх дослідах було встановлено, що процес горіння піску, змоченого бензином, продовжується більше 10 хв.

Якщо вважати, що на поверхні просоченого ґрунту залишається шар горючої рідини, то це робить неможливим подавання ГУС, тому попередня подавання піноскла залишається необхідною.

В якості лабораторного модельного вогнища пожежі класу «В» було обрано металеву ємність циліндричної форми із внутрішнім діаметром 18 см та висотою борту 4,5 см (рис. 4.25, а). В неї засипався сухий пісок шаром 4 см. Після чого в ємність заливалось 200 мл бензину АІ-92. Модельне вогнище підпалювався (рис. 4.25, б) та після однієї хвилини вільного горіння в нього засипалось сухе ПС шаром 5 см (рис. 4.25, в). Далі на поверхню ПС подавалися компоненти ГУС у режимі «роздільно-одночасно» (рис. 4.25, д). Після короткочасного подавання ГУС процес горіння припинявся. Поверхнева витрата ГУС, яка виявилася необхідною для припинення горіння за таких умов, становила $\sim 0,2$ г/см².

Послідовність етапів гасіння просоченого бензином піску шляхом послідовного подавання ПС та ГУС наведено на рис. 4.25: зовнішній вигляд модельного вогнища пожежі; горіння піску, який змочено бензином (час вільного горіння – одна хвилина); засипання піноскла; горіння бензину крізь шар піноскла 5 см; подавання ГУС; припинення горіння.

Якщо вважати, що на поверхні просоченого ґрунту відсутній шар горючої рідини, то існує можливість подавання ГУС без попереднього подавання піноскла. Відповідно, у якості другого варіанта гасіння модельного вогнища пожежі було обрано гасіння за допомогою тільки ГУС, без застосування піноскла. Початкові етапи гасіння співпадали з гасінням у випадку одночасного використання ПС і ГУС. Через одну хвилину вільного горіння подавалися компоненти ГУС (рис. 4.26, а). Горіння припинялось протягом часу подавання ~ 1 с. Поверхнева витрата ГУС, яка виявилася необхідною для припинення горіння, складала $\sim 0,2$ г/см².



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 4.25 – Етапи гасіння просоченого бензином піску за допомогою ПС та ГУС:

а) модельне вогнище; б) вільне горіння піску з бензином; в) засипання ПС; г) горіння з шаром ПС 5 см; д) подавання ГУС; е) припинення горіння



а)



б)

Рис. 4.26 – Етапи гасіння піску, який змочено бензином, за допомогою ГУС:

а) подавання ГУС; б) припинення горіння

Співставлення процесу гасіння піску, змоченого бензином, за умови відсутності поверхневого шару горючої рідини за допомогою бінарної системи «ПС + ГУС» та тільки ГУС дозволяє зробити висновок, що більш ефективним є використання тільки ГУС без застосування піноскла, оскільки досягається утворення більш щільного гелевого шару.

4.6 Висновки за розділом 4

1. Запропонований для забезпечення плавучості шару гелю в горючих рідинах легкий негорючий носій – гранульоване піноскло за товщини шару понад 10 см дозволяє зменшити масову швидкість вигорання легкокиплячих рідин (пентан, гептан, бензин, уайт-спірит) в десятки разів (у 59 разів для бензину). Це дозволяє знизити швидкість конвекційних потоків над поверхнею рідини, що горить, до рівня, що дозволяє успішно подавати компоненти гелеутворюючої системи в розпиленому вигляді.

2. Найкращі вогнегасні властивості має подрібнене піноскло з розміром гранул ($1 \div 1,5$) см. Для такої фракції часток піноскла для горючих рідин отримано найменші значення масової швидкості вигорання та найменші витрати компонентів гелеутворюючої системи.

3. Гасіння легкокиплячих рідин досягається нанесенням шару сухого піноскла товщиною 50 см без подавання компонентів гелеутворюючої системи. В разі використання гелеутворюючої системи з поверхневою витратою не менше $0,2 \text{ г/см}^2$ гасіння легкокиплячих рідин досягається шляхом нанесення шару сухого піноскла товщиною ($10 \div 14$) см.

4. Гасіння висококиплячих рідин (октан, декан, додекан, гас, дизельне паливо й машинне мастило) можна досягти нанесенням змоченого піноскла шаром від 10 до 3 см відповідно, без додаткового нанесення шару гелю. Гасіння сухим піносклом потребує утворення на 2 см більшого загального шару. Тому, за умови гасіння висококиплячих рідин, перевагу має змочене піноскло, яке забезпечує гасіння за товщини шару на 2 см менше, ніж сухе. Вогнегасний шар піноскла можна зменшити ще на ($1 \div 2$) см у разі наступного подавання ГУС із питомою поверхневою витратою $0,2 \text{ г/см}^2$.

5. Запропоновано апроксимаційні рівняння, які дозволяють розрахувати товщину вогнегасного шару піноскла для гасіння пожеж класу «В» на підставі даних щодо температур спалаху рідин та способу використання піноскла для гасіння. На основі аналізу залежностей вогнегасної товщини шару піноскла від температури спалаху встановлено:

– гасіння усіх легкозаймистих рідин із температурою спалаху, меншою за $30 \text{ }^\circ\text{C}$, доцільно здійснювати сухим піносклом;

– зменшити загальну товщину шару сухого ПС, за умови гасіння легкозаймистих рідин, можна за рахунок використання ГУС із поверхневою витратою $0,2 \text{ г/см}^2$ у разі подавання на несучий шар ПС товщиною $10 \div 14$ см;

– в разі гасіння ГР із температурою спалаху більшою за $60 \text{ }^\circ\text{C}$ перевагу має змочене піноскло;

– в інтервалі температур спалаху $30\div 60$ °С сухе та змочене піноскло мають близькі вогнегасні характеристики.

6. Експериментально встановлено, що для гасіння аварійних розливів ГР поверхні, здатні до просочування, більш ефективним є використання гелеутворюючої системи без застосування піноскла. Поверхнева витрата гелеутворюючої системи, яка потрібна для припинення горіння просоченого бензином піску, становить $\sim 0,2$ г/см² без попереднього нанесення піноскла.

РОЗДІЛ 5

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВОГНЕГАСНОЇ СИСТЕМИ «ГЕЛЬ-ПІНОСКЛО» ПО ВІДНОШЕННЮ ДО СПИРТІВ

Серед великої номенклатури горючих рідин особливе місце займають полярні рідини. Спирти поміж них є одними з найбільш розповсюджених на практиці [284]. Крім того, вони використовуються як компоненти сумішевих палив; ці суміші також мають характеристики полярних рідин. Процес гасіння пожеж такого класу рідин супроводжується явищами, які створюють великі труднощі та погіршують ефективність гасіння в цілому. Означений стан вимагає додаткових технічних і технологічних рішень.

Необхідно відзначити, що для гасіння спиртів допускається використання майже всіх типів вогнегасних засобів [265, 279]: води, піни, вогнегасних порошків, аерозолей, газами-розбавлювачами, газоподібними інгібіторами, рідким азотом та твердої вуглекислою.

Найбільш широко застосовуваним засобом пожежогасіння є вода. Оскільки особливістю перших членів гомологічного ряду спиртів (метанол, етанол, пропанол, ізопропанол і трет-бутанол) є їх повна розчинність у воді, то використовувати воду для їх гасіння (гасіння пожеж класу «B2») можливо. При цьому досягається не тільки охолодження рідини, що горить, але й розведення спиртів до негорючого стану [265]. Однак, у зв'язку зі значними витратами води на гасіння спиртів з використанням ефекту розведення до негорючого стану, можливо переповнення резервуара з витіканням рідини, що горить. Крім того, утворення розбавленого продукту призводить до неможливості для цих рідин подальшого цільового промислового використання, передбаченого технологічним процесом.

У більшості випадків гасіння пожеж класу «B2» рекомендується проводити піною спеціального призначення [265]. Піни, отримані зі стандартних піноутворювачів загального призначення не забезпечують гасіння, мають на поверхні спиртів низьку стійкість. Внаслідок цього ізолюючий шар не встигає накопичуватись. Бульбашка піни при контакті з полярною рідиною руйнується, а вся піна втрачає дрібнодисперсну структуру, осідає та швидко змішується з полярною рідиною. Таке становище викликало розробку спеціальних засобів пожежогасіння таких рідин, у тому числі для водорозчинних спиртів, зокрема було розроблено піни спеціального призначення, які на даний час визнано найбільш ефективним засобом гасіння [265, 279]. Цей клас вогнегасних пін містить полімерні добавки (наприклад, полісахариди), що осідають з піни на полярну рідину та створюють захисну плівку, на якій і накопичуються піна. В цьому випадку найкращі вогнегасні характеристики проявляють піни на основі спиртостійких ПУ (маркування «AR» – «alcohol resistant») або «ATC» – «alcohol type concentrate»).

Такі піноутворювачі виготовляються з синтетичної сировини або сировини природного походження та містять водорозчинні полімери (як правило,

тиксотропні полісахариди або інші розчинні у воді і самому ПУ сполуки, які коагулюють при контакті з полярними органічними розчинниками, в тому числі – спиртами). При контакті піни, отриманої з робочих розчинів «спиртостійких» ПУ спеціального призначення, з полярної горючою рідиною на її поверхні утворюється проміжна ізолююча плівка, що запобігає контакту піни з цією рідиною і формує плівку, на якій можливо накопичити ізолюючий шар піни, достатній для гасіння спирту, що горить. Але руйнування піни залишається інтенсивним, тобто вона характеризується низькою стійкістю, що означає низьку ефективність гасіння.

Для покращення гасіння полярних розчинників пропонують поліперфторалкілзаміщені композиції, які після подачі піни на поверхню рідини «зверху» осідають на полярному розчиннику і утворюють плівку, не розчинну в ньому, що захищає піну від руйнування [191]. Однак і такі піни мають суттєві недоліки. Так, вони змінюють регламентовані властивості спирту або спиртовмісного палива за рахунок розведення водою та забруднення поверхневоактивними речовинами, що робить їх непридатним для подальшого використання. Відзначено, що навіть для палив з низьким вмістом спирту, наприклад Е-10, використання ПУ типу AR ефективно тільки в умовах м'якої подачі [286]. Крім того, для гасіння спиртів необхідні великі витрати вогнегасячої речовини [265], що призводить до низьких економічних показників такого способу гасіння в цілому. У разі використання в складі ПУ перфторованих сполук, які дозволяють значно підвищити ефективність гасіння, виникають значні проблеми для навколишнього середовища. Тому у світі існує тенденція до обмеження застосування таких засобів пожежогасіння. Використання інших вогнегасних речовин для гасіння пожеж горючих рідин має ще більші обмеження й недоліки в порівнянні з використанням води або пін. Такий стан питання пожежогасіння полярних рідин формує проблему пошуку якісно нових засобів їх гасіння

Серед нових засобів пожежогасіння рідин слід зазначити можливість використання крупнодисперсних твердих матеріалів низької щільності з закритими порами, що відображено раніше в розділах 2–4. На прикладі гасіння горючих рідин вуглеводневої природи було встановлено, що для багатьох рідин достатньо використовувати сухе або змочене ПС, а в деяких випадках необхідно додатково наносити шар гелю на шар легкого носія. Однак можливість гасіння горючих рідин іншої хімічної природи, зокрема полярних, не було розглянуто.

Пряме перенесення раніше встановлених закономірностей, отриманих для вуглеводневих рідин та їх сумішей на спирти некоректне через суттєві відмінності у властивостях. В першу чергу необхідно відзначити те, що ряд спиртів добре розчиняються у воді. Вміст води змінює властивості спиртів. Іншою відмінністю спиртів від вуглеводнів є їх більш високі теплоти випаровування. В якості горючих полярних рідин для проведення експерименту було обрано представники ряду нормальної та ізобудови: метанол, етанол, ізопропанол, н-бутанол, н-пентанол, н-гептанол н-октанол (одноатомні спирти),

етиленгліколь (двоатомний спирт), гліцерин (триатомний спирт). Деякі характеристики обраних спиртів наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Характерні властивості досліджених спиртів

Спирт	Вміст води ω , мас. %	Температура спалаху $t_{сп}$, °C	Теплота згоряння $Q_{н}$, МДж/кг	Розчинність у воді, мас. %
метанол	0,9	6,4* (6)	23,8	необмеж. р.
етанол	4	13,6*(13)	27,2	необмеж. р.
ізопропанол	1,5	14,3* (14)	30,1	необмеж. р.
н-бутанол	0,2	35	36,8	9
н-пентанол	0,1	36	38,4	2,7
н-гептанол	-	74	40,4	сл. р.
н-октанол	-	81	41,2	сл. р.
етиленгліколь	0,2	111–120	19,3	необмеж. р.
гліцерин	0,3	189	18,7	необмеж. р.

* – у дужках показано температуру спалаху чистого спирту без вмісту води.

5.1 Охолоджуюча здатність шару піноскла по відношенню до спиртовмісних рідин

Експериментальне дослідження охолоджуючої дії сухого та змоченого ПС по відношенню до спиртів було проведено за методикою, розглянутою в параграфі 3.2.3. На підставі моделювання динаміки охолодження рідин шаром сухого піноскла показано, що охолоджуюча дія забезпечується двома механізмами. Спочатку відбувається механічне перемішування поверхневого шару рідини менш з гарячими нижчими шарами, що викликано подачею гранул піноскла на поверхню. Далі відбувається теплообмін між гранулами й рідиною, що їх оточує. Це призводить до відбору тепла від поверхневого шару рідини. Час встановлення термічної рівноваги між піносклом і рідиною становить близько 1 хвилини.

Отримані дані стосовно охолоджуючої дії сухого піноскла для розігрітих спиртів, які було отримано на підставі розрахунку теплообміну сухого піноскла з рідиною, підтверджено результатами експериментальних досліджень на прикладі н-октанолу.

Для змоченого піноскла можливість проведення теоретичного розрахунку охолоджуючої дії існує тільки у разі, якщо відома частина води яка випарувалася або загубилася іншим шляхом. У разі спиртів, розчинних у воді це зробити важко. Для спиртів, які погано розчиняються у воді охолоджуючу дію змоченого піноскла можна оцінити на підставі результатів, отриманих для вуглеводневих рідин (Параграф 3.2.3). Проведена оцінка дозволила зробити висновок, що змочене подрібнене піноскло виявляє в 3,9–5,4 разів більшу охолоджуючу дію, ніж сухе.

Для важкокиплячих рідин є ймовірність припинення горіння лише за рахунок такої охолоджуючої дії. Горіння буде припинено, якщо поверхневий

шар рідини, що горить буде охолоджено до температури меншої ніж її температура спалаху.

5.2 Визначення ізолюючих характеристик шару піноскла по відношенню до спиртів

У параграфі 3.2.2 встановлено, що шар піноскла уповільнює швидкість випаровування бензину. При загальній товщині шару піноскла 10 см швидкість випаровування бензину зменшується майже у 4 рази. Для спиртів такі дослідження проведені не були.

В якості кількісної характеристики ізолюючої дії шару піноскла, була прийнята масова швидкість випаровування рідини.

$$V_m = \frac{\Delta m}{\tau S}, \quad (5.1)$$

де Δm – зміна маси рідини в результаті її випаровування; τ – час випаровування рідини; S – площа поверхні рідини

Масова швидкість випаровування є основним параметром, який визначає інтенсивність вигорання рідини, оскільки стадія випаровування є лімітуючою для процесу горіння рідин.

С використанням методики наведеної у параграфі 3.2.2 були визначені масові швидкості випаровування ряду спиртів за різних товщин шару піноскла. Вимірювання проводили за температури $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Відповідні результати наведено на рис. 5.1.

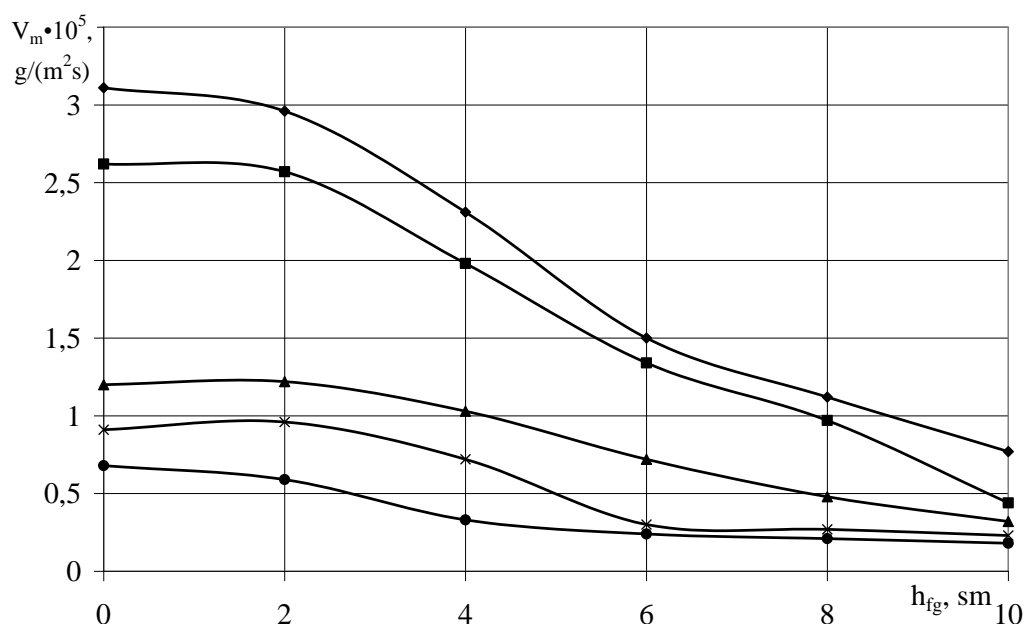


Рис. 5.1 – Залежність масової швидкості випаровування спиртів (v_m) від товщини шару сухого піноскла (h):

♦ - метанол, ■ – етанол, ▲ – пропанол-2, ✱ – бутанол, ● – пентанол-1

На підставі наведених графічних залежностей можна зробити висновок, що з ростом товщини шару сухого піноскла від 0 до 2 см відбувається незначне зменшення масової швидкості випаровування спиртів. При подальшому зростанні товщини шару піноскла від 2 до 10 см для метанолу та етанолу спостерігається швидке уповільнення швидкості випаровування. Найбільше зменшення цього показника для пропанолу-1, бутанолу-1 й пентанолу-1 відбувається в інтервалі товщини шару піноскла від 2 до 6 см. Для цих спиртів подальше зростання товщини шару піноскла призводить до незначного зменшення швидкості випаровування. В цілому можна зробити висновок, що шар піноскла 10 см викликає зменшення швидкості випаровування спиртів в 4–6 разів. Порівняння відповідних характеристик впливу товщини шару піноскла на випаровування бензину (Параграф 3.2.2) зі спиртами вказує на близьке значення коефіцієнтів уповільнення випаровування для неполярних та полярних.

5.3 Експериментальне визначення ізолюючих властивостей гелевих шарів по відношенню до спиртів

Шар гелю по відношенню до спиртів буде проявляти менші ізолюючі властивості, ніж по відношенню до вуглеводневих рідин. Це можна пояснити тим, що деякі спирти необмежено змішуються з водою і відповідно до моделі ізолюючого дії (Параграф 3.1.1) в співвідношенні (3.1):

$$j_{\mu.w} = \frac{D_w}{h} (c_{w.1} - c_{w.2}),$$

причому, поверхнева густина молярного потоку пари рідини крізь шар гелю $j_{\mu.w}$, буде суттєво більшою за рахунок збільшення концентрації $c_{w.1}$ на межі шару спирту й гелю. Але теоретичний розрахунок ускладнюється внаслідок саме невизначеності цієї концентрації.

За методикою, наведеною в параграфі 3.1.2 були визначені ізолюючі властивості етанолу, пропанолу-1, бутанолу-1 й пентанолу-1. Для отримання шару гелю була використана ГУС $\text{CaCl}_2(10\%)+\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2(10\%)$. Шар гелю наносився на дрібнокоміркову сітку. Товщина шару гелю відповідала питомій поверхневій витраті (Φ) 0,13–0,14 г/см² (відповідає товщині шару гелю в разі нанесення на гладку поверхню ~ 1,3 мм):

В якості кількісної характеристики ізолюючих властивостей гелеподібного шару був обраний коефіцієнт уповільнення випаровування рідини (К):

$$K = \Delta m_1 / \Delta m_2, \quad (5.2)$$

де Δm_1 – втрата маси спирту з вільної поверхні; Δm_2 – втрата маси спирту з нанесеним шаром гелю.

Всі дослідження ізолюючих властивостей гелю проводилися за температури $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$.

У табл. 5.2 наведені значення коефіцієнтів уповільнення випаровування для досліджених спиртів.

Таблиця 5.2 – Коефіцієнти уповільнення випаровування, що забезпечує шар гелю товщиною 1,3 мм, для спиртів

етанол	пропанол-2	бутанол-1	пентанол-1	гептанол -1
2,4	1,6	2,8	4,8	6,2

У зв'язку з надзвичайно малою швидкістю випаровування вищих і багатоатомних спиртів за температури 20°C дослідження ізолюючих властивостей шару гелю для цих полярних рідин не проводилися.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що шар гелю товщиною 1,3 мм уповільнює швидкість випаровування розчинних у воді спиртів в 2–3 рази. Для спиртів, які виявляють незначну розчинність у воді, коефіцієнт уповільнення випаровування перевищує 4,8 (пентанол-1 й гептанол-1). Порівняння ізолюючих властивостей гелю по відношенню до спиртів з аналогічною характеристикою для вуглеводневих рідин (Розділ 3) вказує на те, що спирти, які добре розчинні у воді, значно легше (більш ніж в 10 разів) проникають крізь шар гелю.

5.4 Визначення параметрів бінарного шару «гель–піноскло» по відношенню до спиртів

Бінарний шар «гель–піноскло» має відмінні охолоджуючо-ізолюючі властивості від окремо шарів піноскла або гелю. В залежності від температури спалаху горючої рідини, поверхню якої охолоджують, домінуюча дія даного вогнегасного засобу може бути або охолоджуючою (для рідин з високою температурою спалаху), або ізолюючою (для рідин з низькою температурою спалаху).

Візуальні спостереження показують, що за витрати гелю $0,65 \div 0,7 \text{ г/см}^2$ на всій поверхні шару гранул піноскла утворюється суцільний шар гелю. За менших витрат гелю проміжки між гранулами піноскла гелем не заповнюються. Це свідчить про те, що реалізувати високі ізолюючі властивості гелю очікується лише за його витрати понад $0,7 \text{ г/см}^2$. З урахуванням того, що густина гелю становить $\sim 1100 \text{ кг/м}^3$, а насипна щільність піноскла $\sim 105 \text{ кг/м}^3$, було розраховано додаткова товщина шару піноскла для забезпечення плавучості такого шару гелю. Вона склала 7 см.

Шар гелю не оказує безпосередньої охолоджуючої дії на шар рідини, що горить, але збільшення товщини шару гелю призводить до збільшення глибини занурення шару піноскла. Крім цього гель охолоджує поверхневий шар піноскла, що може забезпечити припинення горіння і не допустити повторного займання пари спирту. Також можна зауважити, що у разі гасіння

водорозчинних спиртів змоченим піносклом виникає додатковий фактор, пов'язаний з поглинанням пари спирту водою.

Для визначення охолоджуючої дії бінарного шару «гель–піноскло» було проведено експериментальні дослідження з охолодження розігрітого октанолу-1 ($t_{\text{кип}} = 195^{\circ}\text{C}$) запропонованою вогнегасною системою за умови попереднього нанесення шару піноскла та подальшого нанесення шару гелю з питомою поверхневою витратою $0,7 \text{ г/см}^2$. Методика проведення експерименту наведена у параграфі 3.3.3. Відповідні результати наведено у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Зниження температури октанолу-1 (Δt) внаслідок засипання сухого та змоченого піноскла без шару гелю та з його нанесенням

Вогнегасний засіб	Температура октанолу-1, $^{\circ}\text{C}$			
	80	100	120	140
	$\Delta t, ^{\circ}\text{C}$			
Сухе ПС	4,0	4,8	6,3	8,2
Сухе ПС + гель	4,0	4,9	6,5	8,4
Змочене ПС	18,2	23,1	31,8	47,4
Змочене ПС + гель	18,6	23,5	32,3	47,8

Як видно з наведених даних нанесення суцільного шару гелю на поверхню шару піноскла лише незначно підвищує охолоджуючу дію вогнегасної системи по відношенню до нагрітого октанолу-1. Також можна зробити висновок, що змочене піноскло виявляє в 4,5–5,5 рази більше охолоджуючу дію, ніж сухе. Аналогічні результати було отримано під час дослідження охолоджуючій дії бінарного шару на вуглеводневі рідини (Розділ 3).

5.5 Визначення плавучості сухого та змоченого піноскла в спиртах

Для підвищення охолоджуючих властивостей піноскла запропоновано використовувати змочене піноскло (Розділ 3). Змочування піноскла крім збільшення охолоджуючої дії викликає зменшення ізолюючих властивостей за рахунок зменшення плавучості ізолюючого шару у вуглеводневих горючих рідинах. У разі висококиплячих рідин змочене піноскло показало помітно більші вогнегасні властивості у порівнянні з сухим піносклом. Для випадку гасіння легкокиплячих рідин (бензин, пентан, гексан) змочене піноскло виявило менші вогнегасні властивості у порівнянні з сухим. У разі спиртів свій внесок в вогнегасні характеристики може надати особливість перших членів гомологічного ряду спиртів (метанол, етанол, пропанол) – значна розчинність у воді. З вищесказаного можна зробити висновок, що перспективним напрямком, що потребує проведення додаткових досліджень, є вивчення гасіння спиртів змочених піносклом. Це вимагає встановлення плавучості змоченого піноскла в спиртовмісних рідинах.

Так само, як і в розділах 2 та 3 у якості кількісної характеристики плавучості (П) було вибрано відношення висоти шару піноскла, який знаходиться над рівнем спирту, до загальної висоти шару піноскла:

$$\Pi = \frac{h \uparrow}{h_{\text{заг}}} = \frac{h \uparrow}{h \uparrow + h \downarrow}, \quad (5.3)$$

де $h \uparrow$ – висота шару піноскла над шаром спирту; $h_{\text{заг}}$ – загальна товщина шару піноскла; $h \downarrow$ – висота шару піноскла, яка знаходиться нижче шару спирту.

Знання плавучості і загальної товщини шару дозволяє розрахувати товщину шару піноскла вище й нижче рівня поверхні спирту:

$$h \uparrow = h_{\text{заг}} \cdot \Pi \quad (5.4)$$

$$h \downarrow = h_{\text{заг}} \cdot (1 - \Pi) \quad (5.5)$$

Для визначення плавучості в скляну ємність об'ємом 2 л спочатку було залито 1 дм³ спирту, далі – рівномірно засипали 1 дм³ гранульованого піноскла. Висоту шару піноскла, зануреного в спирт, та висоту піноскла, яке знаходиться вище рівня рідини, визначали візуальним методом за допомогою лінійки. Відповідні експериментальні дані щодо плавучості піноскла з розміром гранул 1÷1,5 см, а також значення густини для обраного ряду горючих рідин, наведено у табл. 5.4 та на рис.5.2.

Таблиця 5.4 – Плавучість подрібненого сухого ($\Pi_{\text{сух}}$) і змоченого ($\Pi_{\text{змоч}}$) піноскла в спиртах с різною густиною (ρ) для температури 20° С (розмір гранул 1÷1,5 см)

Спирт	ρ , кг/м ³	Плавучість	
		$\Pi_{\text{сух}}$	$\Pi_{\text{змоч}}$
Метанол	791,5	0,47	0,45
Етанол	789,3	0,47	0,44
Пропанол-2	785,1	0,46	0,45
Бутанол-1	808,6	0,48	0,46
Пентанол-1	814,4	0,48	0,44
Гептанол-1	821,9	0,49	0,45
Октанол-1	824,6	0,49	0,46
Етиленгліколь	1113,0	0,66	0,62
Гліцерин	1259,4	0,76	0,74
Вода	998,2	0,57	0,54

Дані таблиці показують, що сухе піноскло має дещо більшу плавучість, ніж вологе. Це означає, що для рідин з низькою густиною ізолююча дія буде переважати над охолоджуючою, а для рідин з великою густиною – навпаки.

Запропоновано для гасіння спиртів використовувати як сухе піноскло, так і змочене. Для отримання змоченого піноскла воно заливалося водою й було притиснуто вантажем до повного занурення. Після однієї хвилини змо-

чування, піноскло було висипано на сітку та за умови періодичного струшування забезпечувався час для стікання вільній воді. Після проходження означеної процедури змішування, піноскло ще утримує помітну кількість води. В якості кількісної характеристики вмісту води в змоченому піносклі, як і раніш, було використано водоутримання (В):

$$B = m_{(H_2O)} / ((m_{(H_2O)} + m_{(ПС)}), \quad (5.6)$$

де $m_{(H_2O)}$ – маса води; $m_{(ПС)}$ – маса сухого піноскла.

Дані рис. 5.2 демонструють, що зростання плавучості піноскла для спиртів пропорційно їх густині й ця залежність близька до лінійної.

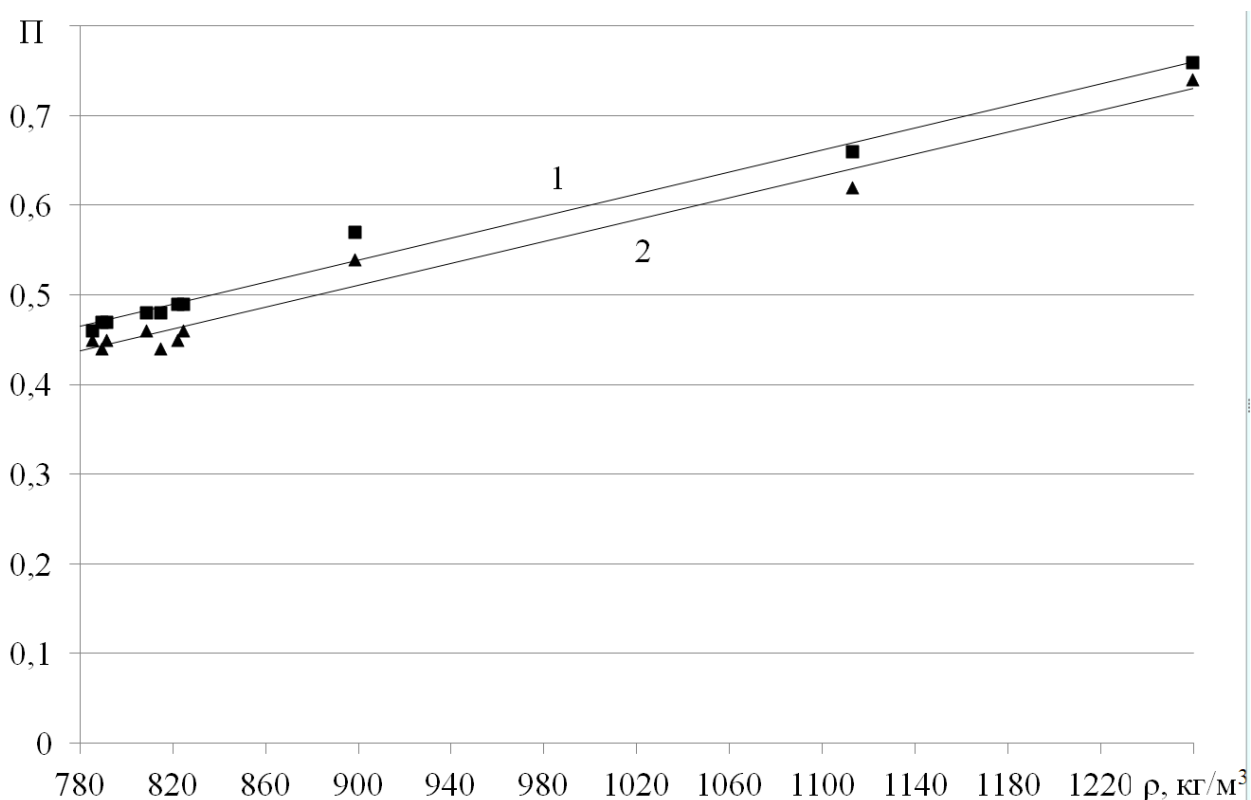


Рис. 5.2 – Залежність зміни плавучості сухого (1) та змоченого (2) піноскла від густини спирту відповідно до даних табл.5.4

Співставлення плавучості змоченого піноскла в спиртах і вуглеводневих рідинах (Розділ 2), які мають однакову густину, показує деяке розходження в цих характеристиках. Це можна пояснити тим, що перші члени гомологічних рядів спиртів повністю або частково змішуються з водою, а вуглеводневі рідини практично не розчинні у воді. Причому, найменша плавучість сухого піноскла спостерігається у воді, а найбільша у неполярних вуглеводнях.

5.6 Визначення часу працездатності бінарного шару «гель-піноскло», що нанесено на спиртові рідини

Важливою характеристикою ізолюючого шару на поверхні горючої рідини є час його вогнегасної дії. Так найбільш поширений вогнегасний засіб для гасіння горючих рідин – повітряно-механічні піни, поступово руйнуються протягом часу гасіння пожежі класу «В». Час підтримання вогнегасних властивостей піною (стійкість) складає від декількох секунд (на полярних рідинах або за високих інтенсивностях теплового потоку) до декількох десятків хвилин. Для успішного гасіння резервуарів з рідинами швидкість покриття ГР піною повинна перевищувати швидкість її руйнування. Це вимагає забезпечення великої інтенсивності подавання піни та збільшення її витрати. У будь-якому разі для гасіння пожеж резервуарів з горючими рідинами потрібно підтримувати умови погасання тривалий період. У разі самочинного охолодження стінок резервуара необхідний час підтримання вогнегасної дії може досягати однієї години. За цей час велика частина піни руйнується. Для зменшення цього часу необхідне штучне охолодження вільних бортів резервуару. Використання ж гранульованого піноскла, як одного з компонентів вогнегасної системи, дозволяє виключити цей недолік, оскільки воно за час пожежогасіння на змінює своїх властивостей.

В розділі 2 було показано, що плавучість шару, утвореного за допомогою гранульованого піноскла (отриманого механічним подрібненням блоків піноскла) зберігається необмежено довго. За 10 діб шар як сухого, так змоченого піноскла в бензині зберігся у незмінному стані.

На відміну від піноскла шар гелю з часом може втрачати вологу та поступово руйнуватися. Крім того, у випадку водорозчинних спиртів вони поступово заміщують частину води в гелі, що призведе до зміни властивостей гелевого шару. Візуальні спостереження поведінки суцільного шару гелю товщиною 0,7 см, який нанесено на шар піноскла, що утворено на поверхні водорозчинних спиртів (метанол, етанол, ізопропанол, етиленгліколь та гліцерин) за температури $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ зберігає суцільність більше однієї доби. Для інших спиртів час збереження суцільності шару перевищує 3 доби. Цього часу достатньо для гарантованої ліквідації пожежі резервуару зі спиртовмісними рідинами або пожежі аварійного розливу.

5.7 Висновки за розділом 5

1. Доведено наявність охолоджуючої дії шару сухого та мокрого піноскла в умовах його нанесення на поверхню спирту. Проведена оцінка показала, що змочене подрібнене піноскло виявляє в 3,9–5,4 разів більшу охолоджуючу дію, ніж сухе. Для важкокиплячих рідин є ймовірність припинення горіння лише за рахунок такої охолоджуючої дії.

2. Легкий негорючий носій – гранульоване піноскло, використане для забезпечення плавучості шару гелю у горючих рідинах, крім неполярних рідин, виявляє самостійну ізолюючу дію й для спиртів, що показує параметр

«швидкість випаровування». Так, шар піноскла 10 см викликає зменшення швидкості випаровування спиртів в 4–6 разів, що виявляється близьким до відповідного показника для неполярних рідин (Параграф 3.2.2).

3. Нанесення шару гелю товщиною 1,3 мм уповільнює швидкість випаровування спиртів, які розчинні у воді, в 2–3 рази. Для спиртів з незначною розчинністю у воді, коефіцієнт уповільнення випаровування перевищує 4,8 (пентанол-1 й гептанол-1). Порівняння ізолюючих властивостей гелю по відношенню до спиртів з аналогічним параметром для неполярних рідких вуглеводнів демонструє здатність водорозчинних спиртів інтенсивніше (більш ніж в 10 разів) проникати крізь шар гелю.

4. Бінарний шар «гель–піноскло» сформований за допомогою суцільного шару гелю на поверхні шару піноскла незначно підвищує охолоджуючу дію такої вогнегасної системи по відношенню до нагрітого октанолу-1. Змочене піноскло виявляє в 4,5–5,5 рази більше охолоджуючу дію, ніж сухе, що близько до відповідних даних, отриманих для неполярних вуглеводневих рідин (Розділ 3).

5. Сухе піноскло має дещо більшу плавучість, ніж вологе. Тому для рідин з низькою густиною ізолююча дія переважає охолоджуючу, а для рідин з великою густиною – навпаки. Для змоченого піноскла плавучість в спиртах, які мають однакову густину з неполярними вуглеводневими рідинами (Розділ 2) дає розходження у значеннях, оскільки перші члени гомологічних рядів спиртів повністю або частково розчинні у воді, на відміну від вуглеводнів. Найменша плавучість сухого піноскла спостерігається у воді, а найбільша у неполярних вуглеводнях.

6. Бінарна вогнегасна система з суцільного шару гелю товщиною 0,7 см та плавучої основи з піноскла, яку утворено на поверхні водорозчинних спиртів (метанол, етанол, ізопропанол, етиленгліколь та гліцерин) за температури $(21 \pm 2)^\circ\text{C}$ зберігає суцільність більше однієї доби. Для водонерозчинних спиртів гель зберігає суцільний характер довше 3 діб. Цього часу достатньо для гарантованої ліквідації пожежі резервуару зі спиртовмісними рідинами або пожежі аварійного розливу.

РОЗДІЛ 6

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВОГНЕГАСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ПОЖЕЖОГАСІННЯ НА ОСНОВІ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ГЕЛЕУТВОРЮЮЧИХ СИСТЕМ ПО ВІДНОШЕННЮ ДО СПИРТІВ

6.1 Експериментальне дослідження впливу товщини шару сухого піноскла на масову швидкість вигорання ряду спиртів

Пожежі класу «В» на даний час ще являють собою велику проблему для пожежогасіння. Серед великого різноманіття горючих рідин особливе місце займають спирти, при цьому вони є одними з найбільш поширених з класу полярних рідин. Цьому сприяє також той факт, що спирти є компонентами сумішевих палив, які також відносяться до полярних рідин. Гасіння полярних рідин створює великі труднощі через те, що звичайні піни швидко руйнуються при контакті зі спиртами. Для їх гасіння використовують спиртостійкі піноутворювачі маркування "AR" ("alcohol resistant") або "ATC" ("alcohol type concentrate").

Розглянуті у попередніх розділах засоби гасіння горючих рідин на основі легких пористих матеріалів і гелеутворюючих складів позбавлені багатьох недоліків існуючих засобів гасіння пожеж класу «В». Тому їх можливо випробувати й для випадку гасіння полярних рідин.

В ході проведення й аналізу експерименту з гасіння спиртів враховано той факт, що етанол та ізопропанол випускаються промисловістю з вмістом помітної кількості води. Вміст води в зразках спиртів визначався шляхом вимірювання їх щільності та показнику заломлення. Вище, у таблиці 5.1, наведені температури спалаху спиртів для зразків з вмістом визначеної кількості води.

Основним кількісним параметром, що характеризує інтенсивність горіння ГР, є її масова швидкість вигорання (V_m), яку визначають за співвідношенням:

$$V_m = \frac{\Delta m}{\tau \cdot S}, \text{ г/(м}^2\text{с)}, \quad (6.1)$$

де Δm – зміна маси рідини в досвіді, кг; τ – час горіння або випаровування рідини, с; S – вільна площа поверхні рідини, м².

На першому етапі досліджень була вивчена швидкість вигорання спиртів з вільної поверхні. В якості лабораторного модельного вогнища пожежі класу «В» як і в розділі 4 була обрана металева ємність циліндричної форми з внутрішнім діаметром 11,2 см ($S = 98,5 \text{ см}^2$). У ємність заливалося 250 мл спирту, що забезпечувало висоту шару рідини в металевій ємності $\sim 2,5$ см. Після цього спирт підпалювався й гравіметричним методом визначалася втрата його маси з часом. Вимірювання ваги здійснювалось за допомогою електронних ваг безперервного зважування ТНВ-600 з точністю 0,01 г. Експеримент проводився за температури навколишнього повітря $(18 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Наступним етапом досліджень стало вивчення швидкості вигорання спиртів з нанесеним шаром гранульованого піноскла фракції (1–1,5) см. Нанесення шару піноскла здійснювалося рівномірно на всю палаючу поверхню рідини. Після запалювання та 2 хвилин вільного горіння зразка горючої рідини на її поверхню наносився шар піноскла товщиною 2 см. Через 1 хвилину горіння крізь шар піноскла (після стабілізації розміру полум'я) починалася фіксація втрати маси лабораторного модельного вогнища пожежі класу «В» з інтервалом в 30 с протягом 3 хвилин. Результати дослідів показали, що масова швидкість вигорання в цьому часовому інтервалі стала. Після цього наносився наступний шар піноскла товщиною 1 см і протягом 3 хвилин проводилась повторна фіксація втрати маси лабораторного модельного вогнища. Процедура повторювалася до накопичення такого шару піноскла, коли досягалось припинення горіння. Експеримент проводився в інтервалі збільшення шару піноскла від 2 до 10 см. Після формування шару піноскла, що забезпечив припинення горіння, проводилися вимірювання масової швидкості випаровування спирту через цей шар піноскла вже без наявності горіння.

На підставі отриманих експериментальних даних з використанням співвідношення (6.1) були розраховані масові швидкості вигорання спиртів та їх випаровування після досягнення гасіння. Відповідні графічні залежності для різної товщини шару піноскла наведено на рис.6.1. Як і в розділі 4, значення загальної товщини шару піноскла являє собою суму висот шару піноскла зануреного в рідину й шару піноскла, що знаходиться вище рівня рідини.

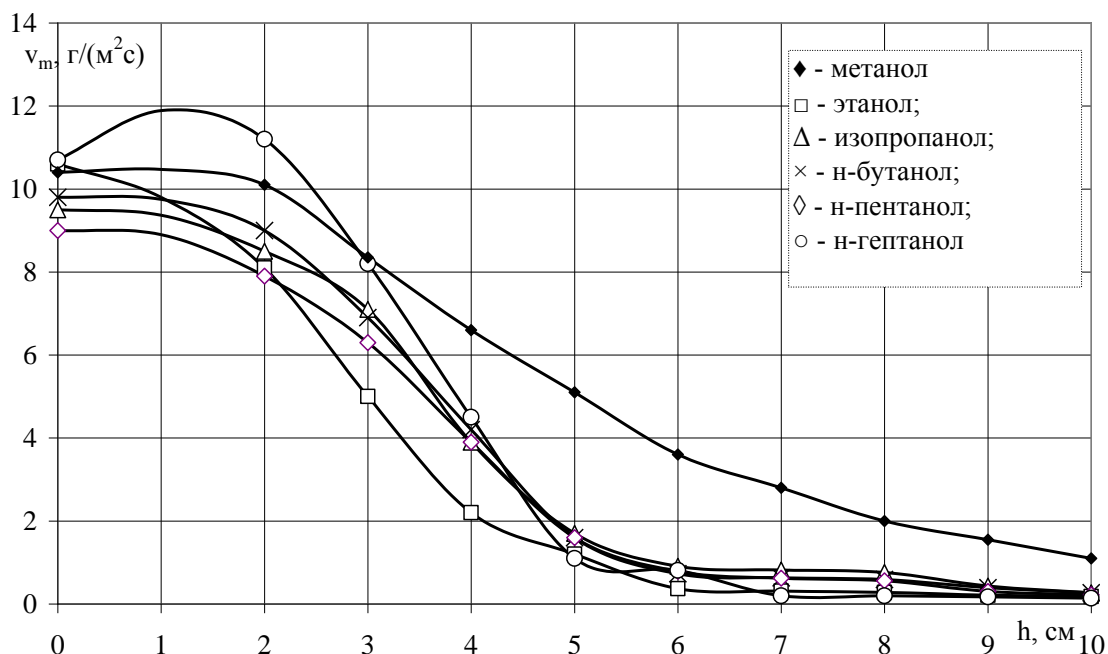


Рис. 6.1 – Залежність масової швидкості вигорання спиртів від товщини шару сухого піноскла

Як видно з графіка, при збільшенні товщини шару піноскла від 0 до 2 см відбувається невелике зменшення масової швидкості вигорання всіх спиртів крім н-гептанолу, для якого спостерігається невелике зростання даного показника. Такий ефект раніше спостерігався й для ряду вуглеводневих рідин (Розділ 4). В інтервалі товщини шару піноскла (2–5) см спостерігається найбільш інтенсивне сповільнення масової швидкості вигорання для всіх ГР. В інтервалі товщини шару піноскла більше 6 см масова швидкість вигорання знижується повільно. При цьому спостерігається дуже слабе локальне горіння, яке припиняється у разі накопичення шару піноскла товщиною 6–9 см для всіх вивчених спиртів. Ступінчасте зменшення масової швидкості вигорання в цьому діапазоні шарів піноскла відповідає припиненню горіння.

Відмінну залежність зниження масової швидкості вигорання від товщини шару піноскла відносно наведених вище даних продемонстрував метанол. Так, для нього спостерігається значно менш інтенсивний (в 1,4–1,8 рази) спад масової швидкості вигорання в інтервалі товщини шару піноскла до 5 см. Крім цього, виявлено, що для метанолу в момент погасання полум'я (12 см) масова швидкість випаровування в 3–4 рази є більшою ніж для інших досліджених спиртів, що можна пояснити більш високою нижньою концентраційною межею поширення полум'я.

На рис. 6.2 наведено залежність товщини шару піноскла, яке забезпечує гасіння спиртів залежно від їх температури спалаху. Для порівняння на рис.6.2 наведено аналогічну залежність для ряду вуглеводневих рідин (Розділ 4).

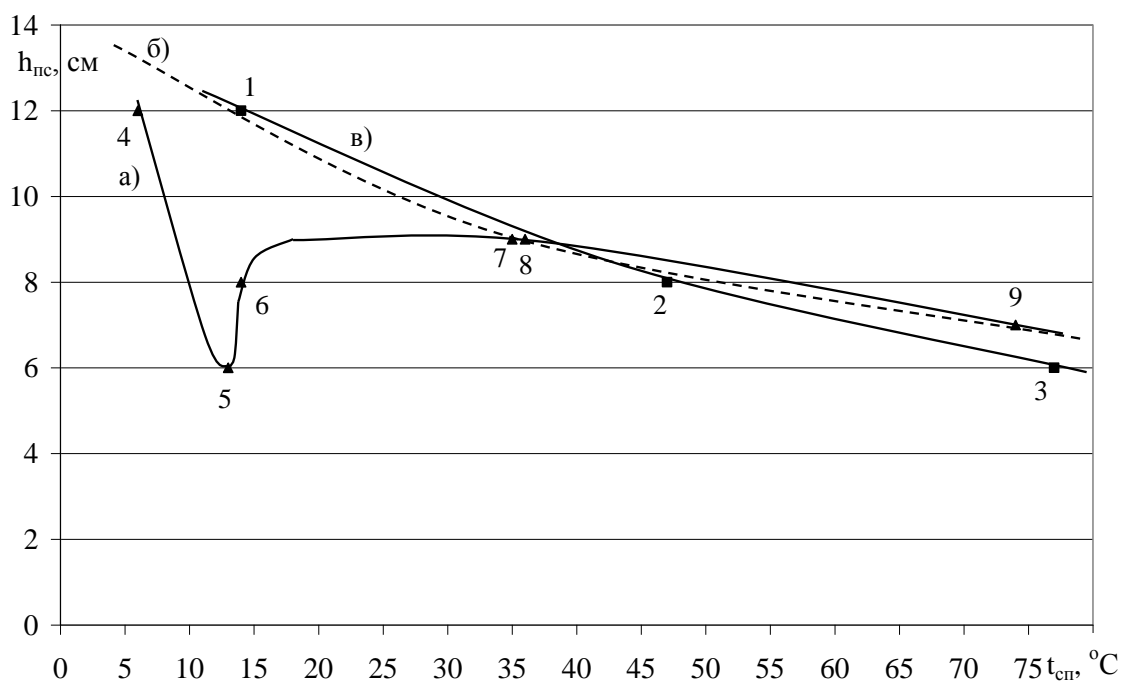


Рис. 6.2 – Залежність вогнегасної товщини шару ПС від температур спалаху для гасіння спиртів (а – за дослідом, б – екстарапольовано) та алканів (в):

1 – октан, 2 – декан, 3 – додекан, 4 – метанол, 5 – етанол, 6 – ізопропіловий спирт, 7 – бутанол, 8 – пентанол, 9 – гептанол

Аналіз цих залежностей дозволяє зробити висновок, що для гасіння перших членів гомологічного ряду одноатомних спиртів (етанолу й ізопропанолу) достатньо меншого шару піноскла, ніж для більш важких спиртів. Цей факт спостерігається не зважаючи те, що етанол та ізопропанол мають менші температури спалаху, ніж інші досліджені спирти. Така аномалія суперечить також й загальної тенденції, відзначеній для вуглеводневих рідин (Розділ 4). Дане явище можна пояснити тим, що етанол та ізопропанол мають помітно більш низькі теплоти згорання (27,2 і 30,1 МДж/кг), ніж вуглеводневі рідини з аналогічною температурою спалаху (44,5–44,8 МДж/кг), а також більш високе значення нижньої концентраційної межі. Ще одним фактором, що впливає на більшу легкість гасіння етанолу й ізопропанолу, є наявність в їх складі деякої кількості розчиненої води, яка флегматизує парово-повітряну суміш, звужує концентраційні межі (в т.ч. підвищує нижню концентраційну межу поширення полум'я), зменшує теплоту згорання й температуру полум'я. Інші три спирти містять малу кількість води, а їх теплоти згорання більше, ніж у етанолу й ізопропанолу. Також фактором, що впливає на процес випаровування, є змочуваність піноскла даною рідиною. З означених закономірностей знов таки випадає метанол. Він характеризується аномально високим значенням товщини вогнегасної шару піноскла.

З наведених спиртів зі значним вмістом води (метанол, етанол, ізопропанол) найбільшим вмістом характеризується етанол, що викликало найбільше зменшення від очікуваного вогнегасного шару піноскла – з 12 см до 6 см. Найменший вміст води та найменше відхилення від очікуваного вогнегасного шару піноскла спостерігається для метанолу.

Якщо виключити з аналізу залежностей, наведених на рис. 6.2, результати для спиртів, що містять воду, можна побачити, що вогнегасний шар для інших спиртів в межах похибки експерименту укладається в характер залежності, отриманої для вуглеводневих рідин.

Також, можна відзначити, що співвідношення масових швидкостей вигорання спиртів з вільної поверхні не відповідає їх порядку в гомологічному ряді, що можна відобразити показником кількості атомів вуглецю в молекулі n_c , див. рис.6.3.

Дані рис. 6.3 показують, що за винятком гептанолу в умовах експерименту існує тенденція до зниження масової швидкості вигорання у гомологічному ряду спиртів. Це можна пов'язати з підвищенням температур спалаху й кипіння у гомологічному ряду. Також, видно різницю у властивостях «парних-непарних» молекул для масової швидкості вигорання, що можна простежити й за довідковими даними. Для гептанолу даний параметр зростає, що визначається більшим внеском збільшення теплоти згорання в процес випаровування, ніж збільшення теплоти випаровування, а також меншим значенням нижньої концентраційної межі поширення полум'я. Сукупність даних ефектів може вплинути на ефективність гасіння шаром гранульованого піноскла та на значення ізолюючого шару.

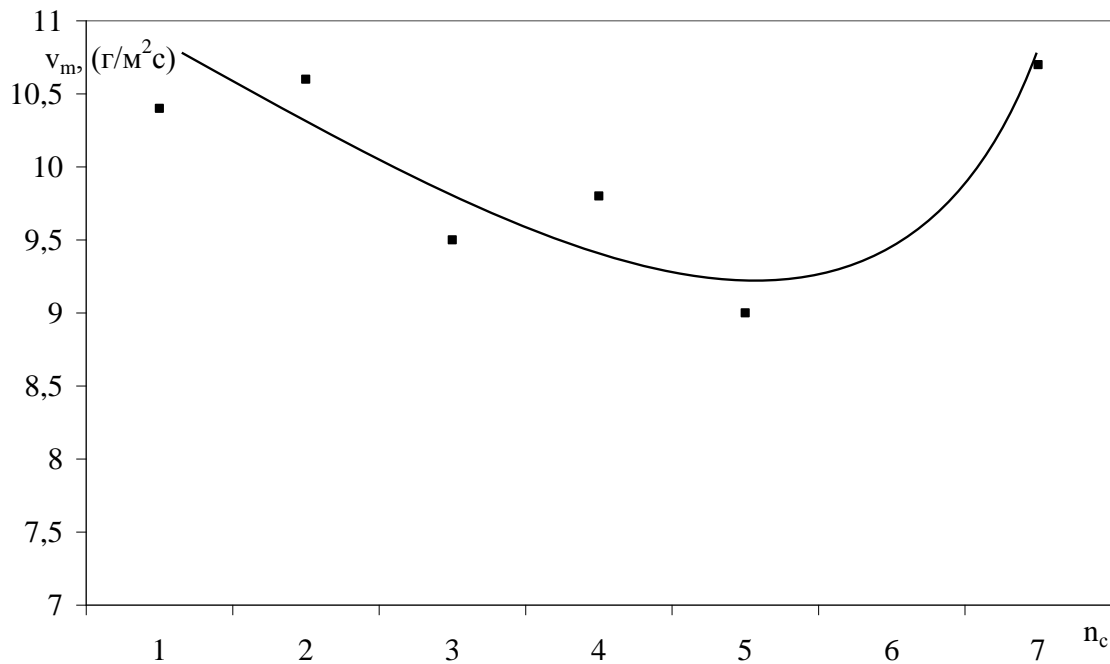


Рис. 6.3 – Залежність масової швидкості вигорання спиртів з вільної поверхні (V_m) від кількості атомів вуглецю в молекулі (n_c)

Результати гасіння спиртовмісних рідин за допомогою сухого піноскла, отримані на лабораторному модельному осередку пожежі класу «В», можна використати як оціночні для визначення умов гасіння модельних вогнищ великих розмірів та реальних пожеж в резервуарах зі спиртами. Використовуючи цей факт, проведемо порівняння витрат ВР при гасінні спиртів гранульованим сухим піносклом і спиртостійкими пінами. Витрата піноскла ($G_{пс}$) на 1 м² поверхні спиртів розрахуємо за формулою:

$$G_{пс} = \rho \cdot S \cdot h = 104,8 \cdot 1 \cdot 0,09 = 9,43 \text{ кг/м}^2, \quad (6.2)$$

де $\rho_{п}$ – насипна щільність піноскла (104,8 кг/м³); S – площа вільної поверхні спирту, що охоплено горіння, м²; h – висота вогнегасного шару піноскла, м. Витрата спиртостійкої піни ($G_{п}$) на 1 м² поверхні палаючої рідини можна розрахувати виходячи з нормативних умов гасіння піною [279] (часу (t) і інтенсивності подавання) в перерахунку на 1 м²:

$$G_{п} = S \cdot t \cdot I_{п} = 1 \cdot 1800 \cdot 0,08 = 144 \text{ кг/м}^2, \quad (6.3)$$

де $I_{п}$ – нормативні інтенсивність подавання спиртостійкої піни, кг/м²с;
 t – час гасіння піною середньої кратності «м'яким» способом, с.

З даних проведеного розрахунку можна зробити висновок, що маса піноскла, яка необхідна для гасіння спиртів, більше ніж в 15 разів є меншою за відповідну масу піни, яка необхідна для досягнення такого ж результату.

Для співставлення економічних параметрів гасіння спиртів за допомогою сухого піноскла й при використанні для гасіння спиртостійкого піноутворювача візьмемо для розгляду піноутворювач «SOFIR AFFF AR6%», що випускається в Україні. Відомо, що робочий розчин цього піноутворювача повинен містити 6% концентрату піноутворювача. Вартість 1 кг піноутворювача (на січень 2019 року) становить 60 грн. Тоді вартість гасіння в перерахунку на 1 м² горючої рідини складе: $E_{\Pi} = 144 \cdot 0,08 \cdot 60 = 691,2$ грн/м². У той самий час, вартість 1 кг піноскла в 2019 році становила 11,5 грн. Таким чином, виходячи з вартості вогнегасних речовин можна оцінити співвідношення економічної ефективності процесів гасіння спиртів. Оскільки фінансові витрати на піноскло для гасіння спиртів складають $E_{\text{ПС}} = 9,43 \cdot 11,5 = 108,45$ грн/м², то в порівнянні з гасінням піною спеціального призначення це виявляється у $E_{\Pi}/E_{\text{ПС}} = 691,2/108,45 = 6,3$ рази менше. Дана оцінка не враховує можливість регенерації піноскла після гасіння, що дозволяє використовувати його повторно й може підвищити отриманий показник ефективності гасіння.

Таким чином, можна зробити висновок, що для гасіння спиртів, як і для неполярних горючих вуглеводнів, доцільно використовувати легкий пористий гранульований матеріал – сухе піноскло, оскільки процес гасіння характеризується високою ефективністю. Згідно з даними експерименту, масові швидкості вигорання ряду одноатомних спиртів зменшуються з ростом товщини шару піноскла. Встановлено, що за товщини шару піноскла більше 5 см масова швидкість вигорання спиртів зменшується більш ніж у 10 разів. Показано, що етанол та ізопропанол, незважаючи на низькі температури спалаху, потребують для свого гасіння менший шар піноскла, ніж н-бутанол, н-пентанол та н-гептанол. Встановлено, що маса гранульованого піноскла, достатня для гасіння спиртів, більш ніж у 15 разів є меншою за масу спиртостійкої піни необхідної для реалізації аналогічного процесу гасіння. Економічна ефективність гасіння піносклом, виходячи з необхідних витрат подачі на гасіння, виявилася 6,3 рази більшою, ніж у разі використання піноутворювачів «SOFIR AFFF AR6%».

6.2 Експериментальне дослідження умов гасіння спиртів змоченим піносклом

Для підвищення охолоджуючих властивостей піноскла було запропоновано використовувати змочене піноскло (Розділи 3 і 4). Змочений стан піноскла для процесу пожежогасіння створює подвійний ефект протилежної дії: збільшення охолоджуючої дії та одночасне зменшення ізолюючих властивостей за рахунок зменшення плавучості шару піноскла з більшою щільністю. У разі висококиплячих рідин змочене піноскло продемонструвало помітно більші вогнегасні властивості в порівнянні з сухим піносклом. Для легкокиплячих рідин (бензин, пентан, гексан) відзначена зворотна залежність: змочене піноскло виявляє менші вогнегасні властивості у порівнянні з сухим. У разі нанесення змоченого піноскла на спирти свій внесок у вогнегасні характеристики може надати особливість перших членів гомологічного ряду спиртів

(метанол, етанол, пропанол) – велика розчинність у воді. Це вимагає експериментальної перевірки. З вищесказаного можна зробити висновок, що перспективним напрямком, які потребують проведення додаткових досліджень, є вивчення гасіння спиртів змоченим піносклом.

Експеримент був проведений для перших семи членів гомологічного ряду спиртів, що охоплює їх властивості по відношенню до води від необмеженої розчинності до відсутності розчинності.

Також для можливості аналізу експерименту взято до уваги, що метанол, етанол й ізопропанол, одержані шляхом простої перегонки, містять важковиділяємий залишок води. Тому на першому етапі для зразків, прийнятих до досліджень, нами було визначено вміст води, див. табл. 5.1. Вміст води визначався шляхом вимірювання щільності й показників заломлення даних рідин.

Раніше було показано (Розділи 3 і 4), що змочене піноскло виявляє значно більші охолоджуючі властивості в порівнянні з сухим щодо верхнього прогрітого шару рідини, що горить. Крім цього, на відміну від досліджень сухого піноскла, для змоченого з'являються суттєві ускладнення для експериментального визначення масової швидкості вигорання рідин. Це пов'язано з тим, що втрата маси при горінні рідин буде обумовлена не тільки процесом вигорання, а й процесом випаровування води зі змоченого піноскла. Тому, масова швидкість вигорання спиртів крізь змочене піноскло не визначалась, а візуальним способом фіксувалася зміна інтенсивності горіння та ефект припинення горіння.

У зв'язку з цим, для дослідження гасіння спиртів змоченим піносклом методика експерименту була змінена в порівнянні з методикою експерименту з сухим піносклом. Сам лабораторний модельний осередок пожежі класу «В» був залишений без змін. Процедури запалювання й засипки порцій змоченого піноскла також залишені без змін. Різниця полягала в тому, що порції змоченого піноскла, починаючи з товщини шару 5 см, засипалися дискретно в кількостях, які відповідали товщині шару піноскла рівною 0,5 см. Після засипання змоченого піноскла протягом 1 хвилини проводилася візуальна фіксація продовження або припинення горіння. Відповідні дані (крива «а») представлені на рис.6.4. Для порівняння на графіку наведені дані для алканів та деяких вуглеводневих технічних рідин (крива «б»), які мають температури спалаху відповідні діапазону для досліджених спиртів.

Візуальні спостереження процесу гасіння спиртів змоченим піносклом дозволили встановити факт інтенсивного скипання поверхневого шару висококиплячих спиртів (від гептанолу до гліцерину). При цьому над поверхнею спирту утворювався аерозоль з крапель води. Це призводило до ефекту розведення горючої пари спирту і, відповідно, до полегшення процесу гасіння.

Виходячи з даних наведеного графіка можна зробити висновок, що з ростом температури спалаху висота вогнегасного шару змоченого піноскла для спиртів й алканів зменшується починаючи з 10 см для метанолу та досягає значення 6,5 см для гептанолу. Також, звертає на себе увагу той факт, що для алканів в дослідженому діапазоні температур спалаху характер цієї залежності близький до лінійного, а для спиртів з високою температурою спалаху спостері-

гається уповільнення тенденції на зниження вогнегасного шару піноскла зі стабілізацією даного параметра на значенні шару змоченого піноскла $\approx 6,5$ см.

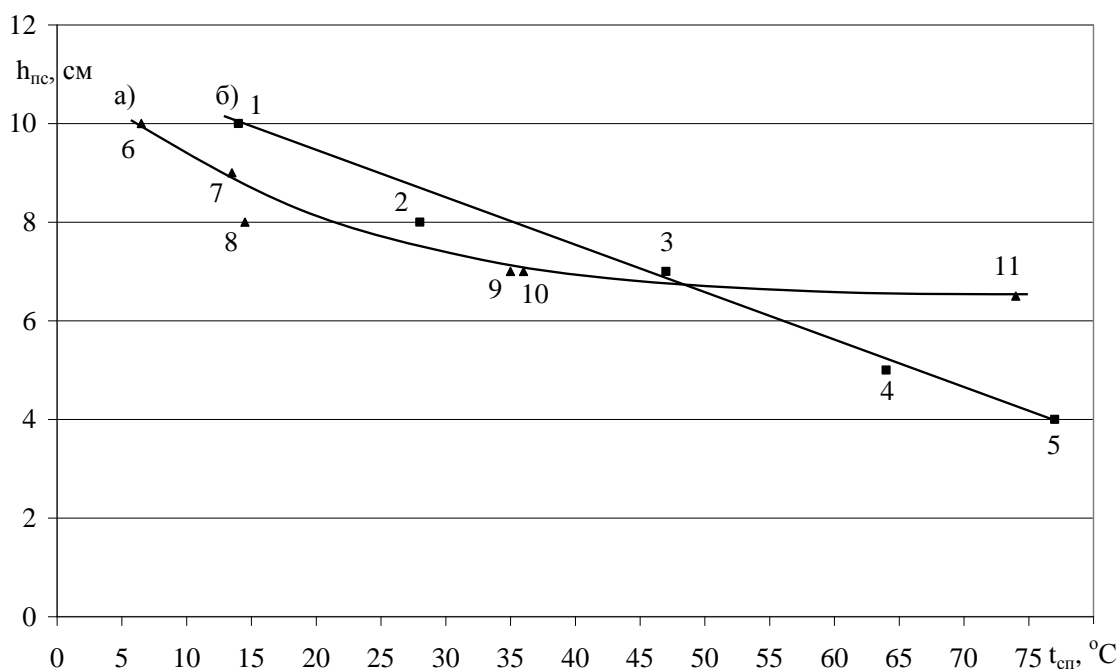


Рис. 6.4 – Залежність товщини шару змоченого піноскла, необхідного для гасіння спиртів (а) й алканів (б), від температур спалаху:

1 – октан, 2 – гас, 3 – декан, 4 – дизельне паливо, 5 – додекан, 6 – метанол, 7 – етанол, 8 – ізопропанол, 9 – бутанол, 10 – пентанол, 11 – гептанол

Слід також відзначити наявність відхилень від лінійної залежності зниження вогнегасного шару змоченого піноскла для алканів (рис.6.4, точки 2, 4 – гас та дизельне паливо). Зазначені рідини є паливом з багатьох компонентів, що змінює співвідношення між теплотою згорання, теплотою випаровування та нижньою КМПП для даних речовин і формує значення масової швидкості вигорання, яка дещо не відповідає температурі спалаху.

Існують відхилення й від загальної залежності для спиртів у вигляді зниження вогнегасного шару піноскла, що спостерігається для ізопропанолу (рис.6.5, позначення на осі «3»).

Ізопропанол має меншу температуру кипіння, температуру спалаху та теплоту випаровування, ніж пропанол, за тієї самої теплоти згорання й концентраційних меж. На рис 6.5 наведено залежності товщин вогнегасних шарів сухого й змоченого піноскла для вивчених одно-, дво- та триатомних спиртів.

Аналіз наведених залежностей дозволяє зробити висновок, що зі зростанням температури спалаху спиртів зменшується необхідна для гасіння товщина шару як сухого, так і змоченого піноскла. У всіх випадках шар змоченого піноскла, необхідний для гасіння, на (1,5–3) см є меншим, ніж шар сухого піноскла. Більш високі вогнегасні властивості змоченого піноскла обумовлені його істотно більшими охолоджувальними властивостями.

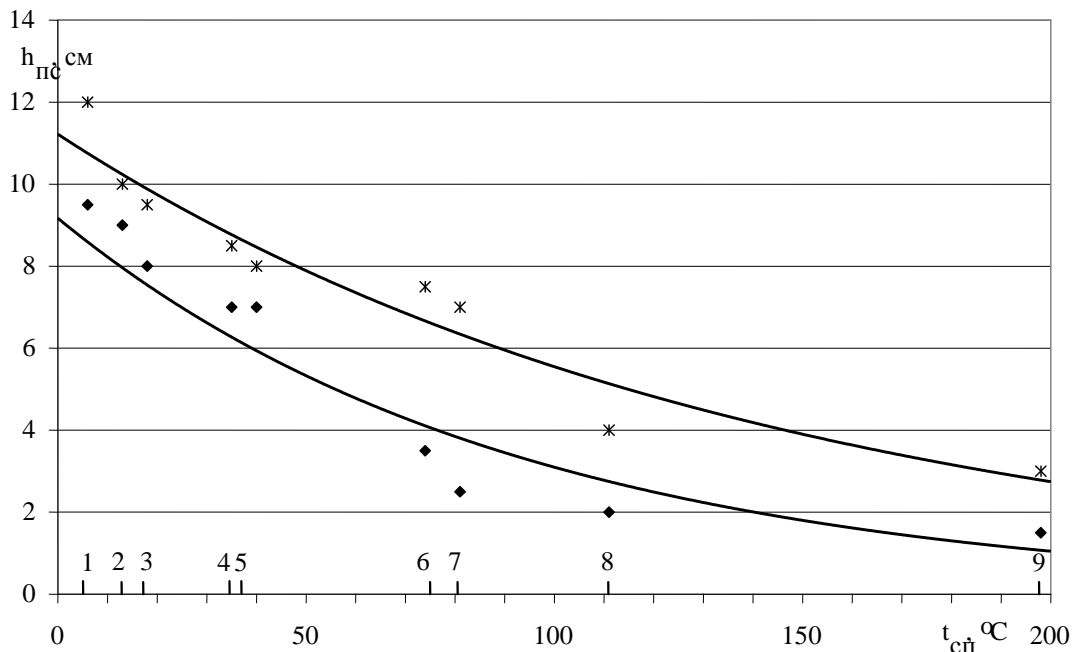


Рис. 6.5 – Залежності товщини шару сухого «ж» h_1 та змоченого «♦» h_2 ПС, потрібного для гасіння спиртів, від їх температури спалаху;

позначення на осі $t_{сг}$: 1 – метанол; 2 – етанол; 3 – пропанол-2; 4 – бутанол-1; 5 – пентанол-1; 6 – гептанол-1; 7 – октанол-1; 8 – етиленгліколь; 9 – гліцерин

Наведені графічні залежності апроксимуються рівняннями:

для сухого піноскла
$$h_{пс1} = 9,278^{-0,0109t_{сг}}$$

для змоченого піноскла
$$h_{пс2} = 11,297^{-0,007t_{сг}}$$

Відхилення експериментальних значень товщини вогнегасних шарів піноскла від наведених рівнянь апроксимуючих кривих не перевищує 1 см для сухого піноскла та 1,5 см – для змоченого піноскла.

6.3 Експериментальне дослідження умов гасіння спиртів сухим і змоченим піносклом с додатковим нанесенням шару гелю

Експериментальні дослідження гасіння спиртів сухим і змоченим піносклом з додатковим нанесенням шару гелю проводилися на такому ж, як і без нанесення шару гелю, лабораторному модельному осередку пожежі. Спочатку, порціями наносився шар піноскла до моменту, коли висота полум'я зменшилася до 5 см. На наступному етапі з використанням побутових розпилювачів ОР-2 на поверхню піноскла наносився шар гелю (гелеутворююча система $\text{CaCl}_2(10\%) + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2(10\%)$). Методику нанесення шару гелю наведено у розділах 3 та 4. При цьому за умов нанесення достатньо невеликої кількості гелю ($0,1-0,2 \text{ г/см}^2$) у всіх випадках спостерігалось припинення горіння. Відповідні досліди проводилися для всіх спиртів крім етиленгліколю і гліцерину.

В результаті проведеного експериментального дослідження встановлено, що нанесення додаткового шару гелю з питомою поверхневим витратою $(0,1-0,2) \text{ г/см}^2$ дозволяє загасити спирти на $(1-1,5) \text{ см}$ меншими шаром піноскла в порівнянні з гасінням сухим і змоченим піносклом без нанесення шару гелю.

6.4 Висновки за розділом 6

1. Збільшення товщини шару піноскла від 0 до 2 см суттєво не змінює інтенсивність вигорання відносно досліду для вільної поверхні. Товщина шару піноскла більше 6 см формує низьке значення масової швидкості вигорання з осередками слабого локального горіння. Таке горіння припиняється за умови подальшого накопичення шару піноскла до товщини 6–9 см для вивчених спиртів. Для метанолу властивий менш інтенсивний спад масової швидкості вигорання в умовах збільшення шару піноскла, а в момент погасання полум'я (12 см) масова швидкість випаровування виявилася у 3–4 рази є більшою ніж для інших досліджених спиртів (оскільки має більшу НКМПП).

2. Для гасіння перших членів гомологічного ряду одноатомних спиртів (етанолу й ізопропанолу) достатньо меншого шару піноскла (6 та 8 см, відповідно), ніж для більш важких спиртів (оскільки мають менші масові теплоти згорання, більше значення НКМПП, а також промислові рідини містять воду). Метанол характеризується аномально високим значенням товщини вогнегасної шару піноскла відносно інших водовмісних спиртів (12 см). Найбільшим вмістом води характеризується етанол, що викликало найбільше зменшення від очікуваного вогнегасного шару піноскла – з 12 см до 6 см.

3. З досліджених спиртів за винятком гептанолу в умовах експерименту існує тенденція до зниження масової швидкості вигорання у гомологічному ряду спиртів, що корелює з підвищенням температур спалаху й кипіння у гомологічному ряду. Підтверджено наявність коливальності властивостей для «парних-непарних» молекул за параметром «масова швидкість вигорання».

4. Встановлено, що за товщини шару піноскла більше 5 см масова швидкість вигорання спиртів зменшується більш ніж у 10 разів. Показано, що маса гранульованого піноскла, достатня для гасіння спиртів, більш ніж у 15 разів є меншою за масу спиртостійкої піни необхідної для реалізації аналогічного процесу гасіння.

5. З ростом температури спалаху висота вогнегасного шару змоченого піноскла для спиртів й алканів зменшується починаючи з 10 см для метанолу та стабілізується на значенні $\approx 6,5 \text{ см}$ для гептанолу. У всіх випадках шар змоченого піноскла, необхідний для гасіння, на $(1,5-3) \text{ см}$ є меншим, ніж шар сухого піноскла. Розроблено аналітичні залежності, що описують очікуваний вогнегасний шар піноскла даного фракційного складу для сухого та змоченого піноскла.

6. Встановлено, що нанесення додаткового шару гелю (гелеутворююча система $\text{CaCl}_2(10\%) + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2(10\%)$) з питомою поверхневим витратою $(0,1-0,2) \text{ г/см}^2$ дозволяє загасити спирти на $(1-1,5) \text{ см}$ меншими шаром піноскла в порівнянні з гасінням сухим і змоченим піносклом без нанесення шару гелю.

РОЗДІЛ 7

РОЗРОБКА ТЕОРІЇ ТА АПАРАТУРНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ВОГНЕГАСНИХ НЕГОРЮЧИХ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ГАСІННЯ ГОРЮЧИХ РІДИН

7.1 Аналіз теоретичних основ та способів транспортування легких негорючих пористих матеріалів на поверхню палаючих горючих рідин

Обов'язковою складовою запропонованої вогнегасної системи є негорючі пористі матеріали. В якості останніх було обрано гранульоване піноскло із розміром гранул (1,0÷1,5) см. Ефективність використання гранульованого піноскла підтверджується теоретичними і експериментальними дослідженнями (Розділи 3 та 4), що вимагає необхідності розробки та створення способів і технічних засобів їх ефективного подавання до вогнища пожежі.

На сьогодні технічні засоби для безперервного транспортування легких та сипких матеріалів є основою комплексної механізації вантажно-розвантажувальних робіт усіх провідних галузей світової промисловості – металургійної, гірничодобувної, енергетичної, хімічної, сільського господарства та будівництва [293–295]. Наявні технічні засоби для безперервного транспортування легких та сипких матеріалів умовно можна поділити на два типи: пневматичні установки та механічні конвеєри.

З урахуванням можливої оперативно-тактичної обстановки під час ліквідації пожеж ГР, подача до вогнища пожежі легких негорючих пористих матеріалів повинна виконуватись виключно з використанням закритих технологічних магістралей. Одним із можливих способів транспортування легких негорючих пористих матеріалів на поверхню палаючих нафтопродуктів є використання механічних шнекових конвеєрів [294–296], що є найбільш традиційним способом транспортування сипких вантажів у промисловості. Звичайний жорсткий шнековий конвеєр містить напрямну трубу, в якій розташований у підшипникових опорах вал зі смуговою спіраллю шнека. Вказані конвеєри можуть встановлюватися за різними кутами до горизонту та мають у забірній частині бункер для завантаження матеріалу, а з протилежного боку – вивантажувальне вікно. Технічно привод шнека може здійснюватись з будь-якої сторони від конвеєра. Наведені на рис. 7.1, 7.2 варіанти компоновання одномагістрального горизонтального жорсткого шнекового конвеєра набули широкого застосування у сільськогосподарському виробництві, переважно для транспортування різних видів зернових матеріалів.

Шнекові конвеєри, окрім функції транспортування, також можуть виконувати інші технологічні операції, наприклад, змішування, стиснення, подрібнення матеріалу, його порційне подавання, а також використовуються як живильники.

Використання гнучких гвинтових конвеєрів [296–298] дозволяє підвищити мобільність транспортування легких негорючих пористих матеріалів на поверхню палаючих нафтопродуктів. Принциповою відмінністю таких транс-

портерів є те, що гнучкий гвинтовий робочий орган вільно (без опор) розташовується в еластичному кожусі та його внутрішньою поверхнею переміщається матеріал у зону вивантаження. Під час обертання робочого органу з частотою понад (550÷600) об/хв гнучка гвинтова спіраль фактично рівномірно розподіляє сипкий матеріал периферією кожуха, що забезпечує самоцентрування робочого органу і транспортування продукту в зону вивантаження.

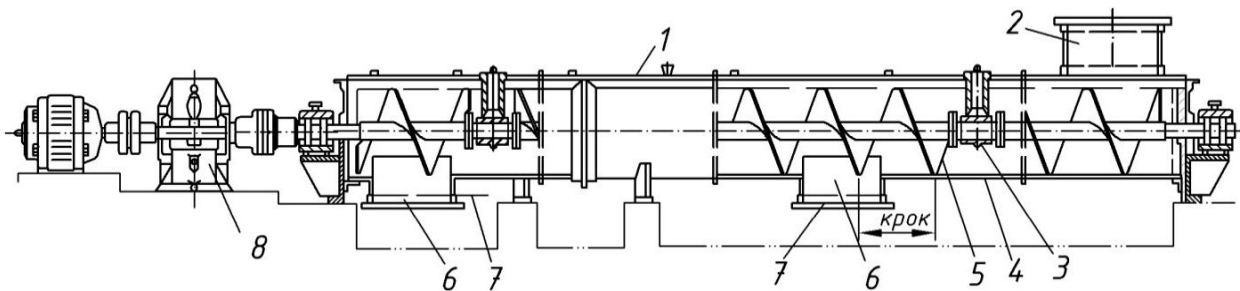


Рис. 7.1 – Компонувальна схема горизонтального шнекового конвеєра

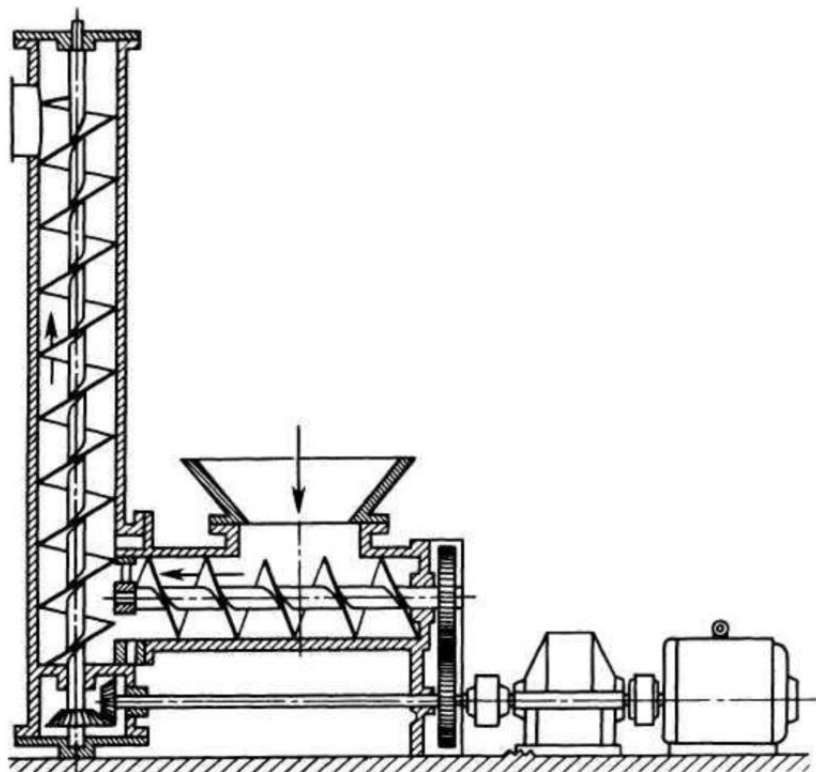


Рис. 7.2 – Компонувальна схема вертикального шнекового конвеєра

Базова конструктивно-технологічна схема гнучкого гвинтового конвеєра з центральним приводом зображена на рис. 7.3.

Сипкий матеріал подають на завантажувальну магістраль, звідки він самоплинно переміщається на обертову спіраль і в еластичному кожусі криволінійною технологічною магістраллю транспортується в зону вивантаження.

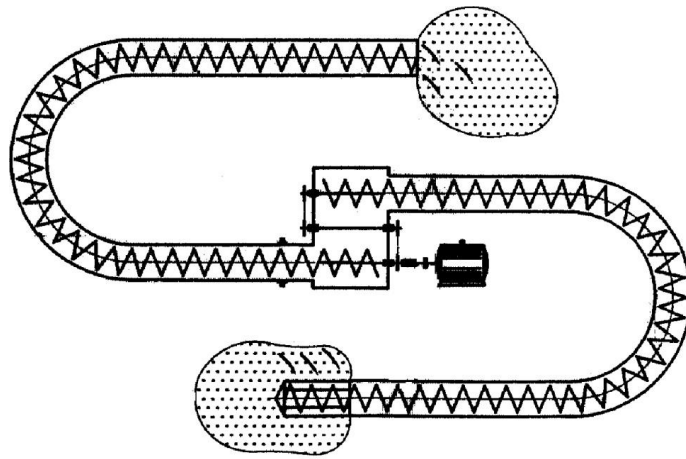


Рис. 7.3 – Конструктивно-технологічна схема гнучкого гвинтового конвеєра з центральним приводом

Перевагою такого типу конвеєра є можливість зміни траси транспортування і, відповідно, зони вивантаження матеріалу виключно переміщенням технологічної магістралі при стаціонарному розташуванні бункера і елементів приводу. Для збільшення довжини траси переміщення матеріалу в центральній частині конвеєра встановлюють перевантажувальний патрубок і вузли приводу робочих органів завантажувальної й розвантажувальної магістралей, що зображено на рис. 7.3. Це дозволяє суттєво зменшити крутильні навантаження на робочі органи в зоні їх кріплення до приводного вала.

Створення гнучких контейнерних ліній також є можливим з використанням трубчасто-скребкових (шайбових) конвеєрів [298–300], що транспортують легкі негорючі пористі матеріали складними трасами з вертикальними і горизонтальними ділянками на палаючу поверхню нафтопродуктів. На рис. 7.4 зображено робочий орган шайбового конвеєра італійської фірми «Falcon».

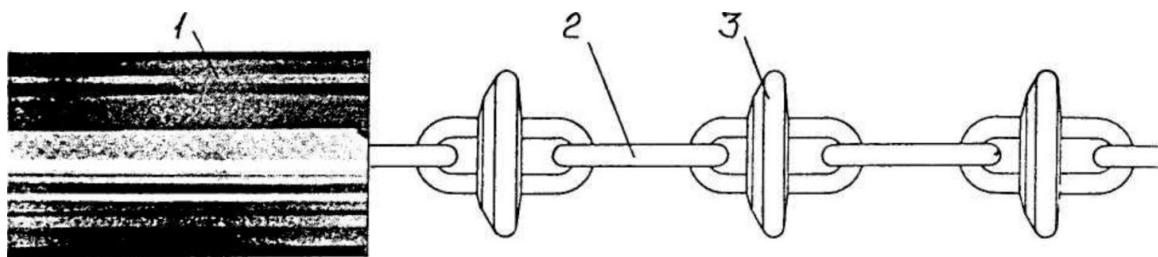


Рис. 7.4 – Робочий орган шайбового конвеєра

Такий робочий орган розташовується в напрямному кожусі 1 і складається з ланцюга 2 або троса, на якому закріплені шайби 3. Транспортер також містить приводну й натяжну станції та систему труб.

Незважаючи на те, що зазначений тип транспортера може переміщувати матеріал криволінійними трасами; сама траса може бути тільки стаціонарною, й довжина робочого органу у два рази більше від несучої, що значно знижує функціональні можливості транспортера такого типу.

Загальним суттєвим недоліком усіх механічних шнекових конвеєрів, у тому числі трубчасто-скребкових та гнучких гвинтових, є обмежена мобільність їх технологічних магістралей, що накладає значні обмеження на використання даних конвеєрів у разі створення нових способів пожежогасіння з використанням гранул легких негорючих пористих матеріалів як сучасних вогнегасних речовин. Переважна більшість зазначених конвеєрів відноситься до стаціонарних або обмежено-рухомих, в той час як оперативно-тактична обстановка в умовах надзвичайної ситуації вимагає застосування більш мобільної техніки, тому для організації ефективного подавання легких негорючих пористих матеріалів до осередку пожежі необхідно застосовувати технологічні схеми з високою мобільністю устаткування та технологічного процесу.

З урахуванням цілей і завдань процесу пожежогасіння резервуарів, найбільш доцільним та технічно обґрунтованим способом транспортування легких негорючих пористих матеріалів на поверхню палаючих ГР є використання пневматичних транспортних установок. Вказані установки характеризуються високими маневреними можливостями, які дозволяють вільно змінювати траєкторію переміщення матеріалів під час ліквідації пожеж нафтопродуктів. Процес транспортування є герметичним, пневматичні транспортери прості за будовою і мають високу продуктивність.

Промисловою практикою підтверджено ефективність застосування саме цього виду транспорту (трубопровідний пневматичний транспорт становить 30 % обсягу всіх промислових транспортних робіт) [301–303].

Залежно від способу створення повітряного потоку й умов його руху в трубопроводі разом із матеріалом, розрізняють такі основні системи пневмотранспортних установок (рис. 7.5): всмоктувальні, нагнітальні й комбіновані (всмоктувально-нагнітальні) [304-305].

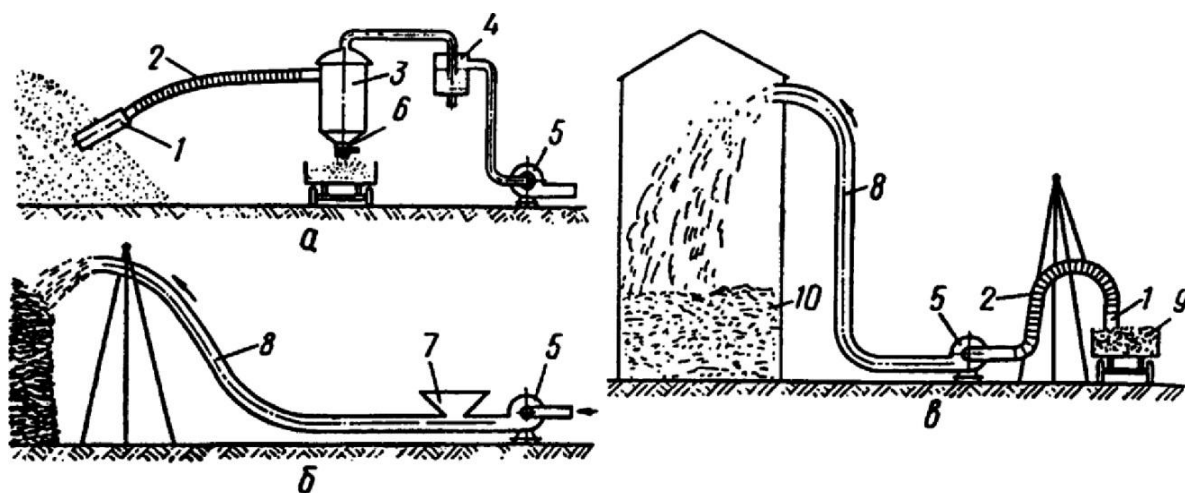


Рис. 7.5 – Технологічні схеми пневматичних установок:

а) всмоктувальний; б) нагнітальний; в) комбіновані;

1 – сопло; 2 – всмоктувальна магістраль; 3 – циклон; 4 – фільтр; 5 – вентилятор; 6 – затвор;
7 – бункер; 8 – вивантажувальна магістраль; 9 – причіп; 10 – сховище

Всмоктувальні транспортери застосовують для розвантаження сипких матеріалів із вагонів і автомашин зі спеціальним соплом на забірному кінці. Нагнітальні транспортери призначені для транспортування матеріалу на значні відстані. Матеріал подається через завантажувальний бункер у трубопровод і розвантажується шляхом відділення від основного матеріалу, за допомогою циклона або спеціального розвантажувача [305–307].

У змішаній установці транспортований матеріал засмоктується у матеріалопровід за рахунок розрідження та подається спочатку до вентилятора, а після його проходження транспортується матеріалопроводами за схемою нагнітального пневмотранспортера.

Надзвичайно висока надійність та мобільність пневматичних транспортних установок дозволила суттєво розширити їх функціональні можливості та створити їх різні модифікації, що ефективно використовуються навіть у польових умовах [308]. У випадку використання пневматичних транспортних установок переміщення сипких матеріалів у трубопроводі здійснюється різними способами [305, 307–310]:

1) шляхом перенесення твердих частинок матеріалу оточуючим їх повітрям або гасом (або шляхом витиснення повітрям скупчень матеріалу);

2) шляхом надання матеріалу текучості за рахунок аерації (насичення повітрям).

За величиною створюваної різниці тисків пневматичні транспортні установки можна поділити на:

1) установки низького тиску (до 100 кПа): струменеві апарати, установки всмоктувальної дії, шлюзові живильники та аерожолоби;

2) установки середнього тиску (100÷300) кПа – пневмогвинтові насоси;

3) установки високонапірного імпульсного транспортування – камерні живильники (тиск вище 300 кПа).

Для виявлення найбільш ефективного способу подавання легких негорючих пористих матеріалів (ЛНПМ) на палаючу поверхню нафтопродукту в умовах пожежогасіння був проведений аналіз різних типів пневматичних транспортних установок, а саме: аерожолобів, струменевих насосів, установок всмоктувальної дії, шлюзових насосів, пневмогвинтових насосів та пневматичних камерних насосів.

Аналіз доцільності використання транспортних аерожолобів як технічних засобів подавання ЛНПМ для цілей пожежогасіння показав, що зазначені установки відносяться до установок нагнітальної дії з низьким тиском, що транспортує матеріал в умовах щільної фази [301–303]. Вони набули широкого розповсюдження для транспортування з невеликим ухилом сухих дрібних матеріалів. Технічна продуктивність транспортних аерожолобів варіюється в діапазоні (25÷165) т/год, дальність транспортування – від 10 до 40 м.

Суттєвими недоліками даного типу установок, що накладають організаційно-технічні обмеження у випадку їх використання для цілей пожежогасіння, є гравітаційний спосіб транспортування, що потребує обов'язкового розміщення технологічних ліній під кутом, та вкрай обмежена мобільність технологічних ліній.

Аналіз доцільності використання пневморозвантажувачів усмоктувальної дії показав, що вказаних установках може використовуватися низький (до 90 кПа), середній (до 70 кПа) і високий (до 40 кПа) вакуум. Зазначені установки набули широкого поширення при розвантаженні сипких матеріалів із критих залізничних вагонів [301–306].

Суттєвими недоліками цього типу установок, що накладають організаційно-технічні обмеження в разі їх використання для цілей пожежогасіння, є надзвичайна складність розвантаження ЛНПМ над поверхнею палаючого нафтопродукту, зумовлена необхідністю застосування спеціальних розвантажувачів або відділювачів-циклонів.

Аналіз доцільності використання шлюзових технічних засобів подавання ЛНПМ для цілей пожежогасіння показав, що зазначені установки працюють за робочого тиску до 0,25 МПа та забезпечують дальність подавання до 100 м [304–306]. Найбільшого поширення вони набули при переміщенні пилоподібних і дрібнозернистих малоабразивних і неліпких матеріалів, таких як мука, зерно, подрібнена деревина та ін.

Суттєвими недоліками вказаного типу установок, що накладають організаційно-технічні обмеження в разі їх використання для цілей пожежогасіння, є значні технічні складнощі ущільнення між обертовим ротором і нерухомими деталями (корпус і торцеві кришки); при цьому неминучі мимовільні витікання стисненого повітря, які коливаються від 0,5 до 2 м³/хв залежно від надлишкового тиску в аерокамері. Внаслідок цього виключена можливість його роботи з абразивними матеріалами, особливо за високого тиску в аерокамері.

Аналіз доцільності використання пневматичних гвинтових технічних засобів подавання ЛНПМ для цілей пожежогасіння показав, що зазначені установки призначені для транспортування сипких матеріалів тонкого помолу на відстань більше 500 м трубопроводами довільної конфігурації, включаючи вертикальні, горизонтальні й похилі ділянки [304–309].

Завдяки компактності своєї конструкції, технічній можливості роботи за середнього і низького тиску з безперервним транспортуванням без пульсацій та можливості часткової продуктивності, пневматичні гвинтові насоси набули широкого поширення в будівельній галузі (виробництво силікатних та залізобетонних матеріалів), хімічній та металургійній промисловості.

Суттєвими недоліками вказаного типу установок, що накладають організаційно-технічні обмеження у разі їх використання для цілей пожежогасіння, є абразивне зношування шнека і гільзи, внаслідок чого виключена можливість його роботи з абразивними матеріалами.

Аналіз доцільності використання пневматичних камерних технічних засобів подавання ЛНПМ для цілей пожежогасіння показав, що вказані установки являють собою один або кілька судин, обладнаних завантажувальним патрубком із клапаном, що щільно закривається та герметизує ємність насоса після завантаження. Після наповнення матеріалом, що транспортується, розвантажувальний пристрій здійснює інтенсивне повітряне розпушування та видачу аерованого матеріалу у транспортний трубопровід. Зазначені насоси

широко використовуються у промисловості будматеріалів, хімічній, енергетичній, чорній і кольоровій металургії та багатьох інших галузях для транспортування цементу, глинозему, вугільного пилу, золи, формувальних сумішей, колосникового пилу доменних печей, апатитового концентрату, фосфоритного борошна і т.п. [304–306, 310].

Суттєвими недоліками зазначеного типу установок, що накладають організаційно-технічні обмеження у разі їх використання для цілей пожежогасіння, є періодичність дії, значні масо-габаритні розміри, переривчастий (пульсуючий) потік матеріалу, що транспортується, необхідність дотримання вимог промислової безпеки до ємностей, що працюють під тиском, необхідність створення стовпа матеріалу для швидкого гравітаційного заповнення камери та значна витрата стисненого повітря.

Аналіз доцільності використання струменевих технічних засобів подавання ЛНПМ для цілей пожежогасіння виявив широку застосовність даного типу установок пневмотранспорту майже в усіх галузях промисловості. Наприклад, у сільськогосподарському виробництві струменеві насоси використовуються для транспортування зерна, борошна, крупи та інших продуктів, у будівельній галузі для транспортування цементу, у промисловій енергетиці для транспортування вугільного пилу та золи [303–305, 311–313]. Позитивними властивостями вказаного типу установок пневмотранспорту є компактні габаритні розміри, низькі витрати на технічне обслуговування, висока надійність та довговічність, внаслідок відсутності рухомих елементів і простоти конструкції, а також безперервний режим роботи.

Як недоліки використання струменевих насосів як технічних засобів подавання ЛНПМ для цілей пожежогасіння слід відзначити відносно невелику відстань ефективного подавання матеріалу до 150 м та високе споживання стисненого повітря, що не є суттєвим та не матиме впливу на ефективність пожежогасіння ГР.

Виходячи з умов проведення пожежогасіння легкозаймистих речовин, використання струменевих ежекційних апаратів є найбільш ефективним способом подавання гранул ЛНПМ на палаючу поверхню ГР в умовах пожежогасіння, що зумовлено їх високою надійністю та безперервним режимом роботи, тому в подальших дослідженнях із розробки технічних засобів та способів подавання гранул ЛНПМ на поверхню палаючої ГР доцільно використовувати саме пневмoeжекційний спосіб транспортування.

7.2 Розробка технічних засобів та способу подавання гранул легких негорючих пористих матеріалів на поверхню палаючої рідини

На підставі проведеного аналізу літературних даних [314–317] та виходячи із завдань, поставлених перед ежекційним апаратом подачі легких негорючих пористих матеріалів (ЕА), умов проведення пожежогасіння ГР із використанням ПС і гелеутворюючих систем (ГУС) та теорії ежекційних апаратів, необхідно обґрунтувати конструкцію та створити методику розрахунку конструктивно-

технологічних параметрів ЕА, що задовольняють наступним вимогам:

- безперервність дії може бути досягнута шляхом введення вузла живлення, дозування, ворошіння піноскла у вигляді гвинтової поверхні (шнека);
- забезпечення ефективної подачі піноскла з використанням стисненого повітря гумотканинними рукавами – матеріалопроводами на відстань до 75 м, необхідно для забезпечення ефективної подачі та багатошарового нанесення піноскла на поверхню ГР, що горить, причому пожежогасіння може здійснюватися на висоті з використанням спецтехніки (автодрабин, колінчастих підйомників); залежно від розміру фракцій піноскла внутрішній діаметр матеріалопровіда може бути прийнятий від 38 до 68 мм;
- малогабаритність необхідна для зручності розміщення, перевезення, швидкого оперативного розгортання та ефективного використання за мінімального числа задіяних пожежних-рятувальників.

Відповідно до вищевикладеного пропонується конструкція ЕА, основними елементами якого будуть (рис. 7.6): видатковий бункер; порожнистий шнековий дозатор-живильник; робоче сопло шнекового дозатора-живильника; приводна частина шнекового дозатора-живильника; ворошитель-живильник пружинного типу; конфузор; камера змішування (розгінна трубка); дифузор; фланець підключення рукавної лінії матеріалопроводу.

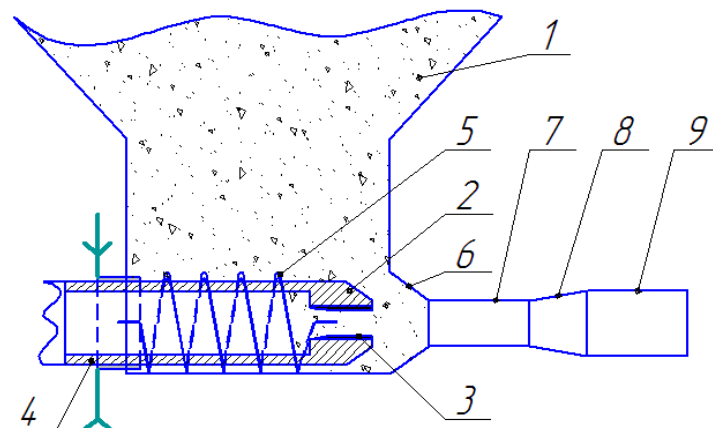


Рис. 7.6 – Схема ежекційної установки: 1 – видатковий бункер піноскла;

2 – порожнистий шнековий дозатор-живильник; 3 – робоче сопло шнекового дозатора-живильника; 4 – приводна частина шнекового дозатора-живильника; 5 – ворошитель-живильник пружинного типу; 6 – конфузор; 7 – камера змішування (розгінна трубка); 8 – дифузор; 9 – фланець підключення рукавної лінії матеріалопроводу

Безпосередня робота ЕА запропонованої конструкції полягає в наступному: у видатковий бункер завантажується ЛНПМ, наприклад, гранульоване піноскло. Подачу гранульованого піноскла з видаткового бункера до конфузора здійснює шнековий дозатор-живильник, який здійснює осьове обертання за допомогою пневматичного двигуна, з'єданого з понижувальною механічною передачею, що діє на приводну частину шнекового дозатора-

живильника; при цьому приводна частина шнекового дозатора-живильника жорстко пов'язана з ворошителем-живильником пружинного типу.

Подача стисненого повітря з тиском приблизно 0,5 МПа здійснюється пневматичним компресором через порожнистий шнековий дозатор-живильник в ежекційну змішувальну камеру; при цьому гранули піноскла приводяться у зважений стан ворошителем-живильником та направляються до конфузора. Завдяки наявності розрідження в конфузорі, гранули піноскла засмоктуються у змішувальну камеру і далі транспортуються матеріалопроводом та подаються до зони горіння. Необхідно враховувати, що на стійкий режим роботи ЕА значний вплив справляє фракційний склад. Згідно із працями [316–317] продуктивність пневмоекційної системи залежить від пропускної спроможності перерізу матеріалопроводу, оптимальні значення якого наведено в роботі [318]. З оперативних міркувань доцільно використовувати в якості матеріалопроводів пожежні рукави стандартних розмірів, за умови забезпечення високої продуктивності та дальності транспортування і подачі ЛНПМ.

Ефективність роботи ЕА буде залежати від фізико-механічних властивостей піноскла і умов його подачі, які, у свою чергу, залежать від конструктивних параметрів вузлів машини. Тому при проектуванні ЕА, поряд із визначенням типу енергоносія, необхідно розраховувати конструктивні й режимні параметри ЕА.

В роботах [313–317, 319–327], присвячених систематизації методів розрахунку струменевих апаратів, наведено отримання залежностей для визначення основних розмірів струменевих апаратів за заданих розрахункових умовах. У більшості опублікованих робіт розглядаються потоки, що змішуються в апаратах, які перебувають в одній і тій же фазі, та значно менше робіт присвячено дослідженням потоків, що змішуються в різних фазах, наприклад, «стиснене повітря–тверде тіло» під час транспортування матеріальними трубопроводами на деяку дальність.

В роботах [323–329] проведено теоретичні та експериментальні дослідження більшості типів пневмоекційних апаратів, що застосовуються на практиці, а також наводяться методики виведення залежностей для визначення їх робочих характеристик та розрахунку основних розмірів. Дослідження показали, що розрахунок пневмоекційних струменевих апаратів із циліндричною камерою змішування, що працюють із потоками речовин в одній фазі, можна повністю базувати на теоретичних рівняннях, де експериментальними величинами є коефіцієнти швидкості проточної частини. Для розрахунку апаратів з різним агрегатним станом робочого потоку та потоку, що ежектуються, необхідно використовувати рівняння, частково побудовані на емпіричних залежностях.

Для проведення натурних випробувань технології гасіння гарячих резервуарів ЛЗР із використанням ГУС необхідно створити масштабну експериментальну модель ЕА. Для цього потрібно провести розрахунок наступних конструктивних параметрів ЕА: об'ємна та вагова витрати енергоносія, діаметр робочого сопла подачі енергоносія в ежектор, діаметр камери змішування, довжина вільного струменя, від зрізу сопла до початку камери змішуван-

ня, а також провести розрахунок гвинтового шнекового механізму подачі частинок ЛНПМ.

Методику розрахунку конструктивних параметрів ЕА доцільно розробляти, спираючись на розрахунок конструктивних параметрів струменевих апаратів, запропонованих основоположниками теорій ежекційної подачі сипких матеріалів професорами А.Я. Мілевичем, Г.Н. Абрамовичем, Б.Е. Фрідманом, В.І. Акуновим та ін. Вихідними умовами та даними для розрахунку ЕА будуть:

– необхідна продуктивність ЕА (Π_M), за умов проведення пожежогасіння палаючих ГР, подачі піноскла повинна складати $10 \text{ м}^3/\text{хв.}$, з урахуванням того, що доцільно створити на палаючій поверхні ГР шар піноскла завтовшки від 30 мм до 180 мм, за середньої площі «дзеркала» ЛЗР $400,1 \text{ м}^2$ (в якості середнього значення площі «дзеркала» ЛЗР взято резервуар РВС-5000);

– параметри енергоносія, за який взято стиснуте атмосферне повітря.

На підставі проведеного аналізу робіт [315, 316, 323–327] можна запропонувати наступний порядок проведення розрахунку параметрів енергоносія, для використання в роботі ЕА.

Об'ємна витрата енергоносія:

$$Q = 1,88 \cdot \Pi_0, \quad (7.1)$$

де Π_0 – об'ємна продуктивність подачі сухого матеріалу, $\text{м}^3/\text{хв.}$; 1,88 – емпіричний коефіцієнт.

Вагова витрата енергоносія:

$$G_B = 1,45 \cdot \Pi_B, \quad (7.2)$$

де Π_B – вагова подача сухого матеріалу, $\text{кг}/\text{хв.}$; 1,45 – емпіричний коефіцієнт.
Діаметр робочого сопла подачі енергоносія в ежектор [327]:

$$d_c = 0,475 \sqrt{G_B}, \quad (7.3)$$

де G_B – вагова витрата енергоносія; 0,475 – емпіричний коефіцієнт.
Діаметр камери змішування:

$$d_{KC} = 1,62 \sqrt{\Pi_M}, \quad (7.4)$$

де Π_M – продуктивність ЕА; 1,62 – емпіричний коефіцієнт.
Довжина камери змішування за Б.Е. Фрідманом і В.І. Акуновим:

$$L_{KC} = d_c, \\ L_{KC} = 122 + 2,36 \cdot (d_{KC} - d_c), \quad (7.5)$$

де L_{KC} – довжина камери змішування; d_c – діаметр робочого сопла; d_{KC} – діаметр камери змішування; 122 і 2,36 – емпіричні коефіцієнти.

Довжина вільного струменя, від зрізаного сопла до початку камери змішування, згідно з А.Я. Мілевичем дорівнює:

$$A = 6 \cdot d_c, \quad (7.6)$$

де d_c – діаметр робочого сопла; 6 – емпіричний коефіцієнт.

Довжина циліндричної частини камери змішування:

$$L_{\text{цс}} = (5 \div 6) \cdot d_c. \quad (7.7)$$

Напівкут розльоту повітряного струменя з робочого сопла шнекового дозатора-живильника матиме вигляд:

$$\alpha = K \cdot \left(1 \pm \frac{d_c}{V}\right), \quad (7.8)$$

де V – швидкість повітряного потоку; K – коефіцієнт, що залежить від конструктивно-геометричних параметрів сопла: у разі витікання із сопла симетричного циліндричного струменя $K = 0,9$; у разі витікання із сопла несиметричного струменя $K = 0,8$; у разі витікання із сопла конічного симетричного струменя $K = 1,4$.

Довжина початкової ділянки (потенційного ядра) вільного струменя, згідно з розрахунками, дорівнює:

$$l_{\text{н}} = \frac{d_c}{2 \operatorname{tg} \alpha_1} \approx (1 \div 1,5) d_c, \quad (7.9)$$

де α – напівкут розльоту повітряного струменя з робочого сопла шнекового дозатора-живильника.

Конструктивна вимога безперервності дії ЕА може бути досягнута у разі використання шнекового механізму, який здійснює безперервне транспортування фракцій ЛНПМ, наприклад піноскла, в повітряну камеру змішування і при цьому відділяє зону високого тиску від атмосферного, що утворює перепад тиску між системою живлення і транспортування.

У запропонованій конструкції ЕА, фракції піноскла виходять із корпусу циліндричного шнека скомпонованими у циліндричну форму, яку необхідно розпушити та привести у зважений стан, що сприятиме ежектуванню та подальшому транспортуванню суміші гранул піноскла матеріалопроводами. Протитиск стисненого повітря в камері змішування забезпечується «пробковим» механізмом, який відділяє зону високого тиску від атмосферного. Такий процес докладно описаний в роботах Бикова П.М. та інших дослідників [331–333].

У класичній конструкції ежекційного апарата, як такого «пробкового» механізму не існує, тому для організації транспортування піноскла на необхідну

дальність можливим технологічним рішенням є організація роботи ежекційного вузла під тиском додатково підведеного стисненого повітря [316–317].

Реалізація вказаної конструкційної схеми у значній мірі ускладнить оперативно-тактичні умови проведення пожежогасіння та конструкцію ЕА, за рахунок наявності закритого бункера піноскла, що, у свою чергу, не забезпечує безперервності його дії. Розглянуте технічне рішення також не може бути виправданим, тому що при транспортних матеріальних трубопроводах діаметром (38÷58) мм досягти дальності подачі піноскла більше 15 м практично неможливо за тиску стисненого повітря (0,3÷0,5) МПа. Тому для транспортування сухої суміші ЛНПМ з об'ємною щільністю від 400 до 600 кг/м³ і менше найбільш раціональним технічним рішенням є розміщення в ежекційній камері ЕА спеціального ворошителя-живильника, що приводить фракції піноскла у зважений стан і сприяє їх подаванню (транспортуванню) до зони розрідження.

Важливою умовою максимально ефективної роботи ЕА є узгодження роботи механічного ворошителя-живильника з ежектором за параметрами продуктивності; в іншому випадку можливе запирання ежектора надлишковою кількістю піноскла або неефективна робота ЕА з недовантаження. Для цього розглянемо методику розрахунку гвинтового шнекового механізму ЕА.

Методику розрахунку конструктивних параметрів ворошителя-живильника пружинного типу ЕА доцільно базувати на відомих методах розрахунку гвинтових шнекових механізмів. Так, у роботі [318] наводиться теоретично обґрунтована методика розрахунку потужності, споживаної гвинтовим конвеєром. Зазначена методика ґрунтується на залежностях, отриманих при розгляді руху матеріальної частинки, що спирається на гвинтову поверхню і притиснута до стінки зовнішнього кожуха. Розглядається загальний випадок – розташування осі гвинтового конвеєра під кутом до горизонту [319–321]. Дана теорія розрахунку гвинтового шнекового механізму розглядається стосовно конструкції гвинтового конвеєра з нерухомим кожухом і рухомою гвинтовою поверхнею. Автором отримано систему диференціальних рівнянь, яка описує нерівномірний рух зі змінною кутковою швидкістю руху частинки відносно гвинтової поверхні.

$$\left\{ \begin{array}{l} N_b \cos \alpha - f_b N_b \sin \alpha - ma \left(\frac{d^2 \varphi r}{dt^2} \right) - mg \cos \gamma - f_k N_k \sin \beta = 0 \\ mg \cos \gamma \sin \varepsilon + f_k N_k \cos \beta - f_b N_b \cos \alpha - N_b \sin \alpha - mR \left(\frac{d^2 \varphi r}{dt^2} \right) = 0 \\ mg \cos \gamma \cos \varepsilon + mR w_0^2 + mR \left(\frac{d\varphi r}{dt} \right)^2 - N_k - 2mR w_0 \left(\frac{d\varphi r}{dt} \right) = 0 \end{array} \right. \quad (7.10)$$

де N_b , N_k – нормальні реакції гвинтової поверхні q кожуха відповідно; f_b , f_k – коефіцієнти тертя сухої суміші об гвинтову та внутрішню поверхні камери змішування відповідно; R – зовнішній радіус гвинтової поверхні, м;

w_0 – кутова швидкість обертання гвинтової поверхні, рад/с; m – маса матеріальної частинки, кг; $\alpha = \text{arctg} \frac{S}{2\pi r}$ – кут підйому гвинтової лінії за радіусом r , град; S – крок гвинтової поверхні, м; φr – кут проковзування (кут, на який відхиляється матеріальна частинка відносно гвинтової поверхні під час обертання з постійною швидкістю w_0), град; ε – кут, що визначає положення частинки відносно вертикальної площини, град; γ – кут нахилу осі вала конвеєра до вертикалі, град; $a = R \cdot \text{tg} \alpha$ – параметр конвеєра, град; β – кут між векторами переносної й абсолютної швидкостей, град.

Розв'язок даної системи диференціальних рівнянь у загальному вигляді не може бути знайдено. На підставі наведених розрахунків, здійснених чисельними методами, несталый рух у конвеєрі (зі змінною кутовою швидкістю абсолютного руху) є короткочасним. Вже через кілька секунд рух стає стійким, з постійними значеннями середньої осьової швидкості й абсолютної кутової швидкості обертального руху. При цьому кутова швидкість відносного руху матеріальної частинки визначається виразом:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\varphi_0 \cos \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} = \text{const}, \quad (7.11)$$

де α – кут підйому гвинтової лінії за радіусом r , град; β – кут між векторами переносної та абсолютної швидкостей, град.

Із системи диференціальних рівнянь випливає, що нормальні реакції гвинтової поверхні N_b та N_k кожуха є рівними:

$$N_b = \frac{mg(\sin \gamma \sin \varepsilon \sin \beta - \cos \gamma \cos \beta)}{f_b \sin(\alpha + \beta) - \cos(\alpha + \beta)}, \quad (7.12)$$

$$N_k = \frac{mg(\sin \gamma \sin \varepsilon \sin \beta - \cos \gamma \cos \beta) (\cos \alpha - f_b \cos \alpha)}{f_k \sin \beta (f_b \sin(\alpha + \beta) - \cos(\alpha + \beta))} - \frac{mg \cos \gamma}{f_2 \sin \beta}, \quad (7.13)$$

де f_b, f_k – коефіцієнти тертя сухої суміші об гвинтову поверхню шнека та, відповідно, внутрішню поверхню камери змішання; m – маса матеріальної частинки, кг; $\alpha = \text{arctg} \frac{S}{2\pi r}$ – кут підйому гвинтової лінії по радіусу r , град; ε – кут, що визначає положення частинки відносно вертикальної площини, град; γ – кут нахилу осі вала конвеєра до вертикалі, град; $a = R \cdot \text{tg} \alpha$ – параметр конвеєра, град; β – кут між векторами переносної й абсолютної швидкостей, град.

Представлені залежності відповідають горизонтальному положенню конвеєра при $\gamma = 90^\circ$.

Відповідно до теорії шнекових механізмів та методики розрахунку потужності гвинтового шнекового механізму, що витрачається на переміщення сухої суміші, запропонованої професором Григор'євим А.М., сумарну потужність гвинтового шнекового механізму ЕА можна визначити наступним виразом:

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \quad (7.14)$$

де P_1 – потужність, необхідна на подолання сил інерції, що виникають за зміни швидкості руху сухої суміші від 0 до V_a (абсолютна швидкість руху сухої суміші, м/с); P_2 – потужність, необхідна на подолання сил тертя сухої суміші внутрішньою поверхнею камери змішування; P_3 – потужність, необхідна на переміщення ЛНПМ уздовж осі гвинтового шнека і подолання сил тертя гвинтовою поверхнею.

Складові визначаються виразами:

$$P_1 = \frac{QV_a^2}{270g}, \quad (7.15)$$

де Q – продуктивність конвеєра, т/г; V_a – абсолютна швидкість руху сухої суміші, м/с;

$$P_2 = \frac{f_k N_k V_a}{75}, \quad (7.16)$$

де f_k – коефіцієнти тертя сухої суміші внутрішньою поверхнею камери змішування; N_k – нормальна реакція поверхні кожуха; V_a – абсолютна швидкість руху сухої суміші, м/с;

$$P_3 = \frac{F_{\text{цд}} D_{\text{цд}} (w_0 - w_2)}{150} + \frac{F_0 D_{\text{цд}} (w_0 - w_2)}{150}, \quad (7.17)$$

де $F_{\text{цд}} = mg \sin \delta \operatorname{tg}(\alpha_0 + \varphi_1)$ – рушійна сила, дотична до кола, що проходить через центр тиску вантажу на гвинтову поверхню, Н; $F_0 = N_k \sin \theta \operatorname{tg}(\alpha_0 + \varphi_1)$ – окружна сила на зовнішній кромці гвинта, Н; $w_2 = 2V_2/D$ – кутова швидкість руху вантажу, рад/с; $D_{\text{цд}} = (0,7 \div 0,8)D$ – діаметр окружності, що проходить через центр тиску вантажу на гвинтову поверхню шнека, м, де D – зовнішній діаметр гвинтової поверхні, м; m – маса вантажу, що знаходиться в кожусі конвеєра, кг; δ – кут нахилу осі конвеєра до горизонту, град; f_2 – коефіцієнт тертя.

Кут підйому гвинтової лінії, що проходить через центр тиску вантажу на гвинтову поверхню шнека ($\alpha_{\text{цд}}$), і кут тертя вантажу об поверхню шнека (φ_b) можна встановити за такими залежностями:

$$\alpha_{\text{цд}} = \operatorname{arctg} \frac{S}{\pi D_{\text{цд}}}, \quad (7.18)$$

$$\varphi_b = \operatorname{arctg} f_b. \quad (7.19)$$

Таким чином, базуючись на існуючих методиках розрахунку гвинтового шнекового механізму, можна запропонувати наступну залежність для розрахунку конструктивних параметрів ворошителя-живильника пружинного типу ЕА.

Потужність на валу гвинтового ворошителя-живильника:

$$P = \frac{Q_{BK}}{367} \cdot (LW + H), \text{ кВт}, \quad (7.20)$$

де Q_{BK} – продуктивність гвинтового конвеєра, т/г; L – довжина транспортування, м; W – коефіцієнт опору руху, м; H – висота підйому вантажу, м.

Значення коефіцієнта W рекомендується приймати в межах від 1,5 до 4. Значення $W = 4$ слід приймати для важких абразивних матеріалів, таких як цемент, гіпс, шамот, вапно, пісок; для піноскла значення $W = 1 \div 1,5$.

Створена автором методика розрахунку ЕА дозволяє визначити його наступні конструктивно-технологічні параметри: об'ємну витрату енергоносія; вагову витрату енергоносія; діаметр робочого сопла подавання енергоносія в ежектор; діаметр камери змішування; довжину вільного струменя, від зрізаного сопла до початку камери змішування; параметри гвинтового шнекового механізму. При цьому, для виготовлення та доведення експериментально-дослідного зразка, необхідно також розробити методику та провести розрахунок геометричних параметрів ежекційного вузла ЕА.

З урахуванням номінального режиму роботи і специфіки конструкції ЕА, що розробляється, за робочим соплом відбувається розширення робочого потоку (енергоносія) від тиску робочого потоку P_p до тиску потоку, що ежектуються P_H у приймальній камері. З урахуванням специфіки застосування, конструкція ЕА передбачає малорозмірну дифузорну частину, тому площу перерізу вхідного сопла (F_p) можна визначити за швидкістю у трубопроводі:

$$F_p = \frac{G_p \cdot v_p}{V_p}, \quad (7.21)$$

де v_p – питомий об'єм стиснутого повітря; V_p – початкова швидкість робочого потоку; G_p – масова витрата робочого потоку через сопло, кг/с.

Визначити площу критичного перерізу сопла ЕА (F_{PK}) доцільно з рівняння витрати:

$$F_{PK} = \frac{G_p}{\rho_{PK} \cdot V_{PK}} = \frac{G_p \cdot V_{PK}}{\kappa_p \cdot \Pi_{PK} \cdot P_p}, \quad (7.22)$$

де G_p – масова витрата робочого потоку через сопло, кг/с; ρ_{PK} – щільність робочого потоку; V_{PK} – критична швидкість робочого потоку, м/с; P_p – тиск

робочого потоку; P_{PK} – відносний тиск робочого потоку в критичному перерізі; κ_P – показник адіабати робочого потоку.

Розмір вихідного перерізу робочого сопла (F_{P1}) найбільш доцільно буде визначити через критичний переріз:

$$F_{P1} = \frac{F_{PK}}{q_{P1}}, \quad (7.23)$$

де F_{PK} – площа перерізу робочого потоку в критичному перерізі; q_{P1} – приведена масова швидкість потоку за відносного тиску на зрізі робочого сопла.

Вихідний переріз камери змішування (F_3) визначаємо через критичний переріз стиснутого потоку:

$$F_3 = \frac{F_{CK}}{q_{P3}}, \quad (7.24)$$

де F_{CK} – площа перерізу камери змішування; q_{P3} – приведена масова швидкість потоку за відносного тиску на зрізі камери змішування.

Площа поперечного перерізу камери змішування (F_{CK}) дорівнює

$$F_{CK} = \frac{G_C \cdot V_{CK}}{\kappa_C \cdot \Pi_C \cdot P_C} = \frac{G_P \cdot (1 + u_T) \cdot V_{CK}}{\kappa_C \cdot \Pi_C \cdot P_C}, \quad (7.25)$$

де G_C – масова витрата змішаного потоку, кг/с; V_{CK} – критична швидкість стиснутого потоку, м/с; G_P – масова витрата робочого потоку через сопло, кг/с; κ_C – показник адіабати стиснутого потоку; Π_C – відносний тиск у камері змішування; P_C – тиск змішаного потоку; u_T – коефіцієнт ежекції твердого тіла.

Із наведених вище виразів (7.23) і (7.25) знаходимо наступну залежність:

$$\frac{F_3}{F_{PK}} = \frac{\kappa_P \cdot \Pi_P \cdot F_P \cdot V_{CK}}{\kappa_C \cdot \Pi_{CK} \cdot P_C \cdot q_{C3} \cdot V_{PK}} \cdot (1 + u_T), \quad (7.26)$$

де F_3 – вихідний переріз камери змішування; F_{PK} – площа перерізу робочого потоку у критичному перерізі; κ_P – показник адіабати робочого потоку; Π_P – відносний тиск робочого потоку; κ_C – показник адіабати стиснутого потоку; Π_{CK} – відносний тиск стиснутого потоку в критичному перерізі; F_P – площа перерізу робочого потоку (площа вхідного перерізу сопла); V_{CK} – критична швидкість стиснутого потоку, м/с; V_{PK} – критична швидкість робочого потоку, м/с; P_C – тиск змішаного потоку; q_{C3} – приведена масова швидкість потоку за відносного тиску на зрізі камери змішування.

Якщо величину тиску змішаного потоку (P_C) прирівняти до величини тиску стиснутого потоку (P_3), то рівняння (7.26) набуде вигляду:

$$\frac{F_3}{F_{PK}} = \frac{\kappa_P \cdot \Pi_P \cdot F_P \cdot V_{CK}}{\kappa_C \cdot \Pi_C \cdot P_C \cdot V_{HK} \cdot V_{PK}} \cdot (1 + u_T), \quad (7.27)$$

де Π_C – відносний тиск в камері змішування; u_T – коефіцієнт ежекції твердого тіла; V_{HK} – критична швидкість ежектованого потоку, м/с.

Для циліндричної камери вхідний і вихідний поперечні перерізи камери змішування рівні, тому правомірні такі залежності площ потоків

$$\begin{aligned} F_{H2} &= F_3 - F_{P2} = F_3 - F_{P1}, \\ \frac{F_{H2}}{F_{P2}} &= \frac{F_{H2}}{F_{P1}} = \frac{F_3 - F_{P1}}{F_{P1}} = \frac{F_3}{F_{P1}} - 1, \\ \frac{F_{P2}}{F_3} &= \frac{F_{P1}}{F_3}, \\ \frac{F_{H2}}{F_3} &= \frac{F_3 - F_{P1}}{F_3} = 1 - \frac{F_{P1}}{F_3}, \\ \frac{F_{PK}}{F_{H2}} &= \frac{1}{F_3 / F_{PK} - F_{P1} / F_{PK}}, \end{aligned} \quad (7.28)$$

де F_{H2} – площа потоку, що ежектується в перерізі 2–2 м²; F_{P2} – площа робочого потоку в перерізі 2–2 м²; F_{P1} – площа робочого потоку в перерізі 1–1 м²; F_3 – площа змішаного потоку в перерізі 3–3 м².

Наведені залежності дозволяють розрахувати параметри ежектора ЕА в поперечному перерізі.

Теоретичним підґрунтям, використаним для визначення методики розрахунку довжини камери змішування ежектора, служить теорія вільного струменя, що протікає в безмежному просторі і стикається із середовищем, швидкість якого дорівнює нулю. Дана теорія розглянута в роботах [303–307].

Виходячи з теорії вільного струменя, значення відстані від зрізу сопла до камери змішування ЕА буде приблизно дорівнювати кінцевому перерізу вільного струменя, що, у свою чергу, буде дорівнювати вхідному перерізу камери змішування. Також при визначенні відстані від зрізу сопла до камери змішування ЕА враховувалася надкритична швидкість робочого струменя.

З огляду на те, що в даному випадку камера змішування, виходячи з конструктивних міркувань, має на початку та в кінці відповідно конфузорну і дифузорну частини з незначною конусністю, то робимо припущення і вважаємо камеру змішування циліндричною, тобто довжина ділянки змішування (l_C) дорівнює довжині ділянки розгону (l_P).

Для доведення дослідно-експериментального зразка та проведення випробувань ЕА необхідно досить обґрунтовано прийняти довжину камери

змішування, де б забезпечувалось у поперечному перерізі вирівнювання поля швидкостей до входу потоку суміші в матеріальний трубопровід. На основі викладеного вище довжина камери змішування визначається:

$$l_{\text{КС}} = l_{\text{С}} - l_{\text{Р}}. \quad (7.29)$$

Довжина ділянки змішування визначається залежністю:

$$l_{\text{С}} = \frac{R_{\text{Р}} - r_{\text{Р}}}{\text{tg}(\alpha / 2)}, \quad (7.30)$$

де $R_{\text{Р}}$, $r_{\text{Р}}$ – радіуси розгінної трубки та робочого сопла відповідно; α – кут між твірною факела струменя та віссю робочого потоку.

При витіканні із сопла в нерухомий потік, $\alpha = 23^\circ$ [300].

Довжина ділянки розгону розглядається як турбулентний газовий потік у трубі постійного перерізу. Враховуючи втрати на тертя об стінки розгінної камери відношення швидкісних втрат за її довжиною матиме вигляд [309]:

$$\frac{1}{\beta_1^2} - \frac{1}{\beta_2^2} - \ln \frac{\beta_2^2}{\beta_1^2} = \frac{2k}{k+1} f \frac{x_2}{d}, \quad (7.31)$$

де β_1 – значення коефіцієнта швидкості на початку труби при $x=0$; β_2 – значення коефіцієнта швидкості в довільному перерізі труби на відстані $x=x_2$ від початку; f – коефіцієнт тертя; d – діаметр труби.

Враховуючи значення коефіцієнтів ежекції при граничних режимах роботи ежекційних установок [300, 309, 311–313], рівняння (7.31) набуде вигляду:

$$\frac{1}{(\phi_1 \lambda_{\text{Р2}})^2} - \frac{1}{\lambda_{\text{С3}}^2} - \ln \frac{(\phi_1 \lambda_{\text{Р2}})^2}{\lambda_{\text{С3}}^2} = \frac{2k_{\text{С}}}{k_{\text{С}} + 1} f \frac{l_{\text{КС}}}{d_{\text{КС}}}, \quad (7.32)$$

де ϕ_1 – коефіцієнт втрати швидкості в перерізі зрізу сопла [310], $\phi_1 = 0,95$; $\lambda_{\text{Р2}}$ – наведена ізоентропна швидкість робочого потоку в перерізі 2–2; $\lambda_{\text{С3}}$ – наведена ізоентропна швидкість стисненого потоку в перерізі 3–3; $k_{\text{С}}$ – показник адиабати стисненого потоку; $d_{\text{КС}}$ – діаметр камери змішування; $l_{\text{КС}}$ – довжина камери змішування.

Відношення $l_{\text{КС}}/d_{\text{КС}}$ характеризує вирівнювання швидкості суміші під час руху перерізом камери змішування. Результати проведених експериментальних досліджень показали, що найбільш ефективні режими роботи ЕА будуть у разі співвідношення $l_{\text{КС}}/d_{\text{КС}} = 6 \div 10$.

В шорсткуватих трубах величина коефіцієнта тертя (f) для нестискуваного середовища, що транспортується за значних швидкостей потоку, не залежить від числа Рейнольдса та визначається за формулою:

$$f = \frac{1}{\left(1,74 + \lg \frac{1}{\xi}\right)^2}, \quad (7.33)$$

де $\xi = 2h/d_{\text{KC}}$ – відносна шорсткість внутрішньої поверхні камери змішування [311].

З рівняння (7.32) отримуємо вираз для довжини камери змішування:

$$l_{\text{KC}} = \frac{\frac{1}{(\phi_1 \lambda_{\text{p}2})^2} - \frac{1}{\lambda_{\text{c}3}^2} - \ln \frac{(\phi_1 \lambda_{\text{p}2})^2}{\lambda_{\text{c}3}^2}}{\frac{2k_{\text{c}}}{k_{\text{c}} + 1} f} \cdot d_{\text{KC}}. \quad (7.34)$$

де ϕ_1 – коефіцієнт втрати швидкості в перерізі зрізу сопла; $\lambda_{\text{p}2}$ – наведена ізоентропна швидкість робочого потоку в перерізі 2–2; $\lambda_{\text{c}3}$ – наведена ізоентропна швидкість стисненого потоку в перерізі 3–3; d_{KC} – діаметр камери змішування; k_{c} – показник адиабати стисненого потоку.

7.3 Розробка пневмоекційного пристрою подавання гранул піноскла на гасіння пожежі класу «В»

При розробці пневмоекційного пристрою подачі гранул піноскла на гасіння пожежі класу «В» були прийняті наступні вихідні параметри: дальність подачі при виході з магістрального матеріалопроводу – 75 м; витрата піноскла – 10 м³/хв.

З використанням розробленої методики розрахунку геометричних параметрів ежекційного вузла ЕА були розраховані конструктивні (об'ємно-геометричні) розміри ЕА:

- довжина робочого сопла подавання енергоносія – 120 мм;
- площа вхідного перерізу робочого сопла подавання енергоносія – 8167,14 мм² (внутрішній діаметр – 51 мм, зовнішній діаметр – 55 мм);
- площа вихідного перерізу робочого сопла подавання енергоносія – 1384,74 мм² (внутрішній діаметр – 21 мм, зовнішній діаметр – 25 мм);
- площа поперечного перерізу камери змішування відповідає площі вхідного перерізу камери змішування – 11683,94 мм² (внутрішній діаметр – 61 мм, зовнішній діаметр – 65 мм);
- довжина камери змішування – 320 мм;
- площа вихідного перерізу камери змішування – 13266,5 мм² (внутрішній діаметр – 65 мм, зовнішній діаметр – 69 мм).

Для забезпечення необхідної продуктивності подачі гранул піноскла, що складає 10 м³/хв, магістральними матеріалопроводами на розрахункову відстань 50 м, були встановлені необхідні технічні характеристики: витрата стисненого повітря – 3 м³/хв; тиск стисненого повітря – 0,3 МПа; частота обе-

ртання шнекового механізму подачі гранул піноскла – $2,7 \text{ с}^{-1}$.

Для апаратної реалізації технології подачі гранул піноскла з використанням ЕА із забезпеченням встановлених технічних параметрів необхідне використання наступного технологічного обладнання:

– повітряний компресор, наприклад, гвинтовий компресор ЗІФ-ПВЕ-4,8/0,7, що забезпечує максимальну продуктивність $4,6 \text{ м}^3/\text{хв}$, та максимальний тиск $0,9 \text{ МПа}$; максимальна потужність, що вимагається на привідному валу, становить 45 кВт ;

– ресивер стисненого повітря об'ємом не менше 200 л ;

– магістральна лінія подавання повітря від компресора до ЕАПП – армований повітряний шланг із внутрішнім діаметром 17 мм ;

– матеріалопровід – армований повітряний шланг із внутрішнім діаметром 50 мм , зовнішнім діаметром 64 мм та гладким внутрішнім шаром; необхідний температурний режим даного типу матеріалопроводу становить « -30 » – « $+80$ » $^{\circ}\text{C}$. Для точності і зручності подачі гранульованого піноскла, на вихідному кінці напірного матеріалопроводу доцільно встановити циліндричний патрубок із внутрішнім діаметром не менше 65 мм .

Для проведення експериментальних натурних досліджень повітряно-ежекційного способу подавання гранул легких негорючих пористих матеріалів на поверхню палаючого нафтопродукту була створена спрощена масштабна модель ЕА з такими вихідними параметрами: дальність подавання – 5 м ; витрата піноскла – $5 \text{ дм}^3/\text{хв}$.

Розраховані конструктивні (об'ємно-геометричні) розміри ЕА склали:

– довжина робочого сопла подавання енергоносія – 90 мм ;

– площа вхідного перерізу робочого сопла подавання енергоносія – $1133,54 \text{ мм}^2$ (внутрішній діаметр – 38 мм , зовнішній діаметр – 42 мм);

– площа вихідного перерізу робочого сопла подавання енергоносія – $153,86 \text{ мм}^2$ (внутрішній діаметр – 14 мм , зовнішній діаметр – 18 мм);

– площа поперечного перерізу камери змішування відповідає площі вхідного перерізу камери змішування – $1589,625 \text{ мм}^2$ (внутрішній діаметр – 45 мм , зовнішній діаметр – 49 мм);

– довжина камери змішування – 450 мм ;

– площа вихідного перерізу камери змішування – $1808,64 \text{ мм}^2$ (внутрішній діаметр – 48 мм , зовнішній діаметр – 52 мм).

На рис. 7.7 наведено зовнішній вигляд і внутрішню будову дослідно-експериментального зразка ЕА.

У процесі проведення експериментальних натурних досліджень було використано наступні технічні засоби та вимірювальне обладнання: масштабна модель ЕА; пневматичний електричний компресор, що забезпечує максимальну продуктивність $1,5 \text{ куб.м/хв}$ та максимальний тиск $0,9 \text{ МПа}$; ресивер стисненого повітря об'ємом 320 л – два взаємооб'єднаних ресивери ємністю 160 л кожен; магістральні лінії подавання стисненого повітря між компресором, ресиверами та ЕА – армований повітряний шланг із внутрішнім діаметром 17 мм ; гранульоване піноскло з діаметром гранул не більше 25 мм .



а)



б)

Рис. 7.7 – Зовнішній вигляд (а) і внутрішня будова (б) дослідно-експериментального зразка ЕА

На початку серії випробувань тиск у ресиверах стисненого повітря становив 0,85 МПа з подальшим зниженням під час роботи ЕА до 0,45 МПа. Регулювання витрати стисненого повітря, що подається з ресивера в магістральну лінію подавання ЕА, проводилось за допомогою шарового вентиля на ресивері. За допомогою манометра, вимірювались значення тиску в магістральній лінії подавання ЕА за різних параметрів витрати стисненого повітря.

У процесі проведення експериментальних натурних досліджень повітряно-ежекційного способу подачі гранул піноскла збільшення довжини камери змішування ЕА дозволило відмовитися від використання матеріалопроводу, тому дальність подачі гранул піноскла визначалась лінійно, в осьовому напрямку камери змішування ЕА від його вихідного зрізу.

7.4 Випробування пневмоежекційного пристрою подавання гранул піноскла на гасіння пожежі класу «В» малого розміру

Цей пристрій було спроектовано і виготовлено для експериментальної перевірки прийнятих під час його проектування технічних рішень. Також ЕА було використано для дослідження розподілу ПС поверхнею рідини. Нижче наведено експериментально отримані характеристики ЕА малого розміру.

Ствол ЕА розташовувався горизонтально на висоті 0,9 м над рівнем рідини. Дальність подавання ПС склала 4,6 м з розсіюванням уздовж осі ствола – 0,6 м та у боки – 0,4 м. Витрата ПС – 4,5 дм³/хв. Максимальна висота подачі ПС ~ 3,0 м (за умов кута нахилу 45°). Наведені дані, отримані експериментально, мають параметри близькі до тих, що закладені у вимогах до ЕА для подавання гранул ПС на гасіння пожежі класу «В» малого розміру.

За допомогою розробленого пневмоежекційного пристрою подачі гранул піноскла було проведено дослідження розподілу ПС поверхнею рідини. Попередні досліди з нанесення ПС на поверхню бензину і води показали, що грану-

ли ПС розподіляються поверхнею рідин рівномірно до утворення суцільного шару завтовшки в одну гранулу. Після утворення такого шару ПС, що подається, формує наступні шари. Причому наступні шари формуються тільки поблизу місця падіння гранул. Попередні досліди були проведені з використанням ємностей для рідин малого розміру. Діаметр їх становив 30 і 60 см. Подача ПС здійснювалася рівномірним висипанням його на поверхню рідин.

У разі виникнення реальних пожеж розміри резервуарів значно перевищують розміри ємностей, що використовувалися у проведених дослідах. Також відрізняється і спосіб подачі гранульованого матеріалу. Гранули піноскла передбачається подавати пневматично.

В умовах наближених до реальних були проведені дослідження на прямокутній ємності з водою, розміром $2,6 \times 4,6$ м; з товщиною шару води – 0,1 м (рис. 7.8).



Рис. 7.8 – Зовнішній вигляд ємності для дослідження розподілу гранул піноскла по поверхні рідини

Для подавання гранульованого матеріалу був використаний повітряний ежекційний апарат малого розміру, параметри якого наведено вище.

Результати візуальних спостережень подачі гранульованого піноскла на поверхню рідини і вимірювань параметрів отриманого шару дозволяють зробити наступні висновки щодо покриття поверхні:

- на початковому етапі подавання ПС на поверхню рідини воно розподіляється в один шар гранул поверхнею, обмеженою стінками резервуара;
- на другому етапі гранули піноскла в місці їх падіння формують другий і наступні шари;
- в ході подачі піноскла сформувався його шар висотою ($5 \div 10$) см над рівнем на ділянці розміром ($0,4 \div 0,6$) м;
- візуальна оцінка товщини шару піноскла без залучення вимірювальних інструментів не дає задовільних результатів.

Етапи проведення експерименту розподілу піноскла поверхнею рідини, починаючи з його подачі, приведені на рис. 7.9.

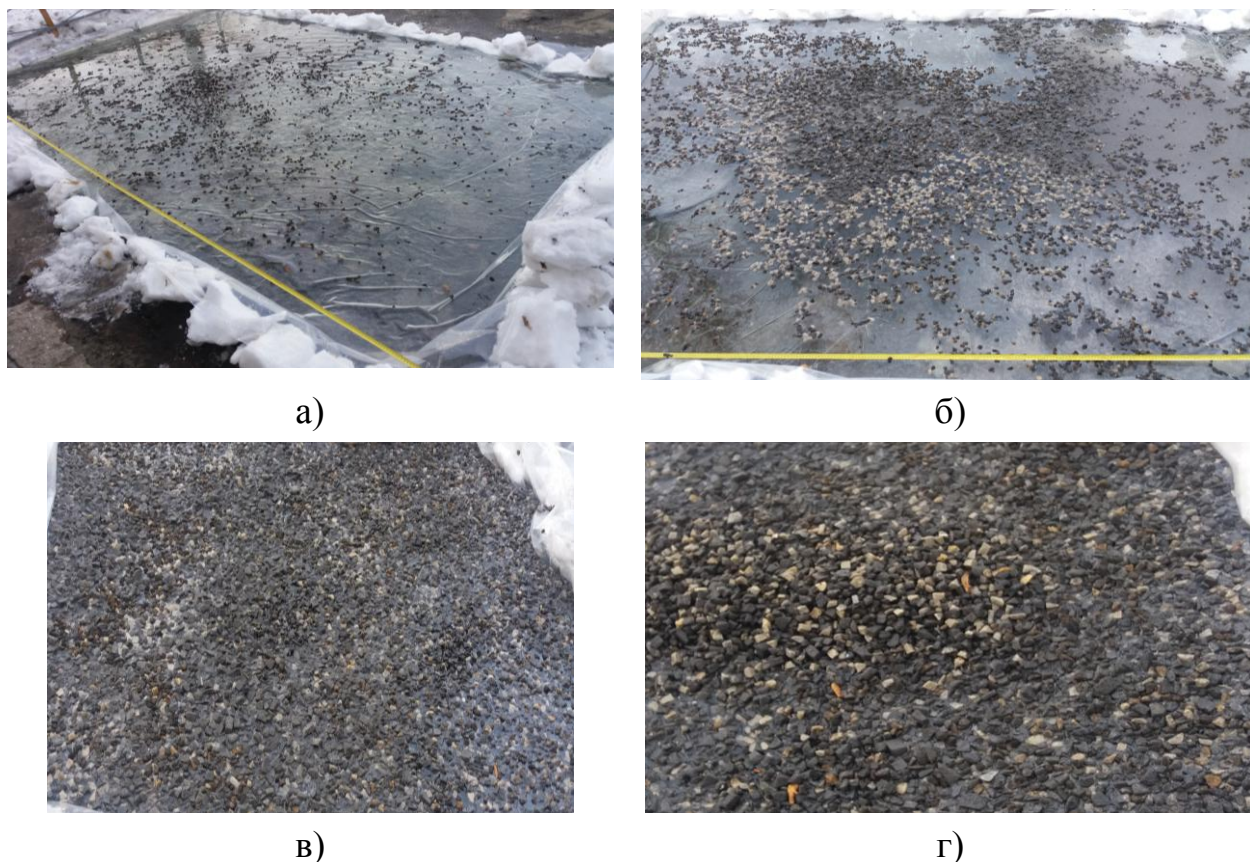


Рис. 7.9 – Етапи проведення експерименту розподілу ПС поверхнею рідини:

а) початок подачі; б) поступове заповнення поверхні рідини; в) утворення суцільного шару піноскла; г) багат шарове покриття

7.5 Рекомендації з подавання гранульованого піноскла під час гасіння пожеж резервуарів

Організація гасіння пожеж у резервуарах і резервуарних парках повинна здійснюватися з урахуванням вимог «Бойового статуту пожежної охорони України» (БСПОУ), «Правил безпеки праці в Державній пожежній охороні МВС України» та розроблених оперативних документів (планів пожежогасіння, планів ліквідації аварійних ситуацій, інструкцій взаємодії). З урахуванням особливостей нової вогнегасної речовини – піноскла, доцільно внести деякі зміни до існуючих нормативів, які наведено нижче.

Подавання ПС може починатися навіть за відсутності його достатньої кількості для гасіння. Шар піноскла не руйнується під впливом різних факторів пожежі. Навіть нанесення тонкого шару ПС знизить інтенсивність горіння. В деяких випадках, у разі суттєвого зменшення інтенсивності горіння, можна виключити подачу води на захист сусідніх резервуарів. А в разі дуже слабкого горіння можна виключити подачу води на охолодження резервуара, що горить.

Подавання гранул ПС до резервуара зверху пневмоекційних апаратів

можна здійснювати за допомогою гнучких матеріалопроводів, встановлених на пожежних автопідйомниках, техніки, що пристосована для її подачі (пожежних автодрабин, автокранів типу «КАТО», «ФАУН», «ЛІБКНЕР»).

На початковому етапі пожежі в разі горіння висококиплячих рідин можна використовувати сухе піноскло. В разі обладнання резервуарів засобами підшарової подачі піноскла доцільно подавати його зразу, навіть у разі відсутності потрібної кількості компонентів ГУС.

Інтенсивність подачі піноскла не є обмежувальним фактором, тому піноскло можна подавати з малою інтенсивністю. В разі утворення «карманів», застосування піноскла здійснюється як і у випадку використання піни.

Рішення щодо доцільності й можливості проведення операцій з відкачування (закачування) нафти (нафтопродукту, донної води) із резервуара, що горить, і сусідніх резервуарів приймається так само, як і у випадку гасіння піною.

7.6 Висновки за розділом 7

1. Проведено аналіз існуючого рівня техніки, яка може використовуватися для ефективного подавання легких негорючих пористих матеріалів на палаючу поверхню нафтопродукту в умовах пожежогасіння.

2. Обґрунтовано доцільність використання пневматичних струменевих насосів під час організації пневмоекційної схеми транспортування легких негорючих пористих матеріалів на поверхню палаючих нафтопродуктів.

3. Розроблено апаратно-технологічну схему процесу на базі пневматичного ежекційного апарата, який працює за схемою «повітря – тверде тіло».

4. Визначено геометричні та конструктивно–технологічні параметри ежекційного апарата подачі легких негорючих пористих матеріалів на поверхню палаючих нафтопродуктів відповідно до визначених вимог та цілей пожежогасіння.

5. Проведено експериментальні натурні дослідження повітряно-ежекційного способу подачі гранул легких негорючих пористих матеріалів на поверхню рідини з використанням створеної спрощеної масштабної моделі ежекційного апарата подачі легких негорючих пористих матеріалів.

6. Розроблено рекомендації із застосування сил та засобів під час гасіння пожеж у резервуарах із використанням гранульованого піноскла.

РОЗДІЛ 8

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ГАСІННЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ «В» З ВИКОРИСТАННЯМ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ І ГЕЛЕУТВОРЮЮЧИХ СИСТЕМ

Найважливішою складовою для успішного впровадження результатів наукових досліджень у практику є складання точних інструкцій із застосування нових технічних засобів і матеріалів. Також для успішного впровадження нових розробок необхідне знання експлуатаційних властивостей речовин, матеріалів і технічних засобів. Велике значення має врахування впливу, використовуваних речовин і продуктів, які утворюються у разі їх використання, на людину і навколишнє середовище. Одним з найважливіших факторів при впровадженні нових технологій є економічний фактор.

8.1 Токсикологічні, екологічні та експлуатаційні характеристики компонентів вогнегасних систем на основі пористих матеріалів і ГУС

У випадку використання вогнегасних речовин необхідно забезпечити такі умови, які дозволяють забезпечити їх вміст у навколишньому середовищі нижче встановлених значень ГДК. Для цілей пожежогасіння дозволено використовувати речовини не нижче 3 і 4-го класів небезпеки. Іншим важливим моментом є забезпечення відсутності небезпечних продуктів, які можуть утворитися в умовах зберігання або застосування ВР.

Як легкий носій, що забезпечує плавучість вогнегасного шару гелю на поверхні горючої рідини, запропоновано використовувати гранульоване піноскло, яке не є небезпечним для навколишнього середовища, можливо для повторного використання і має тривалий термін зберігання без спеціальних умов.

У розділі 2 цієї роботи було показано, що як компоненти ГУС за екологічними параметрами доцільно брати систему $\text{CaCl}_2(5\%)+\text{Na}_2\text{O}\cdot 2,7\text{SiO}_2(5\%)$.

У вибраній ГУС як гелеутворювач використовують водний розчин полісилікату натрію ($\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2$, рідке скло), який відноситься до III класу небезпеки. Рідке скло використовується в якості в'язучого, інгібітора корозії сплавів заліза, як основний компонент силікатного клею, сировина для отримання інших силікатів і силікагелю. Фізико-хімічні властивості виробленого рідкого скла встановлюються в залежності від галузі застосування. Найбільш поширеним видом рідкого скла є концентрат, що використовується в будівництві. Вимоги до такого концентрату наведені у відповідному ДСТУ [334]. Вихідний розчин має лужну реакцію середовища ($\text{pH}\geq 12$). Він може викликати подразнення шкірних покривів. Також є небезпечним вдихання аерозолів цієї речовини і потрапляння їх в очі. Це викликає необхідність використовувати захисний одяг, респіратори, окуляри або маски для захисту очей. Дослідження, проведені раніше [227], показали, що при дії розчинів рідкого скла відсутня суттєва корозія сталей і сплавів алюмінію, які використовуються у виробництві пожежної техніки. Розчини рідкого скла не викликають суттєвих пошкоджень матеріалів, які використовують-

ся для виробництва пожежних рукавів. Важливим моментом у використанні рідкого скла є нерозчинність розчинів на їх основі в вуглеводневих рідинах, що забезпечує відсутність їх забруднення під час гасіння пожеж.

Концентровані розчини рідкого скла мають гарантійний термін зберігання 12 місяців. Для цілей пожежогасіння, за рахунок відсутності суттєвого зменшення вогнегасних характеристик, можна використовувати вихідний розчин рідкого скла з терміном зберігання до двох років. Розведені розчини цієї речовини зберігають свої експлуатаційні властивості менший час. За наявними даними [227] 5 %-й розчин зберігає свої гелеутворюючі властивості не менше 200 діб. Однак його властивості можуть бути відновлені шляхом додавання вихідного рідкого скла в кількості 3 % від об'єму робочого розчину.

На час збереження працездатності розчинів рідкого скла впливає недопущення контакту з атмосферним повітрям. Це пояснюється поступовою полімеризацією таких розчинів у результаті їх взаємодії з вуглекислим газом, наявним у повітрі. Тому завчасно готувати розчини з вихідного концентрату потрібно з урахуванням їх стійкості. Робочі розчини рідкого скла готуються з вихідного концентрату шляхом його розведення водою. Для розведення можна використовувати водопровідну, річкову та технічну воду. В останньому випадку вміст солей дво- і тривалентних металів у ній не повинен перевищувати 0,3 %. Розчин полісилікату натрію готується об'ємним методом – до заданого об'єму води додається необхідний об'єм рідкого скла.

Хлорид кальцію відноситься до речовин III класу небезпеки. Характер середовища водних розчинів CaCl_2 кислий, $\text{pH} \approx 5$. Такі розчини викликають слабку подразнюючу дію на шкіряні покриви, є небезпечними в разі потрапляння в дихальні шляхи і особливо в очі. Захист органів дихання та шкіряних покривів такий самий, як і в разі застосування розчинів рідкого скла.

Нижче наведені об'єми рідин, потрібних для приготування 1 м³ робочих розчинів рідкого скла для ГУС $\text{CaCl}_2(5\%) + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2(5\%)$ (табл. 8.1). Прийнято, що вміст $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ у вихідному розчині становить 36 %, а густина цього розчину – 1350 кг/м³. Густина 5 %-го розчину взята рівною 1050 кг/м³.

Таблиця 8.1 – Об'єми рідкого скла, насиченого розчину кальцій хлориду та води потрібні для приготування 1 м³ робочих розчинів ГУС

Компоненти ГУС	$V(\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2), \text{м}^3$	$V(\text{CaCl}_2)(\text{нас}), \text{м}^3$	$V(\text{H}_2\text{O}), \text{м}^3$
Гелеутворювач	0,054	-	0,946
Каталізатор гелеутворення	-	0,045	0,955

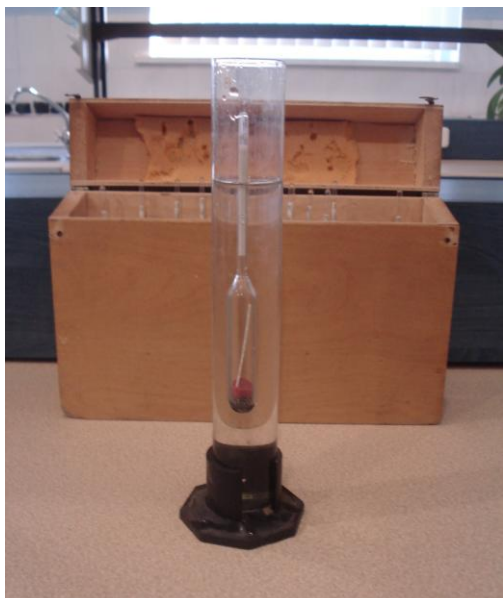
У зв'язку з високою в'язкістю вихідного розчину рідкого скла потрібне перемішування розчину, яке можна здійснювати будь-яким методом протягом двох хвилин.

В якості каталізаторів гелеутворення використовується 5 %-й розчин CaCl_2 , який готується з насиченого розчину хлориду кальцію (42 % при 20 °С). Допускається застосування хлориду кальцію будь-якої хімічної та технічної класифікації, в тому числі й відходи виробництва, що містять цю речовину. Добре

зарекомендували себе в якості каталізатора гелеутворення розчини хлориду кальцію, які скидаються содовими заводами (у процесі виробництва соди за аміачним методом). В останньому випадку необхідно попередньо визначити його концентрацію, після чого провести відповідний перерахунок. Відповідні дані для приготування робочого розчину CaCl_2 наведені в табл. 8.1. Перемішування здійснюється будь-яким методом протягом двох хвилин. Для приготування та зберігання розчинів хлориду кальцію необхідно використовувати ємності з кислотостійких сплавів або пластмас. Такі розчини слід зберігати в закритих ємностях. Термін зберігання за таких умов зберігання є необмеженим.

Для контролю складу та якості речовин, що використовують, та робочих розчинів компонентів ГУС потрібно застосовувати ряд хімічних та фізико-хімічних методів.

8.1.1 Визначення густини розчинів компонентів



Для приготування робочих розчинів і контролю їх концентрацій необхідне знання густини цих розчинів. У зв'язку з тим, що в роботі в основному застосовувалися технічні реактиви, некоректно користуватися довідковими даними. Для експериментального визначення густини розчинів був використаний набір ареометрів АОН-1 (рис 8.1). Це дозволяє визначати густину з точністю $\pm 1 \text{ кг/м}^3$. Контрольні значення густини робочих розчинів наступні: $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 - (1040 \pm 5) \text{ кг/м}^3$; $\text{CaCl}_2 - (1044 \pm 5) \text{ кг/м}^3$.

Рис. 8.1 – Визначення густини розчинів за допомогою набору ареометрів АОН-1

8.1.2 Визначення в'язкості розчинів компонентів ГУС

В'язкість є такою властивістю, яка істотно впливає на подавання ВР, ступінь розпилю розчинів і характер розтікання їх по твердій поверхні. Розчини з великими значеннями в'язкості важко транспортуються по трубопроводах і погано розпоршуються існуючими засобами подавання ВР. У випадку використання гідравлічного розпилювання прийнятні результати вдається отримати за значень динамічної в'язкості не більше $10 \text{ мПа} \cdot \text{с}$ (коефіцієнт динамічної в'язкості води за $20 \text{ }^\circ\text{C}$ становить $\sim 1 \text{ мПа} \cdot \text{с}$). З розчинів, що використовуються як складові ГУС, тільки у розчинів рідкого скла в'язкість істотно перевищує це граничне значення. Для рідкого скла, що випускається промисловістю, в'язкість може варіювати в широких межах. Так, для зразків рідкого натрієвого скла в рі-

зних партіях продукту, який ми використовуємо в дослідженнях, в'язкість змінювалася від 105 до 230 мПа·с. Тому для зменшення в'язкості розчинів рідкого натрієвого скла вихідні розчини необхідно розбавляти водою.

Для визначення максимальних робочих концентрацій були досліджені в'язкості систем «рідке скло–вода». Вимірювання в'язкості проводилися на вискозиметрі ВПЖ-2 (рис. 8.2). Вимірювання виконувались на вискозиметрі з діаметром капіляра 1,43 мм за температури 20 °С. Залежність в'язкості розчинів рідкого натрієвого скла від концентрації представлена на рис. 8.3. Як видно з наведених даних, добавки води різко зменшують в'язкість розчину. За зменшення концентрації нижче 32 % в'язкість розчину знижується до значень 10 мПа·с.

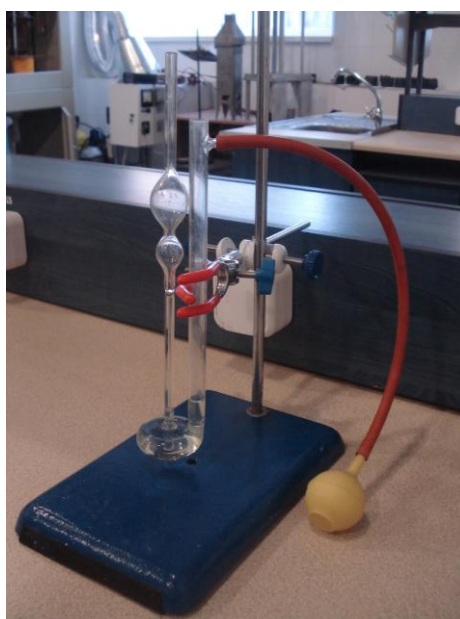


Рис. 8.2 – Вискозиметр ВПЖ-2

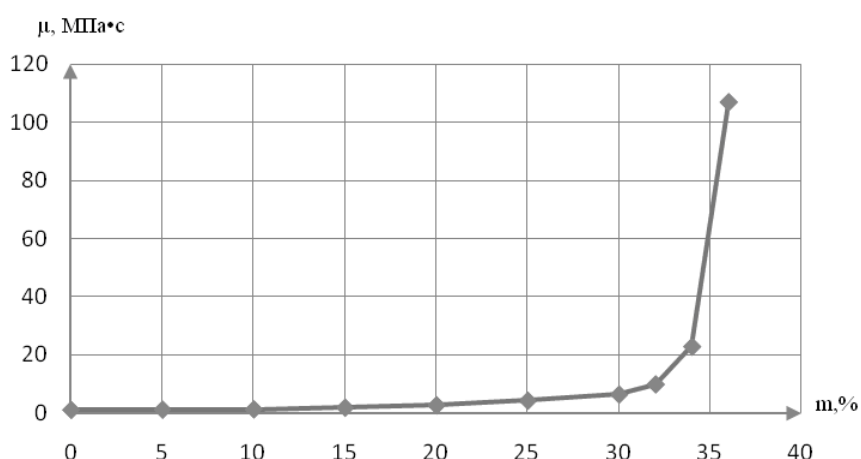


Рис. 8.3 – Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості (μ) від масового вмісту полісилікату натрію (m)

8.1.3 Визначення кислотності й корозійних властивостей компонентів ГУС

Кислотність розчинів визначає їх негативну дію на різні матеріали, а також на тваринний і рослинний світ. З цих позицій найбільш прийнятними є розчини, які мають нейтральну або слаболужну реакцію середовища. Кількісно кислотно-основні властивості розчинів виражаються за допомогою водневого показника (рН). Водневий показник визначається як негативний десятковий логарифм активності іонів водню ($a(\text{H}^+)$) в розчині: $\text{pH} = -\lg a(\text{H}^+)$. Нейтральному середовищу відповідає значення рН, що дорівнює семи. Близькими до нейтральності вважаються розчини в інтервалі рН від 5 до 9. На практиці помітний негативний вплив виявляють розчини із сильноокислим ($\text{pH} < 3$) і сильнолужним ($\text{pH} > 11$) характером середовища.

Для визначення рН був використаний індикаторний метод, який дозволяє проводити визначення кислотності з точністю 1 одиниці рН. При цьому використовувався універсальний індикаторний папір фірми «Лакхема» (Чехія). Експериментально отримані значення рН для 5%-х розчинів рідкого скла і хлориду кальцію склали 12 і 5 відповідно.

Крім визначення кислотності компонентів ГУС, була вивчена кислотність гелів. Їх значення рН виявилися проміжними між відповідними значеннями компонентів ГУС і становили 7–8.

Крім кислотно-основних характеристик розчинів, було оцінено їх корозійну активність. Дані, наведені в роботі [227], вказують на те, що 5%-ві розчини рідкого скла і хлориду кальцію не викликають помітних корозійних пошкоджень зразків сталі Ст3 та сплаву алюмінію АЛ-9 протягом 120 діб. У разі більшого часу впливу обох розчинів спостерігаються помітні корозійні пошкодження. У зв'язку з цим все обладнання, виготовлене з нестійких до корозії матеріалів, яке зазнало впливу таких розчинів, має бути піддане обробці. Для цього його спочатку необхідно промити водою, а потім нейтралізувати 1%-м розчином рідкого скла або соди. Остаточо виконується ще одне промивання водою.

8.1.4 Визначення силікатного модулю рідкого скла

Важливим показником розчину рідкого скла є силікатний модуль, який визначається за формулою:

$$M = \frac{n(\text{SiO}_2)}{n(\text{Na}_2\text{O})}, \quad (8.1)$$

де $n(\text{SiO}_2)$ та $n(\text{Na}_2\text{O})$ – кількість діоксиду силіцію та оксиду натрію відповідно.

Як гелеутворювач необхідно використовувати рідке скло із силікатним модулем не менше 2,5. Це потребує контролювати цей показник. В ході досліджень використовувались розчини рідкого скла з однієї партії. Визначення

силікатного модуля здійснювалося за двома методами: ваговим та методом титрування [334–335].

Масовий процент діоксиду силіцію в разі використання вагового методу визначався за співвідношенням:

$$\omega_{\text{SiO}_2} = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 100}{m}, \quad (8.2)$$

де m_1 – маса тигля з осадом двоокису силіцію до випробувань на чистоту, г; m_2 – маса тигля із залишком після випробування на чистоту, г; m – маса навіски рідкого скла, г.

Масовий вміст Na_2O у дослідженому розчині було визначено методом кислотно-основного титрування. Він склав 8,87 %. Кількість речовини визначалася як відношення її масового вмісту до молярної маси.

$$n_i = \frac{\omega_i}{M_i}, \quad (8.3)$$

де ω_i – масовий вміст i -ї речовини, %; M_i – молярна маса i -ї речовини, г/моль.

З часом силікатний модуль рідкого скла однієї партії може змінюватися. Тому навіть у випадку використання однієї партії рідкого скла необхідно контролювати величину силікатного модуля. Визначені значення силікатного модулю в різний час знаходились у межах 2,6–2,75.

Більша трудомісткість вагового методу визначення силікатного модуля рідкого скла робить його незручним для постійного контролю. Тому паралельно з ваговим методом використовувався спрощений метод визначення силікатного модуля з використанням титрування [335]. У цьому методі 1 мл розчину рідкого скла заливався до колби місткістю 500 мл. До колби додавалось 50 мл води та 3÷4 краплі індикатора (суміш метилового-червоного та бромтимолового-синього з масовим відношенням 1:1). Потім луг титрувався 0,5 н розчином хлоридної кислоти до появи жовтого забарвлення. У нейтралізований розчин додавали (4÷5) г кристалічного фтористого натрію та додатково 4÷5 крапель індикатора. При перемішуванні виконувалося повторне титрування. Титрування закінчувалося у той момент, коли дві останні краплі кислоти забарвлюють розчин у червоний колір. Колір індикаторів, суміш яких використовується у даному методі, змінюється в залежності від рН середовища (табл. 8.2).

Таблиця 8.2 – Зміна забарвлення індикаторів у залежності від рН середовища

Індикатор	рН	Колір
Метилловий червоний	4,4÷6,2	червоний - жовтий
Бромтимоловий синій	6,0÷7,6	жовтий - синій

Суміш індикаторів набуває червоного кольору за значення рН середовища, що знаходиться в інтервалі 6,0÷6,2. Силікатний модуль рідкого скла для вказаного методу розраховується за співвідношенням:

$$M = \frac{0,5 \cdot V''(\text{HCl})}{V'(\text{HCl})}, \quad (8.4)$$

де $V''(\text{HCl})$ – об'єм кислоти, що був витрачений на повторне титрування, мл;
 $V'(\text{HCl})$ – об'єм кислоти, що був витрачений на первинне титрування, мл.

Результати періодичного проведення аналізу з визначення силікатного модуля лежать в межах 2,65÷2,80. Максимальна розбіжність між результатами визначення силікатного модуля за різними методами складає 2 %, що вказує на можливість використання спрощеного методу визначення силікатного модуля для періодичного контролю фізико-хімічних властивостей розчинів рідкого скла.

8.2 Засоби подавання піноскла

Обов'язковою складовою запропонованої вогнегасної системи є легкий пористий матеріал, в якості якого було вибрано подрібнене піноскло із розміром гранул (1,0–1,5) см. У деяких випадках для забезпечення гасіння пожеж класу «В» достатньо подавання тільки сухого або змоченого піноскла. В інших випадках доцільно використовувати послідовну подачу спочатку піноскла, а потім компонентів ГУС.

До цього часу не було розроблено засобів подачі піноскла з параметрами, прийнятними для гасіння пожеж класу «В». У розділі 7 розглянуто питання створення засобів подачі сухого і змоченого піноскла, яке забезпечить гасіння резервуарів із горючою рідиною. Тому в цьому розділі таке питання не розглядається.

Особливістю піноскла як засобу гасіння пожеж класу «В» є відсутність обмежень на інтенсивність його подавання. У такому випадку для подавання піноскла відсутнє поняття критичної інтенсивності подавання ВР. Це обумовлено тим, що шар піноскла є термічно стійким, він не руйнується навіть у випадку тривалого впливу різних факторів пожежі. Це, у свою чергу, знижує вимоги з мінімальної витрати піноскла на засобах подавання. Необхідний шар піноскла можна створити за будь-який прийнятний час. Після створення на поверхні ГР такого шару горіння припиниться або на його поверхню необхідно буде додатково нанести шар гелю.

Аналіз результатів із гасіння ГР змоченим піносклом (Розділ 4) дозволяє зробити висновок, що змочування піноскла треба здійснювати безпосередньо перед початком гасіння.

8.3 Засоби подавання вогнегасних ГУС

Однією з умов успішного використання ГУС з метою пожежогасіння є подавання компонентів системи в розпиленому вигляді. Для проведення дослідження впливу режимів подавання ГУС на результати гасіння пожеж класу «А» раніше були розроблені й виготовлені [227] автономні установки гасіння гелеутворюючими системами «АУТГУС» (рис. 8.4, а) і «АУТГУС–П» (рис. 8.4, б).

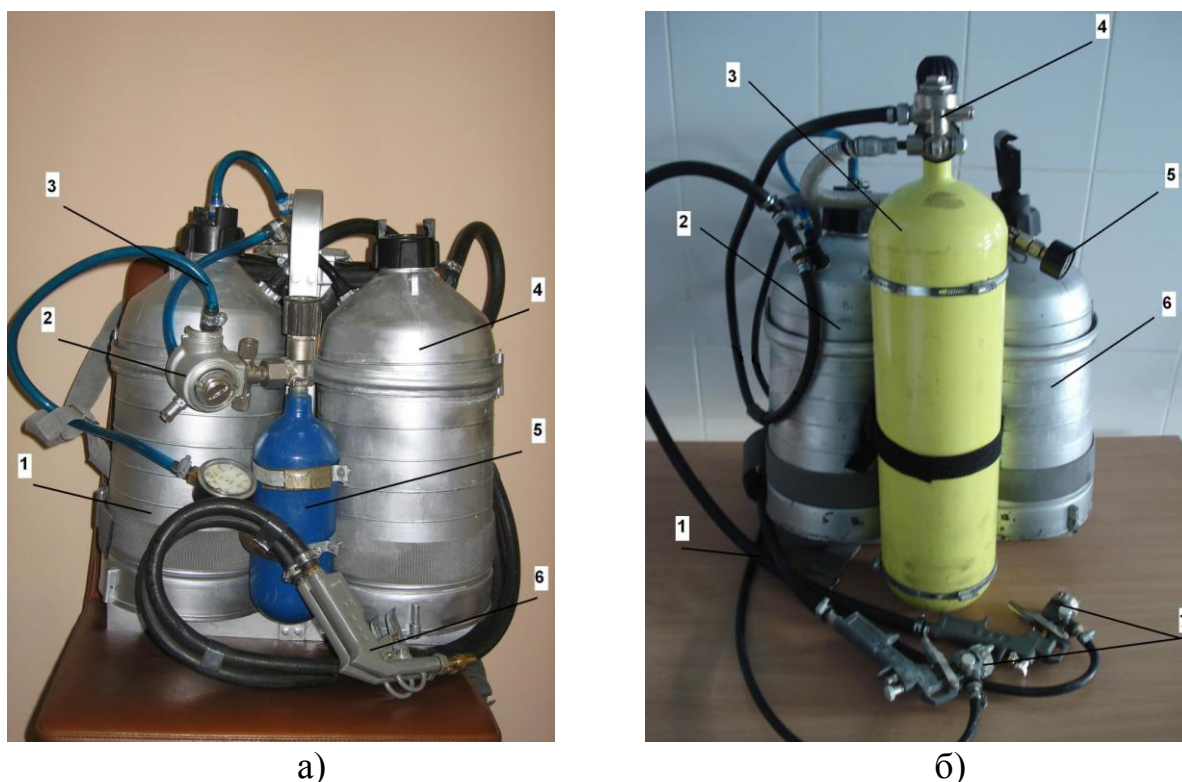


Рис. 8.4 – Зовнішній вигляд автономних установок пожежогасіння з ГУС:

а) АУТГУС: 1 – ємність з розчином гелеутворювача; 2 – редуктор; 3 – система гнучких шлангів; 4 – ємність із розчином каталізатора гелеутворення;

5 – балон зі стисненим повітрям; 6 – стволи з пістолетними рукоятками;

б) АУТГУС–П: 1 – система гнучких шлангів; 2 – ємність із розчином гелеутворювача; 3 – балон зі стисненим повітрям; 4 – редуктор; 5 – манометр високого тиску; 6 – ємність із розчином каталізатора гелеутворення; 7 – форсунки

Загальна маса компонентів ГУС в обох установках становить 12 кг (по 6 кг гелеутворювача і каталізатора гелеутворення). Загальна маса повністю заправлених установок «АУТГУС» і «АУТГУС–П» становить 20 і 28 кг відповідно. Максимальна дальність подавання ВР для установки «АУТГУС» становить 5 м, а для «АУТГУС–П» 7 м.

Відмінність двох установок між собою полягає в тому, що установка «АУТГУС» забезпечує гідравлічне розпилювання ВР, а «АУТГУС–П» – пневматичне розпилювання. Для цього в останній установці використовувалися

форсунки пневморозпилювання СО-71, які дозволяли варіювати кут факела розпиленого струменя в межах (4–90) градусів. Ще однією особливістю установки «АУТГУС–П» є можливість її використання разом з ізолюючим проти-газом. Запасу стисненого повітря в балоні вистачає на розпилювання ВР і дихання протягом не менше 20 хв.

Підготовка установок до роботи полягає в заповненні через верхні заливні горловини ємностей рідкими компонентами ГУС і закачуванні повітря в балон високого тиску до досягнення тиску 20 МПа.

Установки АУТГУС і АУТГУС–П можуть бути використані під час гасіння пожеж класу «В», зокрема резервуарів із ГР малих розмірів, або невеликих розливів ГР. З урахуванням того, що потрібна поверхнева витрата ГУС, з урахуванням коефіцієнта запасу 1,5, складає 3 кг/м², можна розрахувати площу поверхні рідини, яку можна загасити попередньо створивши необхідний шар піноскла:

$$S = m / \Phi = 12 / 3 = 4 \text{ м}^2. \quad (8.5)$$

Для гасіння великих резервуарів і великих за площею розливів необхідно використовувати такі засоби подавання, які забезпечують більшу дальність подавання ВР і велику витрату ВР. До таких засобів подавання відносяться стволи – розпилювачі або стволи з комбінованими насадками (РС-Ам, РС-Бм, РСК-50, НРТ-5, НРТ-10, НРТ-12, РВ-12) [336].

8.4 Вибір параметрів подавання вогнегасних речовин під час гасіння пожеж резервуарів із ГР з використанням пористих матеріалів і ГУС

Рекомендації з гасіння пожеж новими вогнегасними засобами повинні базуватися на експериментальних даних щодо їх вогнегасних властивостей. У разі якщо ці вогнегасні засоби не використовувалися під час гасіння реальних пожеж можна використовувати результати, отримані на модельних вогнищах пожежі з деяким коректуванням. Зазвичай вводять **коригувальний коефіцієнт**, який враховує різницю між умовами гасіння модельних вогнищ пожежі й умовами гасіння реальних пожеж. В умовах реальної пожежі важко домогтися рівномірності подачі ВР на поверхню ГР. Крім того, в разі подавання ПС не спостерігається його помітного розтікання по поверхні рідини, як це має місце в разі пін. Прийmemo коригувальний коефіцієнт у нашому випадку рівним 1,5.

8.4.1 Розрахунок параметрів подавання піноскла без використання ГУС та з використанням ГУС у випадку малого часу вільного горіння

Засоби подавання піноскла розглянуто в параграфах 8.1–8.3. Отже, розглянемо тільки характеристики, пов'язані з кількісними параметрами подавання піноскла. Основною характеристикою, яка визначає товщину шару піноскла, потрібну для припинення горіння або зниження інтенсивності горіння до рівня, коли необхідно подавання ГУС, є температура займання або близька до неї температура спалаху. Однак для багатьох технічних рідин і моторних палив ці

характеристики змінюються в широких межах. У таких випадках необхідно знати або визначити цю характеристику в кожному конкретному випадку. У подальшому розглянемо найбільш несприятливий випадок, прийємо мінімальне значення температури спалаху горючої технічної рідини з регламентованими нормативами значення.

У разі використання нафти з різних родовищ виявляється, що температура спалаху варіює в діапазоні більшому, ніж на 100 градусів. Тому для нафти необхідно приймати мінімальне значення температури спалаху ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), або визначити її експериментально.

В ході експериментів (Розділ 4) було встановлено, що ГР із температурою спалаху вище $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ доцільно гасити змоченим піносклом. У випадку газу є доцільним додаткове подавання ГУС із поверхневою витратою 2 кг/м^2 . У всіх інших випадках нема потреби у додатковому подаванні ГУС. В таблиці 8.3 наведено, одержані інтерполяцією отримані в Розділі 4 залежності, з урахуванням коригувального коефіцієнта, рівного 1,5, значення поверхневої витрати змоченого піноскла, яка потрібна для гасіння ГР. Експериментально отримані результати (Розділ 4) були визначені за умови малого часу вільного горіння. Тому їх можна використовувати тільки в разі, якщо гасіння почалося протягом декількох хвилин після початку горіння.

Таблиця 8.3 – Значення поверхневих витрат змоченого ПС (Φ) та ГУС ($\Phi_{\text{ГУС}}$) для гасіння ГР із температурами спалаху вище за $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ та часом вільного горіння до 5 хв.

$t_{\text{сп}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	28–40	40–80	80–120	>120
$\Phi, \text{ кг/м}^2$ *	15	12	9	6
$\Phi_{\text{ГУС}}, \text{ кг/м}^2$	3	-	-	-

* для насипної густини ПС 100 кг/м^3

У разі ГР із температурою спалаху нижче $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ доцільно гасити сухим ПС із наступним додатковим подаванням ГУС. До таких рідин відносяться бензин, уайт-спірит і легкі нафти. Оскільки температури спалаху уайт-спіриту і різних видів легкої нафти можуть змінюватися в широких межах, прийємо умови їх гасіння такими, як у бензину. У таблиці 8.4 наведено значення поверхневої витрати сухого ПС, потрібні для гасіння реальних пожеж у резервуарах із бензином, уайт-спіритом і легкою нафтою за умови часу вільного горіння не більше за 5 хвилин.

Таблиця 8.4 – Значення поверхневих витрат (Φ) сухого ПС та ГУС ($\Phi_{\text{ГУС}}$) для гасіння бензину, уайт-спіриту і легкої нафти у разі часу вільного горіння до 5 хв.

Вогнегасна речовина	$\Phi^*, \text{ кг/м}^2$	$\Phi_{\text{ГУС}}, \text{ кг/м}^2$
ПС	18	-
ГУС	-	3

* для насипної густини ПС – 100 кг/м^3 .

Також у цій таблиці наведено значення поверхневої витрати ГУС. Всі значення наведені з урахуванням коригувального коефіцієнта 1,5.

8.4.2 Розрахунок параметрів подавання піноскла без використання ГУС у випадку великого часу вільного горіння

Результати, які отримані на лабораторних і стандартних модельних вогнищах пожежі $2B$, одержані за умови, що гасіння починається у разі утворення лише тонкого поверхневого шару розігрітої рідини. Час вільного горіння в такому випадку регламентується рівним 1 хвилині. За такий короткий час горючі рідини прогриваються на глибину менше 1 см. У разі внесення піноскла на поверхню рідини, що горить, воно забезпечує охолодження на всю глибину верхнього розігрітого шару. В умовах реальної пожежі гасіння починається через досить тривалий проміжок часу. Це вимагає внесення корективів до рекомендацій з гасіння реальних пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами.

Розглянемо випадок, коли гасіння резервуара починається через великий проміжок часу після початку пожежі. Зазвичай це декілька десятків хвилин, а інколи – і декілька годин. У такій ситуації рідина прогривається на велику глибину.

Лінійні швидкості прогріву різних ГР коливаються в межах 10–40 см/год [85]. Тобто глибина прогріву верхнього шару ГР під час пожежі може скласти декілька метрів. Це потребує внесення відповідних змін у кількісні характеристики подавання піноскла. В першу чергу треба врахувати необхідність додаткового охолодження нагрітого шару ГР.

В дослідях з гасіння стандартного модельного вогнища $2B$ товщина шару, змоченого ПС ($B = 30\%$), яка знаходиться нижче рівня рідини складала: для гасу – 5,4 см, для дизельного пального – 4,2 см і для машинного мастила – 2,0 см. Для забезпечення припинення горіння ГР шляхом охолодження не обов'язково охолоджувати вісь шар розігрітої рідини. Достатньо охолодити тільки верхню частину такого шару на час, достатній для охолодження конструкцій резервуара нижче температури самоспалахування. Поверхня змоченого ПС буде гарантовано мати температуру нижче $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, що набагато менше за температури самоспалахування ГР. Прийmemo, що для забезпечення охолодження верхнього шару висококиплячих рідин достатньо товщини шару змоченого ПС, що знаходиться нижче рівня рідини – 10 см (*перша умова погасання полум'я ГР*). В такому разі, крім охолодження шару в 10 см, будуть охолоджуватися і більш глибокі прогріті шари рідини за рахунок виділення частини води з пор ПС та їх занурення з верхнього нагрітого шару ГР у нижні шари рідини (Розд. 3).

Також прийmemo, що для реалізації ефектів ізолювання та екранування потрібно забезпечити наявність шару піноскла вище рівня рідини не меншу, ніж одержано в дослідях із гасіння стандартного модельного вогнища пожежі $2B$ (*друга умова погасання полум'я ГР*). Ці висоти розрахуємо на основі визначених значень плавучості змоченого піноскла ($B=30\%$) (Розд. 2). Для гасу, дизельного пального та машинного мастила вони складуть 8,5; 9,3 і 9,6 см відповідно. Ці значення товщини шарів, що залишаються над рівнем рідини перевищують відповідні данні, які одержано в дослідях із гасіння стандартного модельного вог-

нища пожежі 2В. Тобто виконується друга умова погасання полум'я ГР.

В такому випадку загальна товщина шару піноскла, яка забезпечить гасіння гасу, дизельного пального та машинного мастила, складе 18,5; 19,3 і 19,6 см відповідно. Такі товщини шарів піноскла задовольняють обом прийнятним умовам погасання полум'я. Ці значення зведено у табл. 8.5.

Таблиця 8.5 – Значення поверхневої витрати (Φ) змоченого ПС ($V = 30\%$) необхідної для гасіння висококиплячих рідин за умов часу вільного горіння більше 5 хв.

Горюча речовина	Φ , кг/м ² *
Гас	18,5
Дизельне пальне	19,3
Машинне мастило	19,6

* Для насипної густини піноскла 100 кг/м³

8.4.3 Розрахунок параметрів подавання піноскла з використанням ГУС у випадку великого часу вільного горіння

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що в разі гасіння низькокиплячих рідин доцільно використовувати засоби гасіння з переважно ізолюючими властивостями. Вплив охолодження горючої рідини на її гасіння в такому випадку має другорядну роль. Високі ізолюючі властивості мають суцільні шари гелю, які нанесено на шар піноскла. Також такий результат забезпечують шари гелю з поверхневою витратою 3 кг/м², які нанесено на такий шар піноскла, який забезпечує дуже слабке горіння (Розд. 4). Розглянемо обидва випадки окремо. В якості низькокиплячих ГР обмежимося розглядом бензину, уайт-спіриту і легкої нафти (Юліївське родовище). Вони під час експериментальних досліджень показали близькі результати. Тому розглянемо тільки процес гасіння бензину.

Суцільний шар гелю на поверхні піноскла забезпечує припинення горіння і відсутність повторного займання під дією відкритого полум'я як у випадку малого, так і великого часу вільного горіння. Експериментально встановлено (Розд. 2.8), що мінімальна товщина шару піноскла з розміром гранул (1,0–1,5) см яка забезпечує плавучість суцільного шару гелю, дорівнює 15 см. З урахуванням коригуючого коефіцієнта 1,5 вона буде складати 22,5 см ($\Phi=22,5$ кг/м²). Питома поверхнева витрата ГУС для утворення суцільного шару гелю була визначена рівною 7 кг/м² (Розд. 2.7). З урахуванням коригуючого коефіцієнта 1,5 вона буде складати 10,5 кг/м².

Таким чином для гасіння бензину, уайт-спіриту та легкої нафти потрібно забезпечити рівномірне подавання на поверхню рідини ПС із поверхневою витратою 22,5 кг/м² і компонентів ГУС із поверхневою витратою 10,5 кг/м².

Розглянемо інший спосіб забезпечення припинення горіння бензину за допомогою шару гелю з поверхневою витратою 3 кг/м², який нанесено на шар піноскла, що забезпечує дуже слабке горіння – 14 см (14 кг/м²) (Розд. 4). З урахуванням коригуючого коефіцієнта 1,5 він буде складати 21 см ($\Phi = 21$ кг/м²).

Такої товщини шару піноскла достатньо для охолодження верхнього шару бензину товщиною 10 см (перша умова погасання полум'я ГР).

Таким чином для гасіння бензину, уайт-спіриту та легкої нафти потрібно забезпечити рівномірне подавання на поверхню рідини сухого піноскла із поверхневою витратою 21 кг/м² і компонентів ГУС із поверхневою витратою 3 кг/м² (табл. 8.6). Тобто в порівнянні з гасінням бензину шляхом утворення суцільного шару гелю, цей спосіб має перевагу за витратою двох складових вогнегасної системи. Такі самі кількісні параметри подавання складових вогнегасної системи приймаються для речовин із температурою спалаху менше, ніж 30 °С.

Таблиця 8.6 – Значення поверхневих витрат сухого ПС (Φ) та ГУС ($\Phi_{\text{ГУС}}$) для гасіння бензину, уайт-спіриту і легкої нафти за умови часу вільного горіння більше 5 хв.

Вогнегасна речовина	Φ^* кг/м ² ,	$\Phi_{\text{ГУС}}$, кг/м ²
ПС	21	-
ГУС		3

8.5 Рекомендації з гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами з використанням пористих матеріалів і гелеутворюючих систем

На основі результатів наведених вище, в таблицях 8.3–8.6 подано об'єднані рекомендовані параметри подавання складових вогнегасної системи для груп горючих рідин (табл. 8.7).

Таблиця 8.7 – Значення поверхневих витрат сухого ПС (Φ_c), змоченого ПС ($B = 30\%$) (Φ_3) і компонентів ГУС ($\Phi_{\text{ГУС}}$) для гасіння рідин із різними температурами спалаху

Горюча речовина	$t_{\text{сп}}$, °С	Φ_c , кг/м ²	Φ_3 , кг/м ²	$\Phi_{\text{ГУС}}$, кг/м ²
час вільного горіння менше за 5 хв.				
Бензин, легкі нафти	<30	18	-	3
Гас	30–60	-	15	3
Дизельне паливо	61–100	-	12	-
Машинне мастило	>100	-	9	-
час вільного горіння більше за 5 хв.				
Бензин, легкі нафти	<30	21	-	3
Гас	30–60	-	19	3
Дизельне паливо	61–100	-	19	-
Машинне мастило	>100	-	20	-

Крім запропонованого методу гасіння резервуарів із ГР шляхом подавання гранульованого ПС і ГУС [51, 52], можливий інший спосіб використання легкого пористого матеріалу. Так, у патенті на корисну модель [48] і роботах [49, 50] запропоновано інший спосіб використання негорючого пористого матеріалу для гасіння пожеж у резервуарах із горючими рідинами. Він полягає в одночасному підшаровому подаванні вогнегасної піни і пористого

матеріалу в нижню частину резервуара. В такому випадку гранули легкого пористого матеріалу спливають разом із піною на поверхню палаючої рідини та припиняють процес її горіння.

Такий спосіб гасіння має переваги перед гасінням тільки пористим матеріалом, який подається зверху на поверхню горючої рідини в разі утворення в резервуарі «кишень». В такому випадку піна разом із пористим матеріалом піднімається на поверхню рідини, обтікаючи всі перепони, та розтікається по всій її поверхні.

Ще одним способом гасіння резервуарів є застосування методу відкачування ГР із палаючих резервуарів з одночасним подаванням на поверхню рідини гранул легких пористих матеріалів. Цей метод доцільно використовувати в разі відсутності або недостатньої кількості компонентів вогнегасної системи «пористий матеріал–ГУС». Подавання легкого гранульованого матеріалу навіть у недостатній для гасіння ГР кількості призводить до зменшення інтенсивності горіння. Це, у свою чергу, дозволяє не застосовувати примусове охолодження стінок резервуара водяними струменями. Особливо доцільно проводити відкачування ЛЗР і ГР з одночасним подаванням на поверхню рідини гранул легких пористих матеріалів у випадку резервуарів великих обсягів типу РВС або РВСП із зірваним або підірваним дахом, в яких утворилися закриті «кишені», і з резервуарів типу РВСПК або РВСП із затонулим або пошкодженим плаваючим дахом (Розд. 1).

8.6 Рекомендації з гасіння розливів горючих рідин з використанням пористих матеріалів і гелеутворюючих систем

Пожежі, пов'язані з горінням розливів ГР, можна поділити на два види – пожежі в обвалуваннях резервуарів із ГР і пожежі розливів ГР на поверхні за відсутності огороження. Розвиток пожежі в обвалуванні характеризується високою швидкістю поширення полум'я поверхнею розлитої ГР. Після 10–15 хвилин впливу полум'я на резервуар відбувається втрата несучої здатності резервуара та його вузлів. Тому ліквідація горіння розлитих ГР в обвалуванні резервуарів згідно з діючими нормативами потребує негайного реагування [85, 337]. Реагування здійснюється шляхом негайного подавання піни з такими самими нормативами, як і у випадку гасіння самого резервуара. Тому можна прийняти, що для гасіння таких пожеж із використанням пористих матеріалів і ГУС потребує таких самих дій, як і у випадку гасіння резервуарів із ГР.

У випадку розливу ГР на горизонтальні невсмоктуючі поверхні за відсутності огороження утворюються шар рідини товщиною не більше 2 мм [338–339]. В разі якщо розлив відбувся швидко (викид рідини) вигорання ГР відбудеться за час менший 1 хвилини. Такий час не дозволяє навіть почати процес гасіння пожежі.

В разі витікання ГР протягом певного часу, нанесення товстого шару піноскла загальмує процес випаровування, що може привести до припинення горіння. В такому разі, у зв'язку з невеликою товщиною шару ГР можна обрати кількість ПС і ГУС за табл. 8.7 для часу вільного горіння менше за 5 хв.

У випадку розливу ГР на нерівну невсмоктуючу поверхню за відсутності огороження паливо буде збиратися у заглибленнях. В разі якщо заглиблення перевищує 10 см, для їх гасіння треба використовувати рекомендації, що наведено за табл. 8.7 для часу вільного горіння більше за 5 хв. Тобто поверхнева витрата ВР буде різною для часу вільного горіння менше та більше 5 хв.

В разі пожеж розливів ГР на всмоктуючі поверхні використовуємо дані з гасіння таких пожеж одержані експериментально (Розділ 4). Під час гасіння таких пожеж доцільне використання тільки ГУС. Поверхнева витрата ГУС, яка потрібна для припинення горіння піску, яке змоченого бензином достатньо забезпечити поверхневу витрату ГУС $\sim 3 \text{ кг/см}^2$ (з урахуванням коригуючого коефіцієнта 1,5) без попереднього нанесення піноскла.

8.7 Розрахунок загальних витрат ПС і ГУС на гасіння резервуара РВС-5000 і 1 м² площі розливу горючої рідини

Загальна витрата ВР (G) розраховується як добуток питомої поверхневої витрати (Φ) на площу дзеркала ГР (S):

$$G = \Phi \cdot S. \quad (8.6)$$

З урахуванням того, що площа резервуара РВС-5000 складає 400 м², отримуємо такі результати (табл. 8.8). При таких розрахунках не враховувалась маса води та їх було проведено для часу вільного горіння більше 5 хв.

Таблиця 8.8 – Значення загальної витрати ПС ($G_{\text{пс}}$) і компонентів ГУС ($G_{\text{гус}}$), які потрібні для гасіння резервуара РВС-5000

Горюча речовина	$G_{\text{пс}}$, т	$G_{\text{гус}}$, т
Бензин, легкі нафти	8,4	1,2
Гас	7,6	1,2
Дизельне паливо	7,6	-
Машинне мастило	8,0	-

Нижче наведено розрахунок витрат ГУС на гасіння пожеж розливів ГР на всмоктуючі поверхні. Під час гасіння розливів ГР на всмоктуючі поверхні витрати ГУС на 1 м² становитимуть:

$$G = \Phi \cdot S = 3 \cdot 1 = 3 \text{ кг}. \quad (8.7)$$

8.8 Порівняння економічних параметрів вогнегасної системи з існуючими

Порівняння економічних параметрів запропонованої вогнегасної системи на основі пористих матеріалів і гелеутворюючих систем проведемо на прикладі резервуара РВС-5000. При проведенні таких розрахунків використовуємо

дані з оптових цін на відповідні речовини та матеріали станом на 01.2019: подрібнене піноскло – 11500 грн/т; кальцій хлорид гранульований (кристалогідрат ~ 50 % CaCl₂) – 10500 грн/т (використовується 5 %-й розчин); рідке скло (~ 36 % Na₂O·nSiO₂) – 10080 грн/т (використовується 5 % розчин); піноутворювач плівкоутворювальний «Sofir AFFF» – 60000 грн/т.

Для розрахунків фінансових витрат на піноутворювач було обрано нормативні інтенсивності й час подавання піни [85]. В якості піноутворювача обрано плівкоутворюючий піноутворювач спеціального призначення «Sofir AFFF» (найбільш дешевий на українському ринку). Для резервуарів PVC-5000 відповідні дані наведено в таблиці 8.9.

Таблиця 8.9 – Значення нормативних інтенсивності, часу подавання, концентрації та загальної витрати плівкоутворюючого ПУ для гасіння резервуарів PVC-5000

Горюча речовина	I , кг/(м ² ·с)	T , хв	C , %	G , т	Вартість, тис. грн
Бензин, легкі нафти	$0,08 \cdot 1,2 = 0,096$	50	6	6,9	414
Гас, дизельне паливо	$0,05 \cdot 1,2 = 0,06$	30	6	2,6	156
Машинне мастило	$0,05 \cdot 1,2 = 0,06$	25	6	2,2	132

Загальну витрату піноутворювача (G) розраховують за співвідношенням:

$$G = I \cdot S \cdot T \cdot C, \quad (8.8)$$

де I – інтенсивність подавання піни, (кг/(м²·с)); S – площа поверхні горючої речовини (м²); T – час подавання піни, (с); C – концентрація ПУ в робочому розчині, (мас.%).

В таблиці 8.10 наведено результати розрахунку фінансових витрат на подрібнене піноскло та складові ГУС і їх порівняння з фінансовими витратами на піноутворювач. Фінансові витрати на ВР (E) розраховано за рівнянням:

$$E = G \cdot e, \quad (8.9)$$

де G – загальна витрата ВР, т; e – вартість 1 т ВР.

Таблиця 8.10 – Порівняння фінансових витрат на компоненти вогнегасної системи ПС+ГУС ($G_{\text{ПС}}$) із витратами на ПУ для гасіння резервуара PVC-5000

Горюча речовина	Фінансові витрати, тис. грн				Відношення ПУ/(ПС+ГУС)
	ПС	ГУС (CaCl ₂ +PC)	Загальні	ПУ	
Бензин, легкі нафти	96,6	$0,63+0,84=1,47$	98,07	414	4,2
Гас	87,4	$0,63+0,84=1,47$	88,9	156	1,8
Дизельне паливо	87,4	-	87,4	156	1,8
Машинне мастило	92,0	-	92,0	132	1,4

Аналіз цих даних дозволяє зробити висновок, що запропонована вогнегасна система на основі ПС і ГУС забезпечує зниження фінансових витрат на вогнегасні речовини у випадку гасіння рідин із температурою спалаху нижче 30 °С в 4,2 разу, у порівнянні з використанням пін. У випадку гасіння рідин із температурою спалаху вище 30 °С ця перевага складає 1,4–1,8 разу.

Важливою складовою, яку треба враховувати при розгляді фінансових витрат, є витрати на регенерацію, утилізацію, знешкодження та знищення вогнегасних речовин. Розглянемо, по-перше, цю складову витрат для пінного гасіння [340–342].

Регенерація – відновлення початкових значень показників якості піноутворювачів, відповідних нормативно-технічній документації.

Утилізація – використання за іншим призначенням піноутворювачів, що стали непридатними.

Знешкодження піноутворювачів – зменшення чи усунення небезпечності піноутворювачів або їх робочих розчинів шляхом їх фізико-хімічного, біологічного, хімічного оброблення.

Знищення піноутворювачів – знешкодження піноутворювачів або їх робочих розчинів шляхом їх деструкції будь-яким способом з утворенням речовин у концентраціях, безпечних для здоров'я людей і довкілля.

Для ПУ потрібно кожного року проводити контроль якості. На основі результатів такого контролю приймається рішення про регенерацію або списання ПУ. Процес регенерації проводиться згідно з інструкцією заводу-виробника. В разі неможливості регенерації ПУ можна використовувати як змочувач під час гасіння пожеж класу «А». Також деякі ПУ можна застосовувати в якості водних розчинів миючого (знежирювального) засобу у процесі очищення забруднених металевих поверхонь. Біологічно «м'які» піноутворювачі, які не підлягають регенерації й утилізації, допускається скидати у виробничі стічні води в разі розведення їх водою до гранично допустимої концентрації ПАР, що дорівнює 20 мг/л за активною речовиною (вміст ПАР у цих піноутворювачах уточнюють у заводу-виробника) [343].

Забороняється скидання виробничих стічних вод, що містять біологічно «жорсткі» та фторовмісні ПУ, в систему каналізації населених пунктів. Знешкодження «жорстких» і фторовмісних піноутворювачів здійснюється шляхом спалювання концентрату в спеціальних печах, наявних на хімзаводах, або похованням на звалищі хімічних відходів [344]

ТОВ «ЮФПП» – український імпортер протипожежного обладнання в якості суттєвого недоліку пінного пожежогасіння відмічає необхідність утилізації піни після гасіння [345].

Розглянемо економічну складову процесу списання ВР запропонованої вогнегасної системи на основі ПС і ГУС. В такому випадку треба відмітити, що піноскло, яке було використано для гасіння світлих нафтопродуктів, може бути використане багаторазово. Важливим також є факт, що піноскло не має обмежень за часом зберігання, тоді як піноутворювачі мають обмежений час зберігання який звичайно не перевищує 10 років. Ще одним компонентом запропо-

нованої вогнегасної системи є 5 %-й розчин кальцію хлориду, який теж не має обмежень за часом зберігання. Тільки 5 %-й розчин рідкого скла має обмежений час зберігання – 200 діб. Але, по-перше, він використовується тільки під час гасіння рідин із температурою спалаху нижче 28 °С, а по друге, його маса становить лише 5 % від загальної маси вогнегасних речовин. Таким чином, можна констатувати, що запропонована вогнегасна система на основі ПС і ГУС має економічні переваги на етапі списання вогнегасних речовин.

У випадку використання піноскла для гасіння нафти й темних нафтопродуктів його гранули забруднюються смолами. В такому випадку його не можна використовувати для гасіння пожеж класу «В». Забруднене смолами піноскло потребує утилізації. На основі аналізу літератури запропоновано в якості об'єкта утилізації обрати використання гранульованого ПС для будівництва та ремонту автомобільних шляхів. Такий шлях застосування ПС широко використовується у скандинавських країнах, Канаді та РФ [346–351].

Фінансові витрати на ГУС (без урахування вартості води) для гасіння розливу ГР на всмоктуючу поверхню площею 1 м² складуть (рівняння 8.9):

$$E = 1225 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 3,68 \text{ грн.}$$

Порівняння з фінансовими витратами у випадку використання існуючих засобів пожежогасіння провести неможливо, в зв'язку з відсутністю нормативних вимог під час гасіння розливу ГР на всмоктувальну поверхню.

8.9 Висновки за розділом 8

1. За токсикологічними, екологічними та експлуатаційними характеристиками вогнегасна система на основі легких пористих матеріалів і гелеутворюючих систем відповідає встановленим вимогам і за цими параметрами має переваги, у порівнянні з повітряно-механічними пінами. Робота зі складовими вогнегасної системи потребує тільки простіших заходів захисту особового складу та техніки.

2. Приготування робочих розчинів компонентів ГУС можна проводити як завчасно, так і безпосередньо перед початком гасіння. Процес змочування піноскла треба здійснювати безпосередньо перед початком гасіння.

3. Визначено параметри подавання гранульованого піноскла та компонентів ГУС у резервуари з палаючими рідинами. Засоби подавання компонентів ГУС повинні забезпечувати роздільно-одночасне подавання рідин із дисперсністю не менше 1 мм. Розмір гранул піноскла, які подаються в резервуар, повинен бути не більше 1,5 см.

4. Розроблено рекомендації щодо гасіння пожеж резервуарів із горючими рідинами з використанням легких пористих матеріалів і гелеутворюючих систем у випадку малого та великого часу вільного горіння. Для гасіння легкозаймистих рідин треба використовувати сухе піноскло з наступним подаванням компонентів гелеутворюючої системи. Для гасіння висококиплячих

рідин треба використовувати змочене піноскло без застосування вогнегасної гелеутворюючої системи.

5. В разі гасіння розливів горючих рідин на всмоктуючі поверхні достатньо використання тільки ГУС із поверхневою витратою 3 кг/м².

6. Після гасіння світлих нафтопродуктів гранульоване піноскло можна використовувати багаторазово, в разі його попереднього висушування. У випадку гасіння темних нафтопродуктів гранульоване піноскло після попереднього висушування треба утилізувати. В якості об'єкта утилізації доцільно обрати шляхове будівництво.

7. Запропонована вогнегасна система на основі гранульованого піноскла і вогнегасних гелеутворюючих систем забезпечує зниження фінансових витрат на вогнегасні речовини у випадку гасіння рідин із температурою спалаху нижче 30 °С в 4,2 разу, у порівнянні з використанням пін. У випадку гасіння рідин із температурою спалаху вище 30 °С ця перевага складає 1,4–1,8 рази. Ще однією економічною перевагою вогнегасної системи ПС + ГУС є відсутність забруднення ГР її компонентами, що полегшує їх подальшу переробку і використання.

ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень забезпечено подолання недосконалості існуючих методів ліквідації пожеж горючих рідин за рахунок використання нових більш ефективних засобів гасіння твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими системами.

1. Вперше на основі аналізу основних механізмів припинення горіння запропоновано метод гасіння пожеж горючих рідин із використанням легких негорючих пористих матеріалів і гелеутворюючих систем, що забезпечує довготривалу стійкість вогнегасного шару до термічного впливу та його високі охолоджуючі та ізолюючі властивості.

2. Обґрунтовано застосування гранульованого піноскла в якості вогнестійкого матеріалу, що забезпечує плавучість вогнегасного шару і прийнятні екологічні та економічні параметри. Плавучість сухого піноскла в горючих рідинах змінюється в інтервалі 0,36÷0,58. Для збільшення охолоджуючої дії вперше запропоновано використовувати змочування гранул пористого матеріалу водою. Теоретично визначено та експериментально підтверджено відсутність унесення гранул піноскла такого розміру висхідними потоками палаючої рідини.

3. Обґрунтовано застосування в якості ізолюючого матеріалу гелевого шару на основі гелеутворюючих систем $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$.

4. Розроблено математичні моделі, які дозволяють оцінити ізолюючі властивості шарів твердого пористого матеріалу, гелю та бінарного шару «пористий матеріал + гель» у випадку встановлення стаціонарного режиму процесу дифузії пари ГР крізь ці шари. На їх основі встановлено, що ізолююча здатність суцільного гелевого шару перевищує ізолюючу здатність шару піноскла більш ніж на два порядки. У разі утворення суцільного шару гелю на поверхні піноскла коефіцієнт уповільнення випаровування для вуглеводневих рідин перевищує 30. На основі результатів математичного моделювання процесу випаровування пари рідини крізь бінарний ізолюючий шар, що складається з гелю, який нанесено на поверхню піноскла, встановлено, що за товщини шару гелю 2 мм та шару піноскла 5 см швидкість випаровування октану зменшується більше, ніж у 100 разів, порівняно зі швидкістю випаровування з вільної поверхні.

5. На основі розробленої математичної моделі охолоджуючої дії сухого піноскла встановлено, що сухе піноскло може припинити горіння висококиплячих рідин без застосування гелеутворюючих систем.

6. Розроблено експериментальні методи визначення охолоджуючих та ізолюючих властивостей шарів твердого пористого матеріалу, гелю і бінарного шару «гель+піноскло». За допомогою цих методів експериментально визначено охолоджуючі властивості сухого і змоченого піноскла та бінарного

шару «гель+піноскло». Встановлено, що охолоджуючі властивості змоченого піноскла в $3,9 \div 5,5$ рази більше, ніж у сухого піноскла. Експериментально визначено ізолюючі властивості шарів твердого пористого матеріалу, гелю і бінарного шару «гель+піноскло». Встановлено, що шар піноскла завтовшки 10 см уповільнює випаровування ЛЗР в $3 \div 5$ разів, а змоченого піноскла – в $2 \div 3$ рази. Експериментально встановлено, що для вуглеводневих рідин коефіцієнт уповільнення випаровування тонким суцільним гелевим шаром із поверхневою витратою $(0,13 \div 0,14)$ г/см² перевищує 25.

7. Вдосконалено існуючі експериментальні методи визначення вогнегасних характеристик речовин з урахуванням особливостей запропонованої вогнегасної системи, на основі яких встановлено, що гасіння бензину досягається за товщини шару сухого ПС 12 см з подальшим нанесенням на його поверхню шару гелю з поверхневою витратою $0,2$ г/см². Гасіння гасу, дизельного палива і машинного мастила можна досягти нанесенням змоченого піноскла з товщиною шарів 10, 4 і 3 см відповідно, без додаткового нанесення шару гелю.

8. Найкращі вогнегасні властивості має подрібнене піноскло з розміром гранул $(1 \div 1,5)$ см. Для такої фракції часток піноскла отримано найменші значення масової швидкості вигорання та найменші витрати компонентів вогнегасної системи на припинення горіння ГР.

9. Встановлені залежності товщини шару сухого та змоченого піноскла, потрібної для гасіння рідин, від температури їх спалаху дають можливість зробити такі висновки: гасіння усіх легкозаймистих рідин із температурою спалаху, меншою за 30 °С, доцільно здійснювати сухим ПС; зменшити загальну товщину шару сухого ПС, за умови гасіння легкозаймистих рідин, можна за рахунок використання ГУС з поверхневою витратою $0,2$ г/см² у разі подавання на несучий шар ПС товщиною $(10 \div 14)$ см; в разі гасіння ГР із температурою спалаху більшою за 60 °С, перевагу має змочене ПС; в інтервалі температур спалаху $(30 \div 60)$ °С сухе та змочене ПС мають близькі вогнегасні характеристики.

10. Вперше в якості засобу для подавання гранульованого піноскла рукавними матеріалопровідними лініями на поверхню палаючої рідини в резервуарі запропоновано використовувати повітряний ежекційний апарат, який був сконструйований, і виготовлено його малорозмірну модель для гасіння пожеж класу «В» невеликих розмірів.

11. Розроблено практичні рекомендації щодо застосування вогнегасних систем на основі легких пористих матеріалів і гелеутворюючих систем для гасіння пожеж резервуарів із горючими рідинами та розливів таких рідин на всмоктуючі поверхні.

12. Запропонована вогнегасна система на основі гранульованого піноскла і вогнегасних гелеутворюючих систем забезпечує зниження фінансових витрат на вогнегасні речовини у випадку гасіння рідин з температурою спалаху нижче

30 °C в 4,2 разу, порівняно з використанням пін. У випадку гасіння рідин із температурою спалаху вище 30 °C ця перевага становить 1,4÷1,8 разу.

13. Реалізацію висновків і результатів роботи здійснено шляхом використання запропонованої вогнегасної системи для гасіння пожеж класу «В» на приватному підприємстві «Спецпожтехніка2, що забезпечило зменшення побічних збитків від гасіння порівняно з пожежогасінням вогнегасною піною в 2÷3 рази. У результаті випробувань встановлено, що під час гасіння бензину за допомогою піноскла та вогнегасної гелеутворюючої системи не відбувається забруднення нафтопродукту. Позитивно оцінена можливість впровадження наданих результатів на заводі «Етилен–поліетилен» компанії SOCAR і відмічено економічну ефективність запропонованої вогнегасної системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Campbell R. Fires at outside storage tanks. *Report National fire protection association: August 2014*. URL: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports>.
2. Hylton J. G. US fire department profile. *Report: NFPA's*. April 2017. p. 39. URL: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics/Fire-service/osfdprofile.pdf>.
3. Антонов А.В., Боровиков В.О., Орел В.П. та ін. Вогнегасні речовини: посібник. К.: Пожінформтехніка, 2004. 176 с.
4. Шароварников А.Ф., Молчанов В.П., Воевода С.С., Шароварников С.А. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. М.: Калан, 2002. 448 с.
5. Боровиков В. Гасіння пожеж у резервуарах для зберігання нафти та нафтопродуктів. *Пожежна та техногенна безпека*. 2015. №11(26). С. 28–29.
6. Ковалишин В.В., Васильєва О.Е., Козяр Н.М. Пінне гасіння. Львів: СПОЛОМ, 2007. С. 137–138.
7. Ivanković T., Hrenović J. Surfactants in the environment. *Arh. Hig. Rad. Toksikol.* 2010. Vol. 61. № 1. P. 95–110.
8. Olkowska E., Polkowska Ż., Namieśnik J. Analytics of surfactants in the environment: problems and challenges. *Chem. Rev.* 2011. V.111. №9. P. 5667–5700.
9. Scott M. J., Jones M. N. The biodegradation of surfactants in the environment. *Biochim. Biophys. Acta.* 2000. Vol. 1508. № 1-2. P. 235–251.
10. Ying G. G. Fate, behavior and effects of surfactants and their degradation products in the environment. *Environ. Int.* 2006. Vol. 32. № 3. P. 417–431.
11. Щербань Н. Г. Биохимические механизмы нарушений в организме теплокровных под воздействием химических соединений. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. № 5/6 (59). С. 29–33.
12. Щербань Н. Г., Жуков В. И., Мясоєдов В. В. Биохимические аспекты экологической патологии, связанной с химическим загрязнением поверхностных источников водоснабжения. Харьков, 2011. 175 с.
13. Бочаров В. В., Раевская М. В. Использование перфторированных ПАВ в пенообразователях – «второе пришествие». Галогенорганика с наихудшим сценарием развития для обитателей Земли. *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т.22. №10. С. 75–82.
14. Безродный И.Ф. Экология пожаротушения – пока это только слова. *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т.22. №6. С. 85–90.
15. Грошев А. Д., Переславцева И. И. Преимущества установок пожаротушения диоксидом углерода при ликвидации горения в резервуарах с нефтепродуктами. *Пожаровзрывобезопасность*. 2016. Т.25, № 12. С. 69–75.
16. Пенообразующий состав термостойкой пены на основе хмеля: 2452544 RU. Тайсумов Х.А. Заявл. №2011105291/05; 15.02.11, опубл. 10.06.12.
17. Дадашов И. Ф., Киреев А. А. Повышение эффективности тушения горючих жидкостей в резервуарах путем использования гелеобразующих средств. *Proceedings of Azerbaijan state marine academy*. 2016. № 2. С. 72–76.

18. Дадашов И. Ф., Киреев А. А., Шаршанов А. Я. и др. Моделирование изолирующих свойств гелеобразного слоя по отношению к парам горючих жидкостей. *Проблемы пожарной безопасности*. 2016. № 40. С. 78–83.
19. Дадашов И. Ф., Киреев А. А., Жерноклёв К. В. Исследование изолирующих свойств гелеобразного слоя по отношению к парам токсичных и горючих жидкостей. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку*: матеріали 19 Всеукр. НПК, м. Київ, 2017. С. 136–139.
20. Дадашов И. Ф., Киреев А. А., Михеенко Л. А. Выбор лёгкого силикатного носителя для гелевого огнетушащего слоя при пожаротушении. *Керамика: наука и жизнь*. 2016. № 2 (31). С. 44–51.
21. Дадашов И. Ф., Киреев А. А., Шаршанов А. Я. Замедление испарения жидкости слоем гранулированного материала, нанесённого на её поверхность. *Проблемы пожарной безопасности*. 2017. № 41. С. 53–58.
22. Дадашов И. Ф., Киреев А. А., Шаршанов А. Я. и др. Экспериментальное исследование влияния характеристик гелеобразного слоя на его изолирующие свойства по отношению к парам органических жидкостей. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2017. № 26. С. 43–48.
23. Дадашов И. Ф., Киреев А. А., Трегубов Д. Г. и др. Экспериментальное исследование влияния скорости ветра на изолирующие свойства гелеобразного слоя по отношению к парам токсичных и горючих жидкостей. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2018. № 27. С. 17–24.
24. Дадашов И. Ф., Киреев А. А. Предварительные компоненты геле- и пенообразующих составов для тушения горючих жидкостей. *Азербайджанское нефтяное хозяйство*. 2016. № 9. С. 63–65.
25. Дадашов И. Ф., Киреев А. А. Экспериментальне дослідження впливу шару гранульованого піноскла на горіння бензину. *Пожежна безпека*. 2017. №31. С. 36–42.
26. Дадашов И. Ф., Трегубов Д. Г., Киреев А. А., Тарахно Е. В. Исследование влияния толщины слоя гранулированного пеностекла на горение жидких углеводородов. *Вестник КТИ*. 2018. №4(32). С. 47–54.
27. Дадашов И. Ф., Киреев А. А., Жерноклёв К. В. Исследование испарения бензина через слой гранулированного пеностекла. *Пожежна безпека. Проблеми та перспективи*: Всеукр. НПК. Х.: НУЦЗУ, 2018. С. 3–5.
28. Дадашов И. Ф., Киреев А. А., Жерноклёв К. В. Исследование влияния толщины слоя гранулированного пеностекла на горение органических жидкостей. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: IX міжнар. НПК, 18–19.05.2018. Черкаси. С. 165–167.
29. Дадашов И. Ф., Киреев А. А., Сенчихин Ю. Н. и др. Решение проблем эффективного тушения резервуаров с горючими жидкостями с использованием твердых пористых материалов. *Безопасность в ЧС*: Междунар. НПК, Баку. 2018. С. 39–45.
30. Дадашов И. Ф., Киреев А. А., Трегубов Д. Г. Теоретические аспекты изоляции поверхности аварийного разлива опасных жидкостей. *Проблеми екології та екологічної безпеки*: V междунар. заоч. НПК. Минск. 05.06.2018 г. С. 23–25.

31. Дадашов И. Ф., Киреев А. А., Трегубов Д. Г. Теоретические аспекты изоляции поверхности аварийного разлива опасных жидкостей. *Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы*: XII Междунар. НПК. Минск. 04–05.04.2018 г. С. 113–115.

32. Дадашов И. Ф., Лобойченко В. М., Киреев А. А. Сравнительная оценка экологического ущерба при использовании гелеобразующих систем различного состава в пожаротушении горючих жидкостей. *Вісник КрНУ ім. Осроградського*. 2018. Вип. 1(108). С. 123–129.

33. Dadashov I., Loboichenko V., Kireev A. Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. *Pollution Research Paper*. Vol 37, Issue 1. 2018. P. 63–77.

34. Дадашов И. Ф., Киреев А. А., Жерноклёв К. В. Пути повышения экологических характеристик средств тушения горючих жидкостей. *Техногенно-екологічна безпека*. 2017. № 1. С. 39–43.

35. Dadashov I. F., Loboichenko V. M., Kireev A. A., Gurbanova M. A. Using of environmentally friendly gel-forming systems in fire fighting petroleum products. *Natural disasters and human life safety: international scientific-technical conference*. Baku, 04–06.12.2017. P. 127–128.

36. Дадашов И. Ф., Трегубов Д. Г., Киреев О. О. Екологічний підхід до ізоляції розливу токсичних рідин. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*: матеріали V Міжнародного конгресу, 26–29.09.2018 р., Львів. 2018. С. 109.

37. Дадашов И. Ф., Киреев А. А., Лобойченко В. М. и др. Подходы к исследованию экологических характеристик гелеобразующих систем, используемых при тушении нефтепродуктов. *Materials of XIII International scientific-technical conference*, ADDA. Baku. 2018. P. 201–206.

38. Дадашов И. Ф., Ковалёв А. А. Обоснование конструкции и методики расчёта конструктивно-технологических параметров эжекционного аппарата применяемого при пожаротушении. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2017. №44(1266). С. 122–129.

39. Дадашов И. Ф., Ковальов О. О., Хмиров И. М. та ін. Обґрунтування конструкції та методика розрахунку конструктивно-технологічних параметрів ежекційного апарату, застосовуваного під час пожежогасіння. *Науковий вісник НЛТУ України*. Т.28. №11. 2018. С. 101–107.

40. Дадашов И. Ф., Ковальов О. О., Калиновський А.Я. та ін. Розрахунок геометричних параметрів ежекційного апарату застосовуваного при пожежогасінні. *Комунальне господарство міст*. 2018, Вип. 7 (146). С. 167–173.

41. Дадашов И. Ф., Ковалев А. А. Обоснование конструкции эжекционного аппарата для подачи пеностекла. *Пожежна безпека. Проблеми та перспективи*: збірник тез доповідей Всеукр. НПК, Харків, 2018. С. 103–105.

42. Дадашов И. Ф., Ковалёв А. А. Обоснование параметров конструкции эжекционного аппарата, применяемого при пожаротушении. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: матеріали IX Міжнар. НПК, 18-19.05.2018. Черкаси. С. 167–170.

43. Дадашов І. Ф., Трегубов Д. Г., Сенчихін Ю. М., Кіреєв О. О. Напрямки вдосконалення гасіння пожеж нафтопродуктів. *Науковий вісник будівництва*. т.94. №4. 2018. С. 238–249.

44. Dadashov I. F., Kireev A. A., Sharshanov A.Ya. et al. Simulation of the properties two-layer material. *Functional materials*. 2018. v.25. №4. P. 774–779.

45. Дадашов І. Ф., Киреев А. А., Трегубов Д. Г. Экспериментальное исследование скорости выгорания и условий тушения модельного очага пожара класса «В» при поочередном применении гранулированного пеностекла и гелеобразующего огнетушащего вещества. *Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека*. № 2 (6), 2018. С. 70–78.

46. Дадашов І. Ф., Киреев А. А., Шаршанов А. Я. Повышение эффективности тушения горючих жидкостей в резервуарах путём использования гелеобразующих огнетушащих средств. *Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: методы, технологии, проблемы и перспективы*: материалы Междунар. заочной НПК, г. Светлая Роща, РБ, 28.04.2017 г. С. 53–58.

47. Дадашов І. Ф., Трегубов Д. Г., Киреев А. А., Тарахно Е. В. Тушение пожаров класса В бинарной огнетушащей системой на основе гранулированного пеностекла. *Актуальные проблемы пожарной безопасности, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций*: Междунар. НПК. Кокшетау. 2018. С. 123–126.

48. Спосіб гасіння пожеж горючих та легкозаймистих рідин в резервуарах: пат. №128050 UA. Дадашов І. Ф., Ковальов О. О., Кіреєв О. О.; заявн. та патентовл.: НУЦЗУ. №u201804056, заявл. 13.04.2018; опубл. 27.08.2018. Бюл. № 16. 3 с.

49. Дадашов І. Ф., Ковалёв А. А., Васильев С. В. Способ подслоного тушения горючих и легкоспламеняющихся жидкостей в резервуарах. *Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку*: матеріали 20 Всеукр. НПК, 09-10.10.2018. Київ. С. 155–157.

50. Дадашов І. Ф., Ковалёв А. А., Васильев С. В. Способ подслоного тушения горючих и легковоспламеняющихся жидкостей в резервуарах. «*Национальная стратегия по снижению рисков ЧС в Республике Беларусь на 2019–2030 годы*»: материалы междунар. НПК, Минск, 2018. С. 67–68.

51. Спосіб гасіння резервуарів з горючими та легкозаймистими рідинами: пат. №123563 UA. Дадашов І. Ф., Кіреєв О. О., Тарадуда Д. В.; заявн. та патентовл.: НУЦЗУ. № u201710836, заявл. 06.11.2017; опубл. 26.02.2018, Бюл. №4. 4 с.

52. Спосіб гасіння горючих або легкозаймистих рідин плавучою зернистою системою: пат. №133144UA. Дадашов І. Ф., Кіреєв О. О., Трегубов Д.Г. та ін.; заявн. й патентовл.: НУЦЗУ. №u201810297, заявл. 17.10.2018, оп. 25.03.2019. Бюл. № 6. 4 с.

53. Дадашов І.Ф. Дослідження властивостей вогнегасної системи на основі піноскла. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2018, № (2) 28. С. 39–56.

54. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Ч.1. М.: Пожнаука, 2004. 713 с.

55. Блинов В. И., Худяков Г. Н. Горение жидких бассейнов. М.: ДАН СССР, 1957. Т. 113, № 25. 1094 с.

56. Блинов В. И., Худяков Г. Н. Диффузионное горение жидкостей. М.: АН СССР, 1961. 208 с.

57. Блинов В. И., Худяков Г. Н. К вопросу о распределении температуры в нефтепродуктах, сгорающих в цилиндрических резервуарах. М.: АН СССР, 1958. 23 с.

58. Блинов В. И., Худяков Г. Н., Петров И. И. и др. О движении жидкости в резервуаре при перемешивании ее струей воздуха. *Механизм тушения пламени нефтепродуктов в резервуарах*. М.: МКХ РСФСР, 1958. С. 7–22.

59. Петров И. И., Реутт В. Ч. Тушение пламени жидких топлив методом перемешивания. *Новые способы и средства тушения пламени нефтепродуктов*. М.: Гостехиздат, 1960. С. 30–83.

60. Петров И. И., Реутт В. Ч. Тушение пламени горючих жидкостей. М.: МКХ РСФСР, 1961. 143 с.

61. Баратов А. Н., Корольченко А. Я. и др. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения: кн. 1. М.: Химия, 1990. 496 с.

62. Корольченко А. Я. Расчет показателей пожароопасности веществ и материалов. I. Расчет температур вспышки и самовоспламенения. *Пожаровзрывобезопасность*. 2002. № 6. С. 29–31

63. Schonhacker S. Brandous Gefahren – ABC. Teil 2. *Brennbare Flussigkeiten*. 2002. № 5. P. 26–27.

64. Frapport C. Feu, flames, incendie et physico-chemie. *Bulletin Union Physics*. v.94. 2000. № 823. P. 681–699.

65. ДСТУ 3789:2015. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробувань. Чинний від 22.06.2015. К.: Держстандарт України, 2015. 18 с.

66. Бобков С.А., Бабурин А.В., Комраков П.В. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. М.: АГПС МЧС РФ, 2014. 210 с.

67. Басманов О. С., Кулакова Г. О. Оцінка швидкості висхідних потоків над осередком горіння. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2017. № 1. С. 5–10.

68. Рубцов Д. Н., Рубцов В. В. Особенности пожарной опасности нефтяных резервуаров с плавающей крышей. *Безопасность жизнедеятельности*. 2014. №9. С. 56–61.

69. Шухов В. Г. Механические сооружения нефтяной промышленности. М.: Инженер, 1883. Т. 3. Кн. 13. С. 500–507.

70. Боровиков В. Возможні сценарії розвитку пожеж в резервуарах для зберігання нафти і нафтопродуктів. *F+S*. 2014. №2 (66). С. 56–59.

71. Nash P., Whittle J. Fighting fires in oil storags tanks. Using base injection of foam. Part 1. *Fire Tehnol*. 1978. V. 14. №1. P. 15–27.

72. Meldrum D. N., Williams J.R., Gilroy D. Foam system well proven against oil tanks fires. *Fire*. 1988. № 993. P. 40.

73. Fittes D. W., Griffiths D. J., Nash P. The reason we use light Water

AFFF/AIC is because we fight. *Hazardous Cargo Bulletin*. 1988. V. 4. P. 67.

74. NFPA 11-1983. Standard of low expansion foam and combined agent system. USA. NFPA. 1983.

75. NFPA 11-1983. Standard of medium and fires fighting expansion foam systems. USA. NFPA. 1983.

76. Установки пожаротушения в хранилищах путем введения пены под слой нефтепродукта. М.: ВНИИПО, 1969. 16 с.

77. Шароварников А. Ф., Молчанов В. П. Подслоное тушение. *Пожарное дело*. 1995. №11. С. 40–41.

78. Шароварников А. Ф., Молчанов В. П. Тушение пожаров нефтепродуктов в резервуарах подачей пен в слой горючего. *Транспорт и хранение нефтепродуктов*. 1996. Вып. 8–9. С. 5–10.

79. Шароварников А. Ф., Ефимов А. А. Перспектива разработки и освоения «подслоного» способа тушения нефти и нефтепродуктов резервуарах. *Пожаровзрывобезопасность*. 1992. №1. С. 62–67.

80. Кокорин В. В. Разработка устройства для подачи огнетушащего вещества в слой ГЖ при тушении пожаров в вертикальном стальном резервуаре: дис. канд. наук. Уфа, 2013. 119 с.

81. Свиридов В., Присяжнюк В., Якименко М. та ін. Деякі проблемні питання систем протипожежного захисту нафтопереробних підприємств. *Надзвичайна ситуація*. 2013. №1. С. 36–38.

82. ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. Чинний від 01.10.1994. К.: Держкомнафтогаз України, 1994. 98 с.

83. СНиП 2.11.03–93. Склады нефти и нефтепродуктов. Противопожарные нормы. М.: ФГУП ЦПП, 2007. 20 с.

84. Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарных парках. М.: ВНИПО, 2000. 79 с.

85. НАПБ 05.035-2004. Інструкція щодо гасіння пожеж в резервуарах із нафтою та нафтопродуктами. Київ: УНДІПБ. 2004. 79 с.

86. Бердюгин Б. Б. Натиск на огонь. *Пожарное дело*. 2011. № 11. С. 34–37.

87. Taylor G. R. Compressed air foam systems in limited staffing conditions. Executive development. *Executive fire officer program*. Morristown: Fire Bureau, NFA. 1997. P. 75–111.

88. Forschungsstelle für Brandsschutztechnik: Research reports № 140, № 150. KIT. 2003. Режим доступу: <http://www.ffb.kit.edu/download/DLS2003.pdf>.

89. Lin S., Lijing W. et al. Investigation on compressed air foams fire extinguishing model for oil pan fire. *Procedia Engineering*. 2012. №45. P. 663–668.

90. Rie D.-H., Lee J.-W., Kim S. Class B fire-extinguishing performance evaluation of a compressed air foam system at different air-to-aqueous foam solution mixing ratios. *Applied Sciences*. 2016. №6. P. 191. doi:10.3390/app6070191.

91. Brooks N. CAFS – straight answers for the beginner or the experienced user. *Fire Apparatus Magazine*. 2005. URL: http://compressedairfoamsystem.com/compressed_air_foam_systems.html.

92. CAF-Systems. *Waterous Co.* URL: <http://www.waterousco.com/cafs-systems.html>.

93. Кучер В.М., Козлов В.А. и др. Влияние способа подачи пены на огнетушащую способность пены средней кратности. *Горючесть веществ и химические средства пожаротушения*. М.: ВНИИПО, 1983. № 4. С. 49–50.

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

95. Абрамов Ю. А., Басманов А. Е. Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в резервуарных парках с нефтепродуктами. Х.: АГЗУ, 2006. 251 с.

96. Тарахно О.В., Трегубов Д.Г., Коврегін В.В. та ін. Теорія розвитку та припинення горіння. Практикум. Ч. II. НУЦЗУ, 2010. 314 с.

97. Чернецький В. В. Вплив теплових факторів пожежі на цілісність вертикальних сталевих резервуарів з нафтопродуктами: дис. канд. тех. наук: 21.06.02. ЛДУБЖД. Львів, 2015. 121 с.

98. Статистика пожаров на нефтебазах. *Роснайн*. 2012. URL: http://ros-ripe.ru/clauses/statistika_pozharov_na_neftebazakh.

99. Ширяев Е. В., Назаров В. П., Майзлиш А. В. и др. Статистический анализ пожаров на объектах с обращением нефтепродуктов. *Технологии техносферной безопасности*. 2014. №3(55). URL: <http://ipb.mos.ru/ttb>.

100. Халченков О.В., Ковалець І.В. Використання моделі атмосферного переносу calpuff та моделі прогнозу погоди wgf для оперативного прогнозування наслідків довготривалого атмосферного викиду під час пожежі на нафтобазі під Васильковим у 2015 році. *Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика*. 2017. С. 49–53.

101. Краснов А. В., Садыкова З. Х. и др. Статистика чрезвычайных происшествий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности за 2007–2016 гг. *Нефтегазовое дело*. 2017. №6. С. 179–191.

102. Brushlinsky N. N., Hall J. R., Sokolov S. V., Wagner P. Fire statistics. *Int. association of fire and rescue services. CTIF*. 2006. 72 p. URL: https://www.ctif.org/sites/default/files/ctif_report11_world_fire_statistics_2006.pdf.

103. Безродный И. Ф., Корневский А. Н., Корневская В. Н. Тушение пожаров в резервуарных парках за рубежом: обзорная информ. М: ГИЦ МВД СССР, 1990. 23 с.

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

105. Chemiebrand in Melbourne. *Gefahrl. Lad.* 1991. v. 36, № 9. P. 397.

106. Seven's hour blaze at refinery. *Fire Int.* 1992. v. 16, № 133. P. 8.

107. Spectacular fire involves diesel tank. *Fire*. 1992. v. 85, № 1048. P.7.

108. Barrett J. Tank farm blast was biggest single incident for Australian brigade. *Fire*. 1993. v. 86, № 1062. P. 17–24.

109. Brigade's resources stretched to limit after lightning strikes. *Fire*. 1994. v. 87, № 1071. P. 3–4.

110. Хосэгава К. Андзэн когагу. *J. Jap. Soc. Safety Eng.* 1989. 28, № 3. P. 167–175.
111. Pais P. R. Naples: agip storage tanks on fire. *Fire and Water.* 1986, 3, № 3. P. 127–131.
112. Haynes J. G., Stein G. P. Canadian fire department profile 2014–2016. *NFPA Research.* 2018. 2/18. P. 1–29.
113. Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках. М.: ВНИИПО, 1999. 46 с.
114. Статут дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби. Київ, МНС України. 2012. 42 с.
115. Сенчихін Ю. М., Сировий В. В., Тарахно О. В. та ін. Довідник керівника гасіння пожеж. Київ: Літера-Друк, 2016. 320 с.
116. Баратов А. Н., Иванов Е. Н. Пожаротушение на предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности. М.: Химия. 1979. 368 с.
117. Тихомиров В. К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1983. 264 с.
118. Carlson G. P. What's all the talk about class A foam? *Fire Eng.* 1991. V.144, № 10. P. 10–12.
119. ДСТУ 3789-98. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробувань. К.: Держстандарт України, 1999. 18 с.
120. Абдурагимов И. М., Говоров В. Ю., Макаров В. Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. М.: ВИПТШ, 1980. 256 с.
121. Свиридов В. А. Деякі питання щодо гасіння пожеж на нафтопереробних підприємствах. *15 всеукр. НПК рятувальників.* Київ. 2013. С. 253–255.
122. Хиль Е. И., Шароварников А.Ф., Бастриков Д.Л. О тушении пламени горящих нефтепродуктов подачей пены под слой и на их поверхность. *Технологии техносферной безопасности.* №6(64), 2015г. С. 1–7. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb>.
123. Fossa M., Devia F. A model for radiation evaluation and cooling system design in case of fire in tankfarms. *Fire Safety Journal.* 2008. V.43, №1. P. 42–49.
124. Hadjisophocleous G. V., Sousa A. C., Venart J. E. A study of the effect of the tank diameter on the thermal stratification in LPG tanks subjected to fire engulfment. *Journal of Hazardous Materials.* 1990. V. 25, № 1–2. P. 19–31.
125. Zhao B. Temperature-coupled field analysis of LPG tank under fire based on wavelet finite element method. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 2014. V. 117, № 1. P. 413–422. DOI: 10.1007/s10973-014-3653-2.
126. Грицина І. М., Грицина Н. І., Лефтеров О. А. Схема отримання компресійної піни та диспергованої води. *Проблеми пожежної безпеки.* 2016. №39. С. 78–83.
127. Теплов Г. С., Шароварников А. Ф., Дяглева Л. К. и др. Водные огнетушащие составы с хладонами. *Пожарная техника и средства пожаротушения.* 1991. С. 117–126.
128. Шароварников А. Ф., Аксёнов В. П., Слепченко В. Ф. и др. Тушение горючих жидкостей распыленной водой с самовспенивающейся добав-

кой. *Пожарная техника. Средства и способы пожаротушения*. М.: ВНИИПО, 1992. С. 148–151.

129. Киреев А. А., Коленов А. Н., Мелешенко Р.Г. Исследование огнетушащей способности пенообразующей системы $Al_2(SO_4)_3 + NaHCO_3$ с добавлением ПО ТЭАС. *Проблемы пожарной безопасности*. 2012. №31. С. 75–79.

130. Киреев А. А., Коленов А. Н. Пути повышения эффективности пенного пожаротушения. *Проблемы пожарной безопасности*. 2008. №24. С. 50–53.

131. Киреев А.А., Коленов А.Н. Исследование пенообразования в пенообразующих системах. *Проблемы пожарной безопасности*. 2009. №25. С. 59–64.

132. Киреев А. А., Коленов А. Н. Исследование кинетики разрушения пен. *Проблемы пожарной безопасности*. 2011. №29. С. 66–69.

133. Арсланов Р.М., Бакиров И.К., Зиннатуллин Р.М. Проблемы тушения резервуаров и резервуарных парков. *FireTactics*: интернет конференция по пожарной тактике.. 2014. URL: <http://fireconf.ru/проблемы-тушения-рвс/>.

134. Корольченко Д.А., Шароварников А. Ф. Факторы, снижающие эффективность подслоного способа тушения. *Пожаровзрывобезопасность*. 2016. т.25, №4. С. 56–67.

135. Prau V., McLauhling P., Smith J. Fire-fighting storage tanks. *Fire Engineering*. 1988. V.141. №3. P. 20–27.

136. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф., Дегаев Е.Н. Огнетушащая эффективность пены низкой кратности. *Науч. обозрение*. 2015. № 8. С. 114–120.

137. Кузьмицкий В.А., Пармон В.В., Сидоров Р.И. и др. Повышение эффективности систем тушения пожаров в резервуарах нефти и нефтепродуктов при подаче воздушно-механической пены низкой кратности в слой горючего. *Пожарна безпека: теорія і практика*. 2012. №12. С. 60–70.

138. Хиль Е. И., Саутиев М.И., Шароварников А.Ф. и др. Сравнительная огнетушащая эффективность углеводородных и фторсодержащих пенообразователей. *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. т.24, №2. С.71–76.

139. Корольченко Д. А., Волков А. А. Тушение горючих жидкостей пеной из плёнообразующих пенообразователей. *Пожаровзрывобезопасность*. 2017. т.26, №8. С.45–55.

140. Shaluf J. M., Loss J. J. Floating roof storage tank boilover. *Prevention in the Process Industries*. 2011. v.24. p.1–7.

141. Кокорин В. В., Романова И. Н. Проблемы эффективного тушения пожаров вертикальных стальных резервуаров в слой горючего. *Нефтегазовое дело*. 2012, № 3. С.255–262.

142. Волков Р.С., Войтков И.С., Высокоморная О.И. Особенности тушения жидких топлив и органических жидкостей распыленной водой. *Пожаровзрывобезопасность*. 2016. Т. 25, №4. С. 68–75.

143. Анисимов И. В. Перевод систем пожаротушения резервуарных парков с нефтью с подачей пены сверху на подслоное пожаротушение на существующих объектах: *3 региональная конф.* Томск: 2011. С. 329–324.

144. Черневич О. В., Малашенко С. М., Палубец С. М. Тушение пожаров в резервуарах с использованием оперативной врезки. *Науковий вісник Українського НДПБ*. 2011. № 1 (23). С. 19–25.

145. Минкин Д.Ю., Малашенко С.М., Смиловенко О.О. Повышение эффективности подслоного тушения резервуаров с нефтепродуктами. *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2016. № 1 (37). С. 47–54.
146. Buck R.C., Franklin J., Berger U. et al. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: terminology, classification, and origins. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2011. № 4. V. 7. P. 513–541. DOI: 10.1002/ieam.258.
147. Giesy J. P., Naile J. E., Khim J. S. et al. Aquatic toxicology of perfluorinated chemicals. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2010. №202. P. 1–52. doi: 10.1007/978-1-4419-1157-5_1.
148. Martin J. W., Smithwick M. M., Braune B. M. et al. Identification of long-chain perfluorinated acids in biota from the Canadian Arctic. *Environ Sci. Technol.* 2004. № 38. P. 373–380.
149. Kannan K., Corsolini S., Falandysz J. et al. Perfluorooctanesulfonate and related fluoro-chemicals in human blood from several countries. *Environ Sci. Technol.* 2004. № 38. P. 89–95.
150. Экологические аспекты использования пенообразователей «Аквафом». Пожнефтехим. 2019. URL: <https://www.pnx-spb.ru/penoobrazovateli/environmental-aspects/> (Дата звернення: 30.05.2019).
151. Воевода С. С., Макаров С. А., Маркеев В. А. и др. Плёнкообразующее действие фторсинтетической пены на поверхности углеводородных и углеводородно-спиртовых смесевых топлив. *Пожаровзрывобезопасность*. 2006. Т.15. №6. С. 55–57.
152. Боровиков В. О., Слущька О.М. Щодо визначення ефективності піноутворювача у разі гасіння моторного пального з полярними добавками. *Науковий вісник. Цивільний захист та пожежна безпека*. 2017. № 1(3). С. 78–83
153. Вспененный гель кремнезема, применение вспененного геля кремнезема в качестве огнетушащего средства и золь-гель способ его получения: пат. 2590379 RU. Абдурагимов И.М., Виноградов А.В., и др. Заявит. ООО «СОПОТ». №2015110625/05; 26.03.2015; опубл. 10.07.2016, Бюл. №19.
154. Пожежа на нафтобазі БРСМ біля Василькова. URL: <https://www.google.com/search?q=пожар+в+васильково&>. (Дата звернення: 30.05.2019).
155. Пожежа на нафтобазі БРСМ. URL: http://uacrisis.org/ru/26602-igor_shevchenko. (Дата звернення: 30.05.2019).
156. Резервуары для хранения топлива и сырья были сожжены... в селе Химиков города Сумгаит. *Ежедневная хроника*. 2012. URL: <http://www.fhn.gov.az/index.php?aze/news/xronika/2012/9/18/4303/3>.
157. Gsell J. Assessment of fire suppression capabilities of water mist – fighting compartment fires with the catting extinguisher. Ulster: Ulster University. 2010. 138 p.
158. Копылов Н. П. Тушение диф. факела пламени распыленной водой. *Пожарная безопасность*. 2015. №3. С. 109–113.
159. Снегирёв А. Ю., Талалов В. А., Степанов В. В. Испарение жидкости и диффузионное горение конденсированных топлив. СПб.: СПбПУ. 2017. 218 с.

160. Блинов В. И. О некоторых вопросах, относящихся к горению и тушению пламени жидкостей в резервуарах. *Новые способы и средства тушения пламени нефтепродуктов*. 1960. С. 22–29.

161. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Анализ двойственного механизма тушения пламени. *Пожаровзрывобезопасность*. Т. 23. Спецвыпуск. С. 114–123.

162. Герасимов А. А., Петров И. И., Реутт В. Ч. Тушение пламени нефтепродуктов распыленной водой. *Новые способы и средства тушения пламени нефтепродуктов*. 1960. С. 84–98.

163. Баратов А. Н. Некоторые проблемы пожаротушения. *Горение и проблемы тушения пожаров*: матер. VII Всесоюз. НПК. 1981. С. 3.

164. Баратов А. Н., Иванов Е. Н. Пожаротушение на предприятиях химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. М.: Химия, 1971. 365 с.

165. Rasbash D. J. The extinction of fires by water sprays. *Fire Res. Abstr. Rev.* 1962. V. 4, № 12. P. 28–53.

166. Абдурагимов И. М., Вальчковский С. К., Ринков К. М. и др. О повышении эффективности и коэффициента использования воды огнетушащих составов при тушении пожаров твердых горючих материалов. *Проблемы противопожарной защиты зданий и сооружений*. 1978. №3. С. 18–19.

167. Андросов А. С., Лобода Н. В., Чернышов Н. Б. Исследование основных параметров тушения полимеров водой. *Противопожарная техника и безопасность*. 1981. С. 47–53.

168. Кухто А. Н., Панин Е. Н. Зависимость времени тушения от интенсивности подачи воды. *Пожаротушение*. 1984. С. 84–93.

169. Аксенов В. П., Ройко В. М., Гришин В. В. Экспериментальное исследование тушения пламени горючих жидкостей распыленной водой. *Горение и проблемы тушения пожаров*. 1979. С. 240–245.

170. Гришин В. В., Аксенов В. П., Росляков В. И. и др. Тушение пламени проливов горючих жидкостей в помещениях распыленной водой. *Пожарная техника и тушение пожаров*. 1979. С. 5.

171. Панин Е. Н. Методика определения огнетушащей способности воды. *Пожаротушение*. 1984. С. 77–84.

172. Fuchs P. On the extinguishing effect of various extinguishing agents and extinguishing methods with different fuels. *Fire Safety J.* 1984. V.7, №2. P. 165–175.

173. Методика определения интенсивности подачи распыленной воды при тушении пожаров горючих веществ и материалов в помещениях экспресс-методом применительно к спринклерно-дренчерным системам пожаротушения. М.: ВНИИПО, 1980. № 54. 16 с.

174. Горшков В. И. Применение интегрального теплового баланса в задачах тушения пламени. *Пожарная профилактика технологических процессов в промышленности*. 1987. С. 26–35.

175. Горшков В. И., Попов С. А. Тушение пламени охлаждением поверхности горячей жидкости. *Исследование процессов водопенного тушения пожаров*. 1987. С. 4–11.

176. Горшков В. И. Тушение пламени горючих жидкостей. М.: Пожнаука, 2007. 267 с.

177. Goodman T. R. The heat-balance integral and its application to problems involving a change of phase. *Trans. Am. Mech. Eng.* 1958. V.80. P. 335–342.

178. Шароварников А. Ф., Корольченко Д. А. Влияние дисперсности капель воды на эффективность тушения пожаров горючей жидкости. *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22, № 12. С. 69–74.

179. Думилин А. И. Параметры тушения пламени ГЖ распыленной водой. *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22, №4. С. 85–89.

180. Копильний М. І., Бенедюк В. Г., Стилик І. С. та ін. Підвищення ефективності роботи внутрішнього протипожежного водопроводу додаванням до води натрієвого скла. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2015. №20. С. 47–52.

181. Иванов А. В., Торопов Д. П., Ивахнюк Г. К. Исследование огнетушащих свойств воды и гидрогелей с углеродными наноструктурами при ликвидации горения нефтепродуктов. *Пожаровзрывобезопасность*. 2017. Т. 26. № 8. С. 31–44.

182. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф. Особенности тушения пламени высокодисперсными газоаэрозольными системами. *Пожаровзрывобезопасность*. 2014. Т. 23. № 10. С. 67–72.

183. Способ тушения пожара на поверхности горючей жидкости и устройство для его осуществления: пат. 2129031 RU; Демин В. П., Ребров Е. Н., Смирнов П. М.: заявл. № 97113781 RU, 18.08.1997; опубл. 20.04.1999.

184. Меркулов В. А., Кузьменко К. П., Кирсанов А. И. Тушение диоксидом углерода пожаров в вертикально стоящих резервуарах с нефтью и нефтепродуктами. *Пожаровзрывобезопасность*. 2013. Т. 22. №3. С. 58–62.

185. Бабуров В. П., Бабурин В. В., Фомин В. И. и др. Производственная и пожарная автоматика. Ч.2. Автоматические установки пожаротушения. М: АГПС МЧС РФ, 2007. 298 с.

186. Старков Н. Н. Тушение пожаров нефтепродуктов и получение жидкого диоксида углерода твердым гранулированием: дис. к.т.н. М., 2006. 174 с.

187. Шаратов С. В., Боблак В. А. Экспериментальные исследования по применению жидкой двуокиси углерода для тушения пожаров в резервуарных парках хранения нефти и нефтепродуктов. *Вестник СПб. УГПС МЧС РФ*. 2012. №2. С. 52–57.

188. Шаратов С. В., Боблак В. А. Применение жидкой двуокиси углерода для тушения пожаров в резервуарных парках хранения нефти и нефтепродуктов. *Проблемы упр. рисками в техносфере*. 2012. Т. 22, № 2. С. 60–67.

189. Меркулов А. В., Меркулов В. А. Выбор и расчет системы газового пожаротушения. *Пожаровзрывобезопасность*. 2003. №1. С. 81–86.

190. Murphy R. F. Guidelines optimize foam fire fighting system. *Oil and gas journal*. 1982. № 4. P. 229–232.

191. Polyperfluoroalkyl substituted polyethyleneimine foam stabilizers and film formers: pat. 2014/153122 WO, Yuan Xie. Priority: Tyco fire products LP, US61/785963, 14.03.2013, Publication: 25.09.201

192. Буланов К.А. Современные решения в газовом пожаротушении. *Пожарная безопасность в строительстве*. 2011. № 1. С. 56–58.

193. Скоробагатько Т.М., Копильный М.И., Боровиков В.О. Эффективность гасіння деякими газовими вогнегасними речовинами біодизельного палива та його сумішей з дизельним паливом. *Науковий вісник. Цивільний захист та пожежна безпека*. 2017. № 1 (3). С. 73–77.

194. Иличкин В. С., Потанин Б. В., Елисеев Ю. Н. Оценка токсической опасности фторосодержащих газов, применяемых для объемного пожаротушения. *Пожаровзрывобезопасность*. 2003. №3. С. 47–52.

195. Решения IX совещания сторон Монреальского протокола по веществам, разрушающим озоновый слой. Монреаль, 1997. URL: <http://www.un.org/ru/documents/declconv> (дата звернення: 14.08.2015).

196. Production and consumption of ozone depleting substances: 1986–2004. UNEP, Ozone Secretariat, 2005. 74 p.

197. Корольченко А. Я., Шилина Е. Н. Газовое пожаротушение. *Пожаровзрывобезопасность*. 2016. Т 25. № 5. С. 57–67.

198. Корольченко А. Я. Процессы горения и взрыва. М.: Пожнаука, 2007. 266 с.

199. Буланов К. А. Газовое пожаротушение: агент нового поколения NOVEC 1230. *Системы безопасности*. 2012. URL: http://lib.secuteck.ru/articles2/sr_ob_poj_bez/gazovoe-pojarotyshenie-agent-novogo-pokoleniya-zm-novec-1230 (дата звернення: 24.09.2018).

200. Корольченко Д. А., Шароварников А. Ф., Дегаев Е. Н. и др. Тушение пламени горючих жидкостей химически активным ингибитором. *Пожаровзрывобезопасность*. 2015. Т.24, №11. С.70–76.

201. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф. Тушение горючих жидкостей высококипящими хладонами. *Пожаровзрывобезопасность*. 2014. Т.23, №5. С.67–71.

202. Способ тушения горящих гидкостей: пат. АС 1687266 SU. Стецюк В.Ф., Аблязис Р. А. и др.; заявл. № 4710559, 16.05.89; опубл. 30.10.91, Б. №40.

203. Назаров В.П., Филипчик М.В., Старков Н. Н. Тушение нефтепродуктов и полярных жидкостей в резервуаре диоксидом углерода твердым. *Пожаровзрывобезопасность*. 2006. Т 15. №5. С. 82–85.

204. Способ тушения легковоспламеняющихся жидкостей в резервуаре: пат. АС №1299599 SU. Мирошников А. Я., Дорожко А. М.; заявл. №3941551, ИПЛ УВД ХО, 13.08.1985; опубл.: 30.03.1987.

205. Клубань В. С., Фам Х. К. О безопасной откачке нефти и нефтепродуктов из горящих резервуаров. *Технологии техносферной безопасности*. 2013. № 5 (51). С. 1–5.

206. Клубань В. С., Фам Х. К. Обоснование возможности откачки нефти и нефтепродуктов из горящих резервуаров во Вьетнаме. *Пожаротушение: проблемы, технологии, новации*: материалы 2-й междунар. НТК 2013. С. 44–45.

207. Петров И. И., Реутт В. Ч. Тушение пламени жидких топлив методом перемешивания. *Новые способы и средства тушения пламени нефтепродуктов*. М.: Гостехиздат, 1960. С. 30–83.

208. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Госхимиздат, 1961. 831 с.
209. Корольченко Д. А. Тушение пламени горючих жидкостей с высокой температурой вспышки методом перемешивания слоёв с помощью воздуха и пеной низкой кратности (подслоинным способом). *Пожаровзрывобезопасность*. 2016. Т. 25, № 1. С. 61–67.
210. Земцов А. Г. Повышение эффективности систем пожаротушения для резервуаров : дис. канд. техн. наук.: 05.26.03. СПб. 148 с.
211. Шаршанов А.Я., Бабенко О.В., Луценко Ю.В. Аналіз умов самозгасання полум'я рідких вуглеводнів у напівзамкнених об'ємах. *Проблеми пожежної безпеки*. 2001. № 10. С. 109–112.
212. Metal net and metal tangle anti-fire applications: pat. 2266051 GB. Nevin L. Priority: J.R. Adams & Associates Ltd, №9204022GB; 25.02.92; p. 20.10.93.
213. Smoke and fire barrier grilles: pat. 2312842 GB. Nard D. A. Priority: №9709529GB, Environmental Seals Ltd; 12.05.97; publication 12.11.97.
214. Способ тушения и противопожарной защиты: пат. 2246976RU. Земцов А. Г., Малинин В. Р., Крутолапов А. С. и др.; заявит. и патентообл.: С.-Пб. ИГПС МЧС РФ, №2003104387; заявл. 05.02.2003; опубл. 27.02.2005. Бюл. № 6
215. Спосіб гасіння пожеж горючих і легкозаймистих рідин у резервуарі: пат. № 86258 UA. Бабенко О.В., Сенчихін Ю.М. та ін.; патентовл. УЦЗУ, №200703600; заявл. 20.04.2007; опубл. 10.04.2009. Бюл. № 7.
216. Калугин В. Д., Кустов В. М. Огнетушащие эмульсии: теория, составы, использование. Харьков: НУГЗУ, 2011. 178 с.
217. Баланюк В. М., Мельник К. В., Копистинський Ю.О. Комбінований метод гасіння сумішшю вогнегасного аерозолю та водяними сольовими розчинами. *Пожежна безпека теорія і практика*. 2015. №19. С.13–17.
218. Баланюк В.М. Пожежогасіння серіями ударних хвиль. *Проблеми пожежної безпеки*. 2016. Вип. 40. С. 26–34.
219. Баланюк В.М. Комбіновані вогнегасні системи на основі ударної хвилі та газової об'ємної вогнегасної речовини. *Пожежна безпека*. 2016. №29. С. 7–12.
220. Баланюк В.М. Вогнегасна ефективність та флегматизувальна дія поєднання вогнегасного аерозолю, газової вогнегасної речовини і ударних хвиль. *Пожежна безпека*. 2016. №29. С 6–12.
221. Способ тушения пожара и состав для его осуществления: пат. 2264242 RU. Абрамов Ю.А., Киреев А.А., Бабенко А.В. и др.; заявл. та патентовл. АПБУ, №2003237256; заявл. 23.12.2003; опубл. 20.11.2005, Бюл. №32.
222. Ostarov K.M., Senchihin Yu.M., Syrovoy V.V. Development of the installation to the binary feed of gelling formulations to the extinguishing facilities. Science and education a new demension. *Natural and technical science*. 2017. №121. P. 99–107.
223. Купка В. Ю., Киреев А. А., Жерноклёв К. В. Пути повышения эффективности тушения пожаров класса В. *Проблеми пожежної безпеки*. 2012. №31. С. 105–108.

224. Купка В. Ю., Киреев А. А., Жерноклёв К. В. Исследование стойкости гелевых слоёв на поверхностях горючих жидкостей. *Проблемы пожарной безопасности*. 2012. №32. С.84–88.

225. Купка В. Ю., Киреев А. А., Жерноклёв К. В. Выбор носителя для обеспечения плавучести гелеобразного слоя на поверхности горючих жидкостей. *Проблемы пожарной безопасности*. 2013. №33. С.98–103.

226. Киреев А. А., Купка В. Ю., Жерноклёв К. В. Исследование стойкости гелевых слоёв на поверхностях горючих жидкостей. *Проблемы пожарной безопасности*. 2012. №32. С.84–88.

227. Абрамов Ю. А., Киреев А. А. Гелеобразующие огнетушащие и огнезащитные средства повышенной эффективности применительно к пожарам класса А. Харьков: НУГЗУ, 2015. 254 с.

228. Равдель А. А. Краткий справочник физико-химических величин. Л.: Химия, 1997. 232 с.

229. Трегубов Д.Г., Петухов Р.А., Жерноклёв К.В., Савченко О.В. Підвищення ефективності локалізації надзвичайних ситуацій, пов'язаних з розливом летучих токсичних рідин шляхом використання пін із заданим часом тверднення. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2019. № 1(29). С. 37–46.

230. Трегубов Д.Г., Кіреєв О.О., Дадашов І.Ф. Гасіння пожеж класу «В» змоченим зернистим піносклом. *Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням: круглий стіл*. НУЦЗУ. 2019. С.84–85.

231. Яцишин Й. М., Вахула Я. І., Жеплинський Т. Б. та ін. Технологія скла. Ч.ІІІ: Технологія скляних виробів. Львів: Растр-7, 2011. 416 с.

232. Демидович Б.К. Пеностекло. Минск: Наука и техника, 1975. 248 с.

233. Орлов Д.Л. Пеностекло – теплоизоляционный материал XXI века. *Стекло мира*. 2003. № 2. С. 69–70.

234. Щукіна Л. П., Рищенко М. І., Міхеєнко Л. О. та ін. Технологічні параметри отримання легкого керамзиту методом екструзії. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2015. № 50. С. 127–133.

235. Скло для отримання піно матеріалу: пат. 62750 Україна. Рищенко М. І., Міхеєнко Л. О., Щукіна Л. П. та ін.; заявл. та патентовл. НТУ «ХПІ». №и 201102441; заявл. 01.03.2011; опубл. 12.09.2011, Бюл. № 17. 4 с.

236. Дадашов И.Ф. Экспериментальное исследование изолирующих свойств гелеобразного слоя по отношению к парам органических токсичных жидкостей. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2017. № 25. С. 22–27.

237. Тарахно О.В., Шаршанов А.Я. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі. Харків, 2004. 252 с.

238. Шаршанов А. Я., Кустов М. В. Моделирование атмосферных осадков для определения их противопожарного потенциала. *Проблемы пожарной безопасности*. 2013. №34. С. 186–193.

239. Басманов О. С., Кулакова Г. О. Оцінка швидкості висхідних потоків над розливом нафтопродукту, що горить. *Матеріали міжнародної НПК молодих учених*, 2018. С. 279.

240. Fawell J. The impact of inorganic chemicals on water quality and health. *Annali dell'Istituto superiore di sanita*. 1993. V. 29, № 2. P. 293–303.

241. Regulation (EC) № 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18.12.2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency, amending Directive 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No 793/93 and Commission Regulation (EC) No 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/67/EEC, 93/105/EC and 2000/21/EC. OJ L 396, 30.12.2006, p. 1–849.

242. EU Pesticides database. *European Commission*. URL: <http://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-atabase/public/event=homepage&language=EN> (Дата звернення: 30.12.2018).

243. Material Safety Data Sheet Listing. *Sciencelab*. URL: <http://www.sciencelab.com/msdsList.php>. (Дата звернення: 30.12.2018).

244. Explore chemistry. PubChem database. *National Center for Biotechnology Information*. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>. (Дата звернення: 30.12.2018).

245. Search for Chemicals. Database. *European Chemicals Agency*. URL: <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals>. (Дата звернення: 30.12.2018).

246. Коды загрязняющих веществ. *Химик*. URL: <http://www.ximuk.ru/kov/>. (Дата звернення: 30.12.2018).

247. Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals. fourth revised edition. United Nations. New York and Geneva, 2011. 568 p.

248. Hahn T., Diamond J., Dobson S., Howe P. et al. Predicted no effect concentration (PNEC) derivation as a significant source of variability in environmental hazard assessments of chemicals in aquatic systems: An international analysis. *Integrated environmental assessment and management*. 2014. V. 10, № 1. P. 30–36. doi: 10.1002/ieam.1473.

249. PubChem. *Explore Chemistry*. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/> (Дата звернення: 30.12.2018).

250. Про затвердження «Методики визначення розмірів шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через порушення природоохоронного законодавства»: наказ Мінприроди від 27.10.1997 р. № 171 (із змінами 04.04.2007). URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0285-98/print>. (дата звернення: 30.12.2018).

251. Про затвердження «Методики розрахунку розмірів відшкодування збитків, заподіяних державі внаслідок порушення законодавства про охорону та раціональне використання водних ресурсів»: наказ Мінприроди від 20.07.2009 р. №389 (із змінами 13.10.2015). URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0767-09/print> (дата звернення: 30.12.2018).

252. Справочник химика, под ред. Б.Н. Никольского. Т.2. Основные свойства неорганических и органических соединений. Л.: Госхимизд. 1963. 1169 с.

253. Наказ Мінприроди «Про затвердження Методики визначення розмірів шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через пору-

шення природоохоронного законодавства» від 27 жовтня 1997 року № 171 (Із змінами від 04.04.2007). URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0285-98/print>. дата звернення: 30.12.2018).

254. Наказ Мінприроди «Про затвердження Методики розрахунку розмірів відшкодування збитків, заподіяних державі внаслідок порушення законодавства про охорону та раціональне використання водних ресурсів» від 20.07.2009 року № 389 (Із змінами від 13.10.2015). URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0767-09/print> (дата звернення: 30.12.2018).

255. СанПиН 4630-88. Санитарные правила и нормы охраны поверхностных вод от загрязнения. Утв. зам. министра здравоохран. СССР, Главным гос. сан. врачом СССР, 04.07.1988 г. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/v4630400-88/print> (дата звернення: 30.12.2018).

256. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967. 491 с.

257. Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии. Л. Химия. 1974. 352 с.

258. Скворцов Н.А., Москвин А.В. и др. Новый справочник химика и технолога. Основные свойства неорганических, органических и элементоорганических соединений. СПб.: АНО НПО «Мир и Семья», 2002. 1280 с.

259. Онацкая А.А., Трегубов Д.Г., Киреев А.А. Экологически обоснованный подход к изоляции поверхности аварийного разлива опасных жидкостей. Исторические аспекты, актуальные проблемы и перспективы развития гражданской обороны: *Международная НПК*. Кокшетау. 2018. С. 186–188.

260. Дадашов И.Ф. Пути повышения эффективности тушения горючих жидкостей в резервуарах. *Пожарная безопасность объектов хозяйств*: междунар. видеосеминар г. Кокшетау. 2016. С.11–14.

261. Hinnant-Spencer K.M. Measuring fuel transport through fluorocarbon and fluorine-free firefighting foams. *Fire Safety Journal*. 2017. V. 91. P. 653–661

262. Puttick S. Modelling the dispersion of spills in buildings. *Symposium series. Hazards XXI. IChemE*. 2009. №. 155. P. 610–614.

263. Bubbico R., Mazzarotta B. Predicting evaporation rates from pools. *Chemical engineering transactions*. Servizi. 2016. V. 48. P. 49–54.

264. Saravanan R. A., Karunanithi T., Govindarajan L. Risk assessment methodology for toxic chemicals evaporation from circular pools. *J. Appl. Sci. Environ. Manage. JASEM*. March, 2007. V. 11 (1). P. 91–100

265. Боровиков В.О., Чеповський В.О., Слуцька О.М. Рекомендації щодо гасіння пожеж у спиртосховищах, що містять етиловий спирт, затверджені МНС України. К.: УкрНДІПБ, 2009. 76 с.

266. Кіреєв О.О. Вогнезахисті властивості силікатних гелеутворюючих систем. *Науковий вісник будівництва*. 2006. № 37. С. 188–192.

267. Шаршанов А. Я. Математическое моделирование неизотермической диффузии паров горючей жидкости сквозь зернистое покрытие. *Проблемы пожарной безопасности*. 2019. № 45. С. 179–192.

268. Дадашов И.Ф. Экспериментальное исследование испарения бензина через слой гранулированного пеностекла. *Проблемы пожарной безопасности*. 2017. № 42. С. 27–31.

269. Кіреєв О.О., Трегубов Д.Г. Можливість гасіння полярних рідин зернистим піносклом. *Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення готовності оперативно-рятувальних підрозділів до виконання дій за призначенням: круглий стіл*. НУЦЗУ, 2019. С. 65–67.
270. Андреева Л.Н., Анпёнова Е.П., Новосёлова Е.В. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. Химки: АГЗ МЧС, 2017. 32 с.
271. Дадашов І.Ф. Експериментальне дослідження охолодження горючої рідини гранулами піноскла. *Пожжежна безпека*. 2018, № 33. С. 48–52.
272. Дадашов И.Ф., Киреев А.А., Шаршанов А.Я. Повышение эффективности тушения горючих жидкостей в резервуарах путём использования гелеобразующих огнетушащих средств. *Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: методы, технологии, проблемы и перспективы: материалы международной заочной НПК, г. Светлая Роща*. 2017. С. 53–58.
273. Каретников Г.С., Козырева Н.А., Кудряшов И.В. Практикум по физической химии. М.: Высш. школа, 1996. 495 с.
274. Дадашов И.Ф. Моделювання охолодження поверхневого шару рідини, що горить, гранулами піноскла. *Проблеми пожежної безпеки*. 2018. №44. С. 20–30.
275. Полянин А. Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. М.: Физматлит, 2001, 576 с.
276. Шаршанов А. Я. Замедление массопереноса зернистой средой. *Проблеми пожежної безпеки*. 2017. № 41. С. 206–210.
277. Мчедлов-Петросян М.О., Лебідь В.І., Глазкова О.М. та ін. Колоїдна хімія. Харків: Фоліо, 2010. 499 с.
278. Киреев А.А., Трегубов Д.Г., Савченко А.В., Васильченко А.В. Экспериментальное исследование влияния толщины слоя гранулированного пеностекла на горение спиртов. *Проблеми пожежної безпеки*. 2019. №46. С. 71–79.
279. Рекомендации по тушению полярных жидкостей в резервуарах. М.: ФГУ ВНИИПО МЧСР, 2007. 58 с.
280. Дадашов І.Ф., Трегубов Д.Г., Кіреєв О.О. Вогнегасні властивості піноскла для гасіння пожеж рідин. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: X Міжнар. НПК. Черкаси*. 2019. С. 18–20.
281. Дадашов И.Ф. Экспериментальное исследование тушения нефтепродуктов огнетушащей системой на основе гранулированного пеностекла. *Теоретическая и прикладная механика*. Т. XIII, №3–4 (51–52). 2018. С. 127–133.
282. Дадашов И.Ф. Исследование влияния толщины слоя гранулированного пеностекла на горение жидкостей ряда алканов. *Вестник УГЗ МЧС Беларуси*. Т.2. №3. 2018. С.320–326.
283. Дадашов І.Ф., Трегубов Д.Г., Кіреєв О.О., Корчагіна А.П. Дослідження гасіння горючих рідин вогнегасною системою на основі змоченого гранульованого піноскла. *Проблеми пожежної безпеки*. №45. 2019. С. 34–40.
284. Стабников В.Н., Ройтер И.М., Процюк Т.Б. Этиловый спирт. М.: Пищепром, 1976. 335 с.

285. Дадашов И.Ф. Тушение горючих жидкостей в резервуарах с применением гелеобразного огнетушащего состава. *Пожарная безопасность объектов хозяйствования*: междунар. видеосеминар 30.05.2018г, Кокшетау, КТИ КЧС МВД Республики Казахстан. С. 6–9.

286. Fire Fighting Foam Principles and Ethanol-Blended Fuel. Module 5. North Carolina Department of Insurance. Office of State Fire Marshal. URL: <https://www.ncdoi.com> > Coursework > Ethanol (дата звернення 10.10.2019).

287. ДСТУ 4041:2001. Піноутворювачі спеціального призначення, що використовуються для гасіння пожеж водонерозчинних і водорозчинних горючих рідин. Загальні технічні вимоги і методи випробувань. К.: Держспоживстандарт України, 2001. 52 с.

288. ДСТУ 7143:2009. Пожежна безпека. Вогнегасні речовини-піноутворювачі. Ч. 2. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин поданою на поверхню піною високої кратності. К.: УкрНДНЦ, 2009. 34 с.

289. ДСТУ 7145:2009. Пожежна безпека. Вогнегасні речовини-піноутворювачі. Ч. 4. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водорозчинних горючих рідин поданою на поверхню піною низької кратності. К.: УкрНДНЦ, 2009. 34 с.

290. ДСТУ 7144:2009. Пожежна безпека. Вогнегасні речовини-піноутворювачі. Ч. 3. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин поданою на поверхню піною низької кратності. К.: УкрНДНЦ, 2009. С. 32 с.

291. Иванов Е. Н. Пожарная защита открытых технологических установок. М.: Химия, 1975. 200 с.

292. Кремена А. П., Свириденко Н. Ф. Модель пожара при разливе самовоспламеняющихся компонентов топлива на стартовом комплексе ракеты-носителя. *Технічна механіка*. 2010. № 4. С. 109–118.

293. Смолдырев А. Е. Гидравлический и пневматический транспорт в металлургии и горном деле. М.: Металлургия, 1967. 368 с.

294. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры. М.: Машиностр., 1972. 184 с.

295. Башкатов Д. Н. Вращательное шнековое бурение геологоразведочных скважин. М.: Недра, 1968, 192 с.

296. Григорьев А. М. Элементы теории винтовых конвейеров. *Труды КХТИ*. Казань, 1957. № 22. С. 40–43.

297. Гутьяр Е. М. Элементарная теория вертикального винтового транспортера. *Труды МИМЭСХ*, т 1 и 2. М.: МИМЭСХ, 1968, 186 с.

298. Григорьев А. М. К исследованию горизонтального шнека. *Труды КХТИ*. Казань: 1957. № 22. С. 18–24.

299. Никифоров М.Е. О работе шнека с горизонтальной и наклонной осями. *Труды КХТИ*. Казань: КХТИ, 1967. № 23. С. 14–16.

300. Никифоров М. Е., Григорьев А. М. К вопросу о теории вертикального шнека. *Торфяная промышленность*. 1988. №1. С. 16–20.

301. Александров А. Н., Косориз Г. Ф. Пневмотранспорт и пылеулавливающие сооружения на деревообрабатывающих предприятиях. М.: Леспром., 1988. 248 с.
302. Вайсман М. Р., Грубьян И. Я. Вентиляционные и пневмотранспортные установки. М.: Колос, 1984. 367 с.
303. Володин Н. П., Касторных М. Г., Кривошеин А. И.. Справочник по аспирационным и пневмотранспортным установкам. М.: Колос, 1984. 288 с.
304. Калинушкин М. П., Орловский З. Э., Сегаль И. С. Пневматический транспорт в строительстве. М.: Госстройиздат, 1961. 164 с.
305. Клячко Л. С., Одельский Э. Х., Хрусталева Б. М. Пневматический транспорт сыпучих материалов. Мн.: Наука и техника, 1983. 216 с.
306. Островский Г.М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности. Л.: Химия, 1984. 104 с.
307. Syomin D., Pavljuchenko V., Maltsev Y. et al. Vortex mechanical devices in control systems of fluid mediums. *Commission of motorization and power industry in agriculture*. ТЕКА. V.10. 2010, № 10. P. 440–445.
308. Syomin D., Rogovoy A. Power characteristics of superchargers with vortex work chamber. *Commission of motorization and power industry in agriculture*. ТЕКА. V.XB. № 19. 2010. P. 232–240.
309. Syomin D., Rogovyi A. Mathematical simulation of gas bubble moving in central region of the short vortex chamber. *Commission of motorization and energetics in agriculture*. ТЕКА. V. 12. № 4. V.12. №4. 2012. P. 279–284.
310. Molerus O. Overview: pneumatic transport of solids. *Powder technology*. 1996. T. 88. № 3. С. 309–321.
311. Аронс Г.А. Струйные аппараты. М.: ГУСЭнергоиздат, 1948. 269 с.
312. Каменев П. Н. Гидроэлеваторы. М.: Стройизд., 1970. 169 с.
313. Келлер С. Ю. Инжекторы. М.: Машгиз, 1976. 208 с.
314. Шумелишский М. Г. Эжекторные холодильные установки. М.: Госторгиздат, 1989. 160 с.
315. Lee J. W., Chung S. W., Ryu S. O. et al. Pneumatic transport characteristics of coarse size pulverized coal for the application of fast circulating fluidized bed gasification. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2017. V. 34, № 1. P. 54–61.
316. Tariq S., Dai K. Y., Mohamed S. et al. Experimental flow characterization of sand particles for pneumatic transport in horizontal circular pipes. *Powder Technology*. 2016. V. 292. P. 158–168.
317. Роговий А. С. Удосконалення енергетичних характеристик струминних нагнітачів: дис. канд. техн. наук: 05.05.17, СУНУ ім. Даля. Луганськ, 2007. 193 с.
318. Калинушкин М. П., Коппель М. А., Серяков В. С. и др. Пневмотранспортное оборудование. Л.: Машиностроение, 1986. 286 с.
319. Воробьев А.А., Матвеев А.И., Носко Г.С. и др. Пневмотранспортные установки. Л.: Машиностроение, 1969. 200 с.

320. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
321. Сьомін Д.О., Павлюченко В.О., Ремень В.І. та ін. Сполучення вихрових виконавчих пристроїв із сучасними системами управління. Луганськ: СУНУ ім. Володимира Даля, 2002. 174 с.
322. Klinzing G.E., Marcus R.D., Rizk F. at al. Pneumatic conveying of solids. A theoretical and practical approach. Powder technology series, 2-nd Edition. Chapman&HallSuffolk, 1997. 624 p.
323. Mills D. Pneumatic conveying design guide, 2nd Edition. Bitterworth-Heineman. 2004. 638 p.
324. Syomin D., Rogovyi A. Features of a working process and characteristics of irrotational centrifugal pumps. Procedia Engineering, V. 39, 2012, P. 231–237. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.029>.
325. Берман Л.Д., Ефимочкин Г. Н. Экспериментальное исследование водоструйного эжектора. *Теплоэнергетика*. 1968. № 9. С. 9–14.
326. Берман Л. Д., Ефимочкин Г. Н. Расчетные зависимости для водоструйных эжекторов. *Теплоэнергетика*. 1964. № 7. С. 44–48.
327. Уваров В. А. Разработка и исследование методики расчета конструктивно-технологических параметров противоточных струйных мельниц: дис. канд. техн. наук: 05.02.13. Белгород: БГТУ, 1996. 754 с.
328. Берман Л. Д. К выбору рационального профиля проточной части струйного аппарата. Известия ВТИ. 1976. № 3. С. 13–18.
329. Берман Л. Д., Ефимочкин Г. Н. Влияние длины камеры смешения на режим работы и экономичность водоструйного эжектора. *Теплоэнергетика*. 1978. № 12. С. 66–71.
330. Акунов В. И. Струйные мельницы. Элементы теории и расчета. М.: Машгиз, 1962. 264 с.
331. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1979. 824 с.
332. Дилгер У. Оборудование для механизации и переработки сухих и строительных смесей «М-тес». *Строительные материалы*. 2005. № 1. С. 62–63.
333. Гастерштад Т. И. Пневматический транспорт. Л.: ВСНЗ, 1927. 126 с.
334. ГОСТ 13078–91. Стекло натриево-жидкое. Технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1991. 23 с.
335. Ржаницын Б. А. Химическое закрепление грунтов в строительстве. М.: Стройиздат, 1986. 264 с.
336. Пожежний довідник. Електронний додаток користувача. 2018. URL: <https://www.google.com/search?client=avast&q=firehelper+google>.
337. Улинець Е. М. Локалізація пожеж розливів нафтопродуктів у резервуарних парках: дис. канд. техн. наук: 21.06.02. УЦЗУ. 2009. 148 с.
338. Иванов Е. Н. Расчет и проектирование систем пожарной защиты / Е. Н. Иванов. М.: Химия, 1977. 376 с.
339. Кремена А. П., Свириденко Н. Ф. Обеспечение химической и взрывопожарной безопасности проливов компонентов топлива на стартовых комплексах ракет-носителей. *Техническая механика*. 2014. № 1. С. 95–104.

340. Інструкція про порядок застосування і випробування піноутворювачів для пожежогасіння. Наказ МНС від 24.11.2008 № 851. 2008. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77849.

341. Пожарная безопасность с пенообразователем AFFF и экология – рекомендации. *Пожнефтехим. Против пожара*. URL: <https://protivpozhara.com/likvidacija-vozgoranija/modul/penoobrazovatel-aff-i-ekologija>.

342. Sharma T. P., Chimote R. S., Gupta S. B. and Singh J. Experiments On Extinction Of Liquid Hydrocarbon Fires By A Foam Technique. *Fire Safety Science*. 1994. P. 865–876.

343. Белугин Д. С. Утилизация пенообразователя для тушения пожаров с истекшим сроком годности в производстве теплоизоляционных керамических материалов. *Наука – шаг в будущее: XI НПК*. Минск: БГТУ, 2017. С. 11.

344. Порядок применения пенообразователей для тушения пожаров. Рекомендации. М.: МЧС РФ НИИПО. 2007. URL: <http://www.gosthelp.ru/text/RekomendaciiPoryadokprime.html>.

345. Пінне пожежогасіння. Ukrainian fire protection. URL: <https://ufppro.com/ua/prod-groups/pennoe-pozharotushenie>.

346. Auvinen T., Pekkala J., Forsman J. Covering the highway «e12» in the centre of Hämeenlinna – innovative use of foamed glass as light weight material of approach embankment. *The XXVIII International Baltic road conference*. Vilnius, Lithuania, 2013. P.10

347. Baklokk L. Hasopor cellular glass for the use in building and road construction applications (In Norwegian). Report STF22 F01322. SINTEF Technology and Society. 2001.

348. Frydenlund T. E., Aabøe R. O. Foamglass: a new vision in road construction. *The XXII PIARC world road congress, durban, south africa*, 2003. P. 12. URL: http://www.vegvesen.no/_attachment/110363/binary/192292.

349. Frydenlund T. E., Aabøe R. O. Use of waste materials for lightweight fills. International workshop on lightweight geomaterials. Tokyo, 2002. URL: http://www.vegvesen.no/_attachment/110356/binary/192275.

350. Meyer M., Emersleben A. Einsatzmöglichkeiten von recyceltem altglas im verkehrswegebau. *Recycling und Rohstoffe*. B.3. Berlin: Verlag, 2010. С. 441–451.

351. Коротков Е.А., Иванов К.С. Пеностекло в дорожном строительстве. *Вестник МАДГТУ*. 2016. №1 (44). С. 87–97.

Наукове видання

Дадашов Ільгар Фірдосі огли
Кіреєв Олександр Олександрович
Трегубов Дмитро Георгійович
Тарахно Олена Віталіївна

**ГАСІННЯ ГОРЮЧИХ РІДИН
ТВЕРДИМИ ПОРИСТИМИ МАТЕРІАЛАМИ
ТА ГЕЛЕУТВОРЮЮЧИМИ СИСТЕМАМИ**

Монографія

Підписано до друку 23.11.2021. Формат 60x84/16.
Папір офсетний 80 г/м². Друк офсетний. Ум. друк. арк. 14,0.
Тираж прим. Вид. № 60/21. Обл.вид арк. 12,9.
Сектор редакційно-видавничої діяльності
Національного університету цивільного захисту України
61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94

www.nuczu.edu.ua