

МІНІСТЕРСТВО УКРАЇНИ З ПИТАНЬ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

АКАДЕМІЯ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

О.В. Тарахно, А.Я. Шаршанов

**ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ВОДИ
В ПОЖЕЖНІЙ СПРАВІ**

Навчальний посібник

Харків 2004

УДК 614.841 +519

ББК 38.96

Т 19

Рекомендовано МНС України як навчальний посібник для курсантів, студентів та слухачів, які навчаються за освітньо-кваліфікаційною програмою підготовки бакалавра у напрямі 0928 "Пожежна безпека" (Лист від 19.07.04 № 06–9616/281)

Рецензенти: Альбоций В.М., начальник НДВ-1 в м. Харкові УкрНДІПБ МНС України, к.т.н.;

Радченко С.О., начальник магістратури Академії цивільного захисту України, к.т.н., доцент

Тарахно О.В., Шаршанов А.Я.

Т 19 **Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі.**
Навчальний посібник - Харків, 2004. – 252 с.

У посібнику зібрано та узагальнено відомості щодо використання води у пожежній справі. На підставі аналізу фізико-хімічних властивостей води викладено особливості використання води при вирішенні різноманітних задач пожежної безпеки, насамперед, для припинення горіння на підставі охолоджуючої та флегматизуючої дії води та для створення умов пожежної безпеки (захисту від теплових конвекційних потоків та випромінювання, а також використання води для захисту будівельних конструкцій в умовах пожежі). Розглянуто фактори, що впливають на вогнегасну ефективність води, методи та способи підвищення ефективності застосування води для гасіння пожеж.

В додатках на підставі положень гідродинаміки двокомпонентної системи надано вивід основних результатів щодо випаровування та конденсації водяної пари в газовому середовищі, а також наведено параметри гасіння фактичних пожеж.

Посібник можна використовувати у навчальному процесі при підготовці бакалаврів, спеціалістів, магістрів та ад'юнктів за спеціальністю "Пожежна безпека". Він також може бути корисним широкому колу спеціалістів (науковців та практичних працівників), які

займаються проблемами пожежної безпеки.

УДК 614.841 +519

ББК 38.96

**© Тарахно О.В., Шаршанов А.Я.,
2004**

© АЦЗУ, 2004

ВСТУП

Проблема боротьби з пожежами є важливою державною задачею, актуальність якої зумовлена збільшенням масштабів виробництва, їх інтенсифікацією, автоматизацією, хімізацією, а також застосуванням різних горючих речовин, які мають підвищену пожежонебезпеку.

Пожежі спричиняють значний матеріальний та екологічний збиток і в ряді випадків призводять до важких травм і загибелі людей. Збитки від пожеж у промислових розвинутих країнах перевищують 1% національного прибутку і мають тенденцію до постійного зростання, причому стримування збільшення розмірів цих збитків досягається лише завдяки істотному збільшенню витрат, що направляються на підвищення технічних можливостей пожежних служб і протипожежних систем. Так, за даними статистики за період з 1999 по 2003 роки в Україні виникло 277254 пожежі та загоряння (рис.1). Пожежами нанесені прямі матеріальні збитки на суму понад 346 млн. грн. На пожежах загинуло 16521 особа, з них 673 дитини, травмовано 8206 чол., знищено та пошкоджено 92766 будівель та споруд, 10709 одиниць техніки, загинуло 4013 голів худоби.

У 2003 році щоденно в Україні в середньому виникало 168 пожеж та загорянь, економічні втрати від яких складали 1,2 млн. грн., середні матеріальні втрати від однієї пожежі – 7,2 тис. грн. Кожного дня внаслідок пожеж гинуло 11 і отримувало травми 5 осіб, вогнем знищувалось 57 будівель та 7 одиниць техніки.

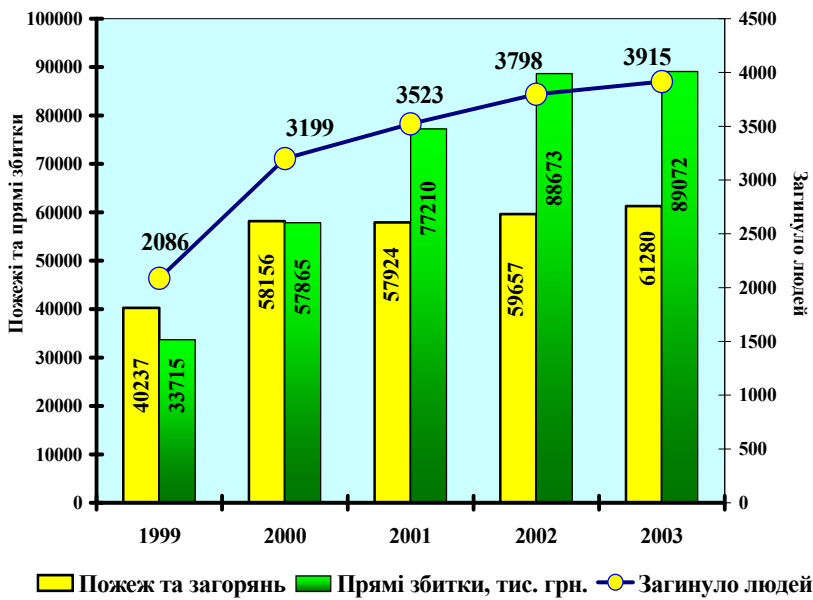


Рис. 1 - Динаміка основних показників статистики пожеж в Україні

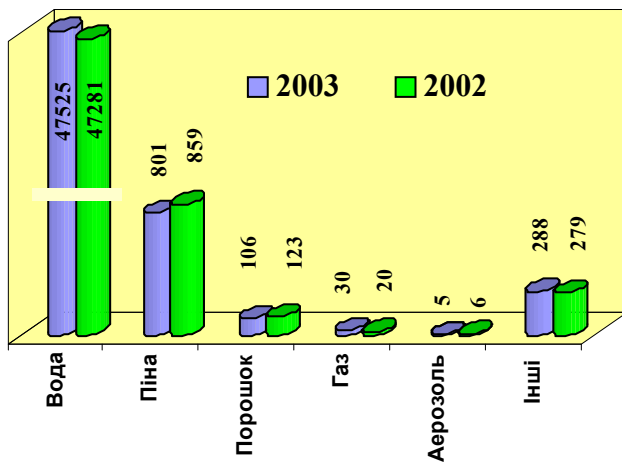


Рис. 2 - Порівняльні дані щодо використання вогнегасних речовин

Основною вогнегасною речовиною залишається вода. Дані по вогнегасним речовинам, що використовувалися для гасіння пожеж протягом 2002 та 2003 року, наведені на рис. 2. За статистикою на гасіння понад 90% від загальної кількості пожеж, які гасилися первинними засобами пожежогасіння, подавалася вода, далі йдуть порошкові вогнегасники (близько 5%), вуглекислотні вогнегасники (2%), пожежні крани (1,5%), пінні вогнегасники (0,5%), вогнегасники аерозольні (0,1%), вогнегасники хладонові (0,01%).

Незважаючи на цілий ряд позитивних результатів в розробці нових способів і засобів гасіння, що наявні в цей час на озброєнні пожежно-технічних служб, спорядження часто не відповідає сучасним і тим більше перспективним вимогам. У зв'язку з встановленням факту небезпечного впливу вогнегасних хладонів та їх продуктів розкладання на озоновий шар Землі, виникла проблема їх заміни на інші вогнегасні речовини, які за ефективністю впливу на осередок пожежі були б близькі до них і не виявляли шкідливого впливу на навколишнє середовище. В останні роки в багатьох індустріально розвинених країнах інтенсивно ведеться пошук і розробка вогнегасних речовин, які могли б стати заміною вогнегасних хладонів. Нарівні з розробкою і впровадженням в практику нових вогнегасних засобів, багато фахівців пожежної охорони продовжують приділяти пильну увагу воді як одному з найбільш широко розповсюджених і найбільш універсальних засобів, який застосовується для гасіння пожеж [1, 2].

Вода надійна й ефективна під час гасіння пожеж, пов'язаних з горінням речовин у всіх трьох агрегатних станах. Однак, при гасінні водою, в більшості випадків через недосконалість техніки подачі і розпилення води, а також внаслідок ряду інших причин не реалізуються її унікальні фізичні властивості.

Область застосування води в пожежній справі дуже різноманітна. Воду використовують для гасіння пожеж у виді суцільних і краплинних водяних струменів. Подавати воду в осередок горіння може оператор при використанні пересувних

технічних засобів подачі, чи вода може подаватися через стаціонарно встановлені зрошувачі. Вода може подаватися в зрошувачі на початковій стадії виникнення пожежі чи після закінчення певного проміжку часу з моменту виникнення пожежі (якщо подачу води включає оператор за сигналом). Усі ці особливості впливають на процес гасіння пожеж, а, отже, і потреби у воді для успішної боротьби з ними.

Факторами, що обумовлюють достоїнства води як вогнегасного засобу, є доступність і дешевина, простота збереження і застосування, відсутність отруйності і значна теплоємність, відносні хімічна інертність та термічна стійкість, яка набагато перевищує термічну стійкість інших негорючих рідин. Висока рухливість і мала стискуваність забезпечують легкість транспортування води і доставки її (у виді суцільних струменів) у зону горіння, віддалені і важкодоступні місця.

Володіючи рядом цінних якостей, воді притаманні й істотні недоліки: електропровідність (особливо за наявності домішок), відносно висока температура замерзання, що надзвичайно ускладнює застосування води за низьких від'ємних температур, порівняно мала в'язкість і високий коефіцієнт поверхневого натягу, що обумовлюють погіршену змочувальну здатність води і тим самим знижують коефіцієнт її використання в процесі гасіння.

Слід зазначити, що воду використовують не тільки для гасіння пожеж, але й в установках, призначених для створення умов пожежної безпеки. Значна теплоємність і висока теплота випаровування води забезпечують ефективне охолодження не тільки палаючих об'єктів, але й об'єктів, розташованих поблизу осередку горіння, що дозволяє запобігти руйнуванню, вибуху і загорянню останніх. Таким чином, вода є не тільки широко поширеним засобом пожежогасіння, але й універсальним охолоджуючим засобом.

Оскільки умови використання води для пожежних цілей дуже різноманітні, доцільно розділити загальну задачу на ряд самостійних, характерних для кожної конкретної області застосування води в пожежній справі.

ГЛАВА 1. ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ

Вода – найбільш популярна і найзагадковіша рідина з усіх існуючих на Землі. Протягом століть багато вчених займалися її вивченням і завдяки їх дослідженням були виявлені аномальні властивості води.

Розділ 1. Фізичні властивості води

Як відомо, вода може знаходитися в трьох агрегатних станах: твердому (лід), рідкому та газоподібному (пара). Чиста природна вода за нормальних умов – рідина без запаху, смаку та кольору.

Стан системи описується сукупністю її властивостей (або властивостей фаз – гомогенних частин системи, відділених від інших частин видимими поверхнями розділу) – температурою, тиском, масою, густиною, хімічним складом, а також зв'язками між змінами цих властивостей. На поверхнях розділу деякі параметри системи змінюються стрибкоподібно (наприклад, на межі розділу можуть стрибкоподібно змінюватися хімічний склад або густина).

Діаграма стану – наочний спосіб представлення областей існування різних фаз в залежності від зовнішніх умов, наприклад, від тиску і температури. При розгляді діаграми стану необхідно визначити кількість компонентів, число фаз та число ступенів свободи.

Число ступенів свободи f означає кількість незалежних перемінних (тиск, температура, концентрація компонентів), які визначають термодинамічний стан рівноваги системи. Значення цих перемінних можна у відомих межах довільно змінювати, не міняючи числа фаз в системі.

У випадку дистильованої води система складається з одного компонента H_2O , найбільше число фаз, які одночасно можуть знаходитися в рівновазі, дорівнює трьом. У відповідності до правила фаз Гіббса, число ступенів свободи f рівноважної термодинамічної системи, на яку із зовнішніх чинників

впливають тільки тиск і температура, дорівнює числу компонентів системи n плюс 2 і мінус число фаз k :

$$f = n + 2 - k.$$

Отже, для чистої води число ступенів свободи дорівнює нулю. Це означає, що система є інваріантною і в ній не можна змінити ні тиск, ні температуру, щоб не зникла одна з фаз. Діаграму стану води представлено на рисунку 1.1.

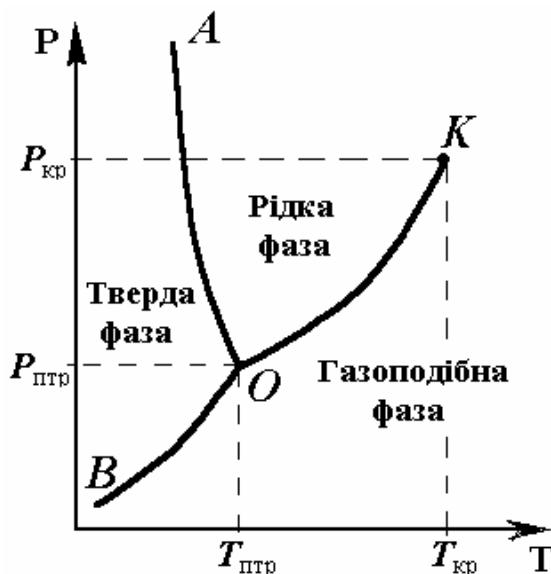


Рис. 1.1 – Фазова діаграма стану води

Звичайний лід, рідка вода і водяна пара можуть існувати в рівновазі одночасно тільки при тиску 0,61 кПа і температурі 0,0075°C. Точка співіснування трьох фаз називається **потрійною точкою** (точка O).

Крива OA відділяє область рідини від області льоду. Вона є кривою рівноваги "тверда фаза – рідина" і називається **кривою плавлення**. Ця крива показує ті взаємопов'язані пари

значень температури і тиску, за яких лід і рідка вода знаходяться в рівновазі. Крива плавлення **OA** досліджена до дуже високого тиску, де виявлено декілька модифікацій льоду.

Крива **OB** називається *кривою сублімації* і показує взаємопов'язані пари значень тиску і температури, за яких в рівновазі знаходяться тверда і газоподібна фазалід і водяна пара.

Крива **OK** розділяє області пари і рідини і являє собою залежність тиску насиченої водяної пари від температури. Навіть за низьких температур вода має помітний тиск пари (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Тиск насиченої пари води в залежності від температури

t, °C	0	20	40	60	80	100
P _{пар} , кПа	0,61	2,33	7,39	19,9	47,3	101,3

Крива **OK** показує ті взаємопов'язані значення температури і тиску, за яких рідка вода і водяна пара знаходяться в рівновазі між собою, тому вона називається *кривою рівноваги "рідина – пара"* або *кривою кипіння*.

Крива кипіння праворуч закінчується в критичній точці **K**. У критичній точці величини, що характеризують властивості рідини і пари, стають однаковими, і при цьому зникає відмінність між рідким і пароподібним станом. Значення температури, тиску та густини води в критичній точці представлені в таблиці 1.2.

В порівнянні з іншими хімічними сполуками, вода виявляє незвичайні відхилення за рядом фізичних властивостей – густиною, питомою теплоємністю, в'язкістю та ін.

Багато фізичних властивостей води мають аномальний характер. Так, речовини-аналоги води, молекули яких за хімічним складом схожі на воду, - H_2S , H_2Se , H_2Te , за кімнатної температури знаходяться в газоподібному стані. Здавалося б, вода, збережи вона такі ж властивості, повинна б за нормальних умов знаходитися в газоподібному стані, закипати при температурі -70°C , а перетворюватися в лід при -90°C .

Таблиця 1.2 – Основні фізичні властивості води при тиску
 $1,01 \cdot 10^5$ Па

Параметр	Значення
Температура замерзання, плавлення	0°C
Температура кипіння	100°C
Теплота плавлення	333,7 кДж·кг ⁻¹
Теплота випаровування при 20°C	2254 кДж·кг ⁻¹
Густина насиченої водяної пари при 100°C	0,6 кг·м ⁻³
Густина води за температури 0°C 4°C 10°C 20°C 100°C	999,84 кг·м ⁻³ 999,97 кг·м ⁻³ 999,73 кг·м ⁻³ 998,2 кг·м ⁻³ 958,35 кг·м ⁻³
Критичні константи: температура тиск густина	374,2°C 221,2·10 ⁵ Па 329 кг·м ⁻³
Питома теплоємність льоду при 0°C води при 20°C пари (у діапазоні від 100 до 1000°C)	2,035 кДж·кг ⁻¹ ·K ⁻¹ 4,178 кДж·кг ⁻¹ ·K ⁻¹ 2,52 кДж·кг ⁻¹ ·K ⁻¹
Коефіцієнт теплопровідності при 20°C	0,599 Вт·м ⁻¹ ·K ⁻¹
Коефіцієнт кінематичної в'язкості при 0°C 20°C	1,789·10 ⁻⁶ м ² ·с ⁻¹ 1,005·10 ⁻⁶ м ² ·с ⁻¹
Коефіцієнт динамічної в'язкості при 20°C	1,004·10 ⁻³ Н·с·м ⁻²
Коефіцієнт поверхневого натягу при 20°C	72,7 10 ⁻³ Н·м ⁻¹
Відносна діелектрична стала при 20°C	81
Питома електрична провідність води при 0°C 20°C 50°C	0,01x10 ⁻⁸ Ом ⁻¹ м ⁻¹ 0,04x10 ⁻⁶ Ом ⁻¹ м ⁻¹ 0,17x10 ⁻⁶ Ом ⁻¹ м ⁻¹

Однак наявність сильних міжмолекулярних зв'язків обумовлює перебування води в рідкому стані. Так, молекулу води можна розглядати як трикутну піраміду тетраедричного типу, по кутах якої розміщуються чотири заряди: два позитивних (протони) і два негативних (неподілені пари електронів кисню) [3].

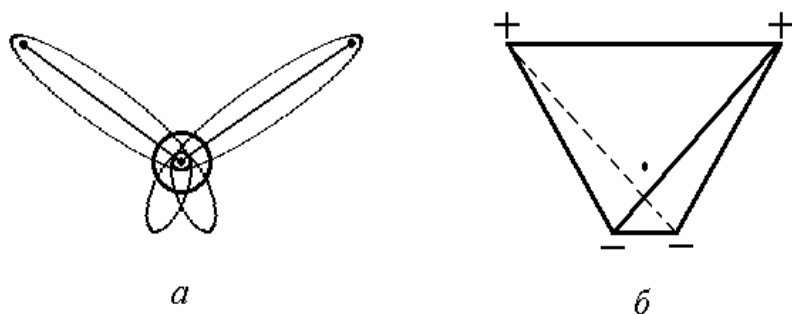


Рис. 1.2 – Модель молекули води за Н. Бьеррумом:
a – орбіталі атомів кисню і водню в молекулі H_2O ;
б – розташування крапкових зарядів нагадує тетраедричну фігуру.

Ці заряди формують своє найближче оточення, розвертаючи молекули точно певним чином, так, що між двома атомами кисню завжди знаходиться тільки один атом водню. Виникає зв'язок $\text{O-H}\cdots\text{O}$, що називається **водневим зв'язком** і визначає унікальні властивості води.

Саме наявність водневих зв'язків обумовлює аномальну залежність густини і питомої теплоємності води від температури.

Густина води залежить від температури (див. табл.1.1) і досягає максимуму при 4°C . Питомий об'єм при цьому зменшується до мінімальних значень. При зниженні температури від 4 до 0°C вода розширюється. Збільшення об'єму при замерзанні води становить близько 9% , при цьому лінійне

розширення становить 3%. Це є причиною руйнування стінок посудин, трубопроводів і шлангів при замерзанні води. У природі це явище можна спостерігати, наприклад, при замерзанні рік, озер та інших водоймищ. Вода з температурою 4°C через більшу густину опускається вниз, а лід, як більш легкий, піднімається вгору й утворює покриття, яке захищає водоймище від подальшого промерзання. При боротьбі з пожежами, завдяки цій аномалії, представляється можливим при від'ємних температурах дістати воду для гасіння з глибоких вододжерел.

Причиною такої аномалії води є зміна її молекулярної структури при зміні температури. За низьких температурах розміщення молекул у воді має "ажурний каркас" за рахунок твердості водневих зв'язків. При підвищенні температури водневі зв'язки втрачають свою жорсткість, згинаються, виникає більш щільне упакування в розміщенні молекул води. В інтервалі температур від 0 до 4°C збільшення густини, внаслідок підвищення щільності упаковки молекул, переважає над тепловим розширенням і за температури 3,98°C вода має максимальну густину. При подальшому нагріванні від 4 до 100°C спостерігається нормальне зниження густини води.

Вода має дуже високу питому теплоємність. Наприклад, за нормальних умов питома теплоємність (c_p , кДж·кг⁻¹·К⁻¹) рослинної олії становить 2,09, ацетону – 2,22, гліцерину – 2,43, парафіну – 2,91, а води – 4,18. Висока теплоємність води є наслідком витрати частини теплоти на розрив водневих зв'язків. В природних умовах вода повільно остигає і повільно нагрівається, являючись регулятором температури на землі. Крім того, при нагріванні речовини теплоємність, як правило, зростає. Однак, вода – виключення. Зміна теплоємності води з підвищенням температури аномальна: від 0 до 37°C вона падає внаслідок зменшення ступеня асоціації молекул води, і тільки від 37 до 100°C – починає підвищуватися.

З речовин, представлених у Довіднику хіміка [4], тільки 5 мають сховану теплоту плавлення вище 200 кДж·кг⁻¹: мідь, залізо, лід, алюміній, хлористий натрій. Крім того, якщо лід

оохолджувати від температури -7°C , то схована теплота плавлення падає на $2,1 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$ із кожним градусом. Таким чином, виходить, що чим холодніше лід, тим легше його розтопити.

Ще одна аномалія води полягає в тому, що при збільшенні тиску температура плавлення льоду не підвищується, а знижується. На діаграмі стану води (рис. 1.1) крива плавлення **OA** нахилена ліворуч в сторону низьких температур. Якщо ж після замерзання тиск перевищує певну величину, то утворюються інші модифікації льоду, які мають густину більшу, ніж у звичайного льоду, і навіть більшу ніж у рідкої води. Тому щільно закрита посудина з замерзлою в ній водою не розірветься, якщо перед замерзанням вода вже знаходилася під високим тиском.

Теплота пароутворення води є дуже високою. З речовин, представлених у Довіднику хіміка, тільки 7 мають сховану теплоту пароутворення вище $400 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$: піридин, анілін, сірчана кислота, ацетон, етиловий спирт, метиловий спирт і вода. Причому теплота пароутворення води більше ніж у два рази перевершує цей параметр для кожної із зазначених речовин. Ця властивість обумовлює надзвичайну охолоджуючу здатність води, що має велике значення не тільки при гасінні пожеж, але і при створенні умов пожежної безпеки.

Абсолютно чиста вода, яка не містить ніяких домішок і розчинених газів, має феноменальний поверхневий натяг. З усіх відомих на сьогодні рідин сили поверхневого натягу води за своєю міцністю поступаються тільки ртуті.

Таблиця 1.3 – Поверхневий натяг різних рідин при 20°C

Рідина	Поверхневий натяг ($\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$)
Вода	$72,8 \cdot 10^{-3}$
Бромистий етил	$24,2 \cdot 10^{-3}$
Чотирехлористий вуглець	$26,8 \cdot 10^{-3}$
Хлористий етилен	$38,7 \cdot 10^{-3}$

Поверхневий натяг рідин обумовлений тим, що стан декількох найближчих поверхневих шарів атомів, молекул або іонів цієї речовини відрізняється від стану внутрішніх шарів. На молекулу рідини, що знаходиться всередині речовини (у внутрішньому шарі), з усіх боків діють однакові сили притягання таких же оточуючих її молекул, а на поверхні розділу молекула або стикається з такими ж молекулами, але в меншій кількості, якщо це пара, або з молекулами іншої речовини. Рівнодіюча сил, що діють на молекулу, яка знаходиться на поверхні розділу фаз, спрямована всередину рідини, і тому молекули рідини прагнуть опуститися в шари, які лежать нижче. Напруженість міжмолекулярних сил в дотичних шарах на границі розділу фаз визначає потенційну енергію міжфазової поверхні, яка називається **поверхневою енергією**. Робота переведення молекул на поверхню рідини вимагає витрат енергії, характерної для кожної речовини, і називається **поверхневим натягом**. Це та робота, яку треба затратити на оборотне утворення одиниці нової поверхні розділу без зміни температури. Для води ця робота є дуже великою величиною внаслідок існування потужних сил зчеплення між молекулами (водневий зв'язок), а для вуглеводнів ця робота набагато менша.

Поверхнєве натягнення води при збільшенні температури меншає: так при 18°C воно становить $73 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$, а при $t = 100^{\circ}\text{C}$ – $52,5 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$. Таке поверхнєве натягнення забезпечує підйом рівня води в капілярній трубці діаметром 10^{-4} м на $0,15 \text{ м}$ при $t = 18^{\circ}\text{C}$. При додаванні солей поверхнєве натягнення води зростає, але незначною мірою. Здатність сильно знижувати поверхнєве натягнення води мають поверхнево-активні речовини (докладніше див. глава 3 розділ 2.1).

Велике поверхнєве натягнення обумовлює погану змочувальну здатність води. Змочування – це явище, яке виникає при контакті рідини з твердою поверхнею. Здатність рідини змочувати тверді поверхні визначає площу контакту рідини з твердим тілом.

При нанесенні краплі рідини на тверду поверхню виникають сили притягання між молекулами рідини і твердого тіла. Взаємодія рідкої і твердої фаз на границі розділу називається **адгезією**. Величина адгезійної взаємодії оцінюється роботою W_a , яку треба затратити для відриву рідини від твердої поверхні, тобто для відновлення вихідного стану контактуючих тіл.

Адгезійна взаємодія між рідкою і твердою фазами поширюється на невелику відстань вглиб рідини. Ця відстань вимірюється розмірами молекул. За мірою віддалення від поверхні твердого тіла адгезійна взаємодія зменшується, поступаючись місцем когезії. **Когезія рідини** - це взаємодія між молекулами (атомами й іонами) в об'ємі рідкої фази. При видаленні рідини з твердої поверхні можливий або адгезійний відрив по межі "рідина – тверде тіло", або когезійний відрив, якщо порушується межа "рідина – рідина". В деяких випадках має місце адгезійно-когезійна взаємодія.

Роботу адгезії необхідно відносити до одиниці площі контакту, оскільки контакт рідини з твердою поверхнею може здійснюватися на різній площі. Робота, яка визначає взаємодію рідини з твердою поверхнею і необхідна для роз'єднання контактуючих тіл, дорівнює роботі адгезії W_a , помноженій на площу зіткнення S рідини з твердим тілом:

$$W = W_a S .$$

Таким чином, для визначення роботи, яка виникає при контакті рідини з твердим тілом, необхідно знати площу контакту її з поверхнею. Ця площа визначається здатністю рідини змочувати тверді поверхні.

На практиці можуть бути реалізовані два випадки взаємодії рідини з твердою поверхнею. Якщо сили адгезії більше, ніж сили когезії, то крапля розтечеться по поверхні, тобто рідина змочить тверде тіло. Якщо сили притягання між молекулами рідини більше, ніж між молекулами рідини і твердого тіла, то рідина погано змочує чи не змочує поверхню. Від ступеня змочування залежить форма краплі. Кут, який крапля рідини

утворить з поверхнею, називається кутом змочування чи крайовим кутом θ . При змочуванні цей кут – гострий, при незмочуванні – тупий (рис. 1.3).

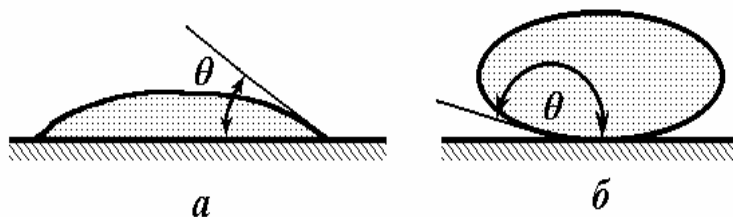


Рис. 1.3 – Крайові кути при змочуванні (а) і незмочуванні (б)

Якщо поверхня змочується водою, то її називають *гідрофільною*. Поверхні, які не змочуються або погано змочуються водою, називаються *гідрофобними чи олеофільними*, тому що вони добре змочуються неполярними рідинами.

Змочувальну здатність неможливо розрахувати, тому для її визначення використовують експериментальні методи. Одним із таких методів є метод занурення, в основі якого лежить вимірювання часу, за який шматок тканини за визначених умов зануриться в рідину. Час занурення оцінюється як критерій змочування. За іншим методом (метод краплі) вимірюється час, за який фільтр із бавовняної тканини пропустить першу краплину рідини, взяту в кількості $10 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

При попаданні краплі води на поверхню гідрофобного матеріалу площа їх контакту є дуже малою, а, отже, загальна взаємодія рідини з твердою поверхнею незначна, в результаті вода легко стікає, не проникаючи в пори матеріалу.

Швидке стікання води з поверхні твердих матеріалів обумовлено також її низькою в'язкістю.

В'язкість η – властивість рідини чинити опір необоротному переміщенню однієї її частини щодо іншої при зрушенні чи іншому виді деформації. В'язкість є реологічною характеристикою

рідини. Залежність між деформацією і напругою виражається законом Ньютона:

$$u = \eta \frac{d\gamma}{d\tau},$$

де u – напруга зрушення;

η – в'язкість рідини;

$\frac{d\gamma}{d\tau}$ – швидкість деформації.

$$\gamma = \frac{dx}{dz} \text{ – деформація.}$$

Рідини, в'язкість яких не залежить від напруги зрушення, називаються *ньютонівськими*.

Величину, зворотну в'язкості, називають *текучістю*. Оскільки час τ і координата z – незалежні перемінні, то, змінивши порядок диференціювання, одержимо, що швидкість деформації при простому зрушенні дорівнює градієнту швидкості текучості.

Отже, чим вище поверхневий натяг, тим гірше змочувальна здатність рідини і тим більше її рухливість і текучість. Це пояснюється прагненням краплі прийняти сферичну форму і протидіяти її зміні тим більше, чим вище поверхневий натяг.

В'язкість води закономірно змінюється в залежності від температури: зменшується з її зростанням. У той же час дія тиску на в'язкість води досить специфічна: з пониженням температури при помірному тиску в'язкість води знижується, хоч логічно було б чекати її підвищення, а якщо тиск значно збільшити, то поведінка води підкоряється загальному правилу.

З підвищенням концентрації розчинених у воді солей в'язкість збільшується.

Внаслідок асиметричної будови, молекула води має різко виражений дипольний характер, тобто в молекулі не співпадають центри важкості позитивних і негативних зарядів. Дипольний характер молекул води сприяє утворенню так званих "продуктів приєднання": до молекул води приєднуються молекули речовин іонної будови або ж речовин з вираженим дипольним характером.

Відносна діелектрична стала води має дуже високе значення, що зумовлює велику іонізуючу силу води.

Вода має значну електропровідність. **Електропровідність** – здатність речовини проводити електричний струм під дією прикладеного електричного поля. Параметром, що характеризує електропровідність, є коефіцієнт електропровідності, який являє собою величину, зворотну питомому омичному опору, і вимірюється в $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. У залежності від джерела, природна вода містить різні природні солі, що обумовлюють підвищення її корозійної здатності й електропровідності. Так, за наявності домішок (особливо неорганічних солей) електропровідність розчину може збільшуватися на 2–3 порядки. В таблиці 1.4 приведені для порівняння значення електропровідності води та її розчинів.

Таблиця 1.4 – Електропровідність води і деяких розчинів

Вода:	Електропровідність, $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$
чиста	0,04
дистильована	50
питна	275—1200
річкова	920—1350
морська	12500—62800
Водний розчин:	
NaCl (20%)	200000
піноутворювач (4%) в дистильованій воді	3000
піноутворювач (30%) у водопровідній воді	24000—55000

Значення величини електричного струму у водяному струмені в залежності від його довжини і кількості електроліту,

що додається, знайдені при проведенні дослідів із гасіння пожежі на лінії з напругою 6 кВ. Для гасіння використовувався ствол з насадкою діаметром 12 мм. З графіка (рис. 1.4) видно, що при використанні чистої водопровідної води електричний струм на відстані 1,5 м практично дорівнює нулю, але добавлення всього лише 0,5% соди за інших рівних умов підвищує струм до 50 мА.

$$W = W_a S.$$

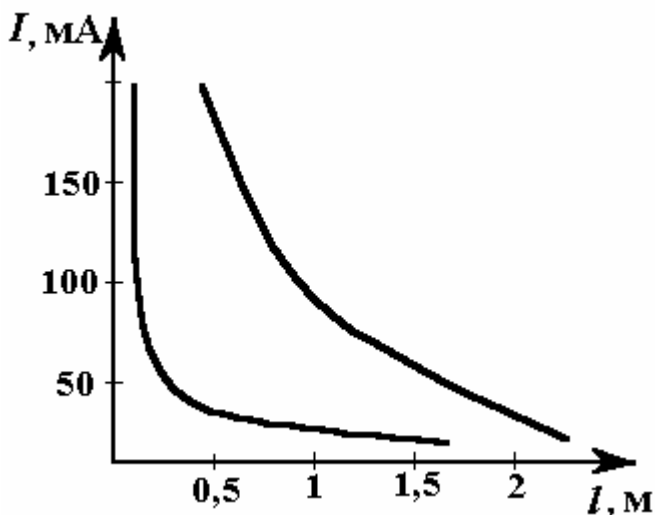


Рис. 1.4 – Залежність величини електричного струму від довжини струменя (1 – чиста водопровідна вода; 2 – 0,5%-ний розчин соди у водопровідній воді)

З вищевикладеного випливає, що воду можна застосовувати для гасіння електротехнічних установок тільки після їхнього знеструмлення чи при дотриманні визначених безпечних відстаней. Ці відстані визначаються величиною сили струму. Гранично припустимим прийнято вважати струм у 1 мА. При максимальній силі струму в 1 мА та електропровідності води $500 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ мінімальні відстані від осередку пожежі залежать від діаметра насадки ствола (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Мінімальні відстані від осередку пожежі для компактного струменя за різної напруги [5]

Напруга відносно землі, В	Мінімальна відстань (м) при діаметрі насадки, мм		
	7	18	30
115	0,5	1	2
460	0,75	3	5
3000	2	5	10
6000	2,5	6	12
12000	3	6,5	15
60000	4,5	12	22
150000	6	15	25

Дослідження показали, що при зрошенні струмопровідних частин електричних установок (напруга до 380 кВ) водою зі ствола з насадкою діаметром 12 мм з тиском на pompі $5 \cdot 10^5$ Па, мінімальна відстань між насадкою ствола і струмопровідною частиною - 12 м. При цьому струм не перевищує 1 мА. Це вірно лише для провідності до $1000 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, для більш високої провідності мінімальна відстань збільшується.

На практиці користуються наступним правилом: мінімально припустима відстань в метрах від осередку пожежі повинна бути не меншою, ніж діаметр насадки в міліметрах.

Крім того, вода не повинна попадати на електричні машини і розподільні пристрої, а також на іншу апаратуру (вимірювальні, контролюючі, регулюючі пристрої), що знаходиться в приміщенні, де виникла пожежа. З урахуванням цих обмежень можна застосовувати стаціонарні вогнегасні установки, які утворюють хмару тонкорозпиленої води, чи установки, в яких як вогнегасний засіб використовується насичена водяна пара.

Оптичні властивості води оцінюються за її прозорістю, яка, в свою чергу, залежить від довжини хвилі променя, що проходить через воду. Ультрафіолетові промені легко проходять через воду, а інфрачервоні проникають тільки в поверхневий шар і в незначній мірі. Внаслідок поглинання оранжевих і червоних компонентів видимого світла вода в шарі товщиною більше за 2 м набуває голубуватого забарвлення.

Розділ 2. Хімічні властивості води

Вода утворюється при взаємодії водню з киснем (окислювання водню), що відображається наступним стехіометричним рівнянням:



Ця реакція супроводжується виділенням тепла. За високої температури вона може протікати в зворотному напрямку: пара води здатна розкладатися з утворенням водню. Ступінь термічного розкладання (дисоціації) води α на водень і кисень залежить від температури. Залежність ступеня розкладання від температури показана в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Ступінь термічної дисоціації водяної пари при тиску 10^5 Па в залежності від температури

T, К	1000	1400	1800	2200	2400
α , %	0,00003	0,00861	0,199	1,42	2,92

Помітне розкладання води спостерігається лише при температурах вище 2000 К, тобто значно вище температур, які розвиваються під час пожежі. У звичайних умовах небезпека розкладання води малоймовірна, але ця небезпека стає реальною при попаданні води на розпечене вугілля чи залізо, які реагують з киснем водяної пари, виділяючи водень або водневі сполуки. У зв'язку з цим виникає небезпека утворення горючого газу, що може викликати вибух.

Вода – вельми реакційноздатна речовина. Вона реагує з оксидами багатьох металів і неметалів, утворює кристалогідрати з деякими солями, вступає у взаємодію з активними металами та іншими сполуками.

Вода – каталізатор багатьох хімічних реакцій, іноді для проходження реакції необхідні хоч би її сліди. Так, сліди води потрібні для взаємодії натрію з киснем в атмосфері повітря, для реакції фтористого водню зі склом і хлору з металами.

З речовинами реакційно малоактивними, які знаходяться звичайно в газоподібному стані, вода утворює ряд цікавих сполук. Молекули газоподібної речовини проникають в пустоти структури асоціатів води і утворюють так звані **сполуки включення** або **клатрати**. Прикладами клатратів є $\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ і інші. При утворенні газових гідратів виділяється велика кількість тепла за рахунок розриву водневих зв'язків. Такі сполуки нестійкі і легко розкладаються при підвищенні температури.

Найбільш важливою властивістю води, яка має значення в процесі гасіння, є хімічна взаємодія води з різними горючими речовинами. Хімічна реакційна здатність води з деякими речовинами обмежує її застосування під час гасіння пожеж. Воду не можна застосовувати для гасіння речовин, які бурхливо реагують з нею з виділенням горючих газів чи значної кількості тепла. У противному випадку існує небезпека виникнення горіння внаслідок самозаймання.

До групи речовин, що самозаймаються при контакті з водою, можна віднести лужні метали, гідриди металів (NaH , KH , CaH_2), оксиди і перекиси металів (CaO , Na_2O_2), карбіди металів (CaC_2 , K_2C_2), металоорганічні сполуки та ін.

Всі лужні метали взаємодіють з водою. Реакція супроводжується виділенням водню і значної кількості тепла. Крім того найбільш реакційноздатні метали, натрій і калій, реагують навіть з вологою повітря, при цьому їх поверхні швидко покриваються плівкою гідроксиду. Тому такі метали зберігають у середовищі, вільному від кисню (під шаром гасу). Наприклад, при взаємодії натрію з водою відбуваються наступні процеси:



Водень, що виділяється, нагрівається за рахунок теплового ефекту реакції, самозаймається і горить разом з металом:

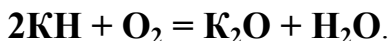
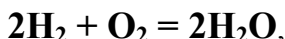


Іноді взаємодія лужних металів з водою супроводжується вибухом з розбризкуванням розплавленого металу.

Гідриди лужних і лужноземельних металів взаємодіють з водою також з утворенням водню і гідроксиду відповідного металу:



Від теплоти реакції самозаймаються водень і гідрид металу:

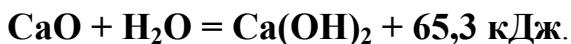


Оксиди і перекиси лужних металів взаємодіють з водою без виділення горючих газів, однак при цьому реакція протікає з виділенням великої кількості тепла. Наприклад, при взаємодії перекису натрію з водою утвориться перекис водню і гідроксид натрію. В свою чергу перекис водню - нестійка сполука, яка здатна до самовільного розкладання з утворенням води і кисню також з виділенням теплоти:



Горіння може виникнути, якщо перекиси змішані чи стикаються з горючими речовинами.

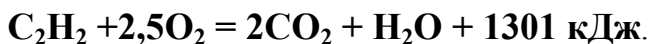
Оксид кальцію (негашене вапно), реагуючи з невеликою кількістю води, розігрівається до світіння і може підпалити достатні з ним горючі матеріали.



Взаємодія карбідів з водою, особливо карбідів натрію і калію, протікає дуже бурхливо і може закінчуватися вибухом. Причому метали згорають, а вуглець виділяється у вільному стані:



При взаємодії карбіду кальцію зі стехіометричною кількістю води виділяється стільки тепла, що система розігрівається до 920°C і ацетилен, що утворюється в ході реакції, самозаймається:



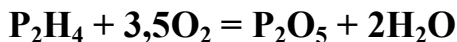
За великої кількості води цього не відбувається.

Самозаймання при контакті з водою характерно також для фосфідів і силіцидів різних металів.

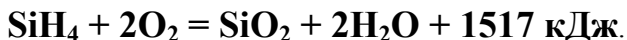
Фосфід кальцію при взаємодії з водою утворює фосфін:



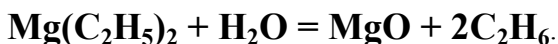
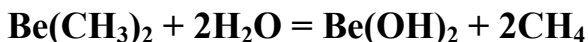
Фосфін – це горючий газ, але за даних умов він не самозаймається. Одночасно з PH_3 виділяється деяка кількість рідкого фосфористого водню P_2H_4 , що самозаймається на повітрі і здатен стати причиною самозаймання PH_3 .



Силіциди, тобто сполуки кремнію з різними металами, при дії води виділяють водневистий кремній (силан), що самозаймається на повітрі:



Деякі металоорганічні сполуки реагують з водою, утворюючи горючі гази. Наприклад, диметілберилій при взаємодії з водою виділяє метан, а діетілмагній - етан.



Теплота, що виділяється при цьому, приводить до займання не тільки газу, який виділяється, але і вихідної речовини.

При зрошенні водою концентрованої сірчаної кислоти виникає небезпека її розбризкування через сильний місцевий перегрів. Виділення великої кількості тепла ($79,6 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$) відбувається внаслідок утворення гідратів типу $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$.

При гасінні палаючих олій і жирів, нафтопродуктів та інших органічних рідин водою, особливо при застосуванні компактних струменів може відбутися викид чи розбризкування палаючих продуктів, у результаті чого площа пожежі збільшується. У таких випадках варто застосовувати розпилену воду. Характер дроблення води (розмір крапель) при цьому повинен підбиратися з урахуванням температури спалаху горючої речовини.

Деякі речовини, для гасіння яких не можна застосовувати воду, наведені в таблиці 1.7.

Таким чином, негативними явищами, що перешкоджають застосуванню води для потреб пожежогасіння, є вибухи, спалахи, розбризкування горючих матеріалів, додаткове підсилення горіння, збільшення об'єму полум'я, спінювання, викид палаючого продукту й ін. Однак ці явища можуть мати різні характер і масштаби, у тому числі суто обмежені (локальні). В останньому випадку водяні засоби можуть бути, допущені для

пожежогасіння, але відсутність кількісних критеріїв обумовлює одержання суб'єктивних висновків і, як наслідок, не кращих технічних рішень. Для орієнтованої оцінки застосовності водяних засобів можна скористатися двома лабораторними методами. Перший метод полягає у візуальному спостереженні за характером взаємодії води з палаючим у невеликій посудині досліджуваним продуктом. Другий метод передбачає вимір об'єму газу, що виділяється, а також ступеня розігріву при взаємодії продукту з водою.

Таблиця 1.7 – Речовини, для гасіння яких не можна застосовувати воду

Речовини	Характер взаємодії з водою
Алюмінійорганічні і літієорганічні сполуки, азид свинцю	реагують з вибухом
Лужні і лужноземельні метали, карбіди, гідриди, силіциди, фосфіди ряду металів	розкладання з виділенням горючих газів і значної кількості тепла
Гідросульфід натрію	відбувається самозаймання
Сірчана кислота, оксиди і перекиси деяких металів, терміт, хлорид титану	сильний екзотермічний ефект, який може призвести до займання інших горючих речовин
Бітум, жири, олії, нафтопродукти	посилення горіння в результаті скипання, викиду, розбризкування.

При зберіганні води в незахищених металевих посудинах відбувається корозія металу, яка підсилюється, якщо у воду додати змочувач, піноутворювач або солі, які захищають розчин від замерзання. Запобігти корозії контактуючих з водою металевих виробів (корпусів вогнегасників, трубопроводів і ін.) можна або нанесенням на них спеціального покриття, або додаванням до води інгібіторів корозії. В якості інгібіторів корозії можуть використовуватися поліамінокарбонова кислота,

етилендіамінотетраоцтова кислота в концентрації 0,04 – 1%, йодиди амонію, лужних та лужноземельних металів в концентрації 0,005%, 2-меркаптобензотіазол, фторсилікат натрію в концентрації 0,03% [6].

При тривалому зберіганні води для захисту від цвілі передбачається консервація води. Для консервації чистої води використовується рашит — розчинна у воді натрієва сіль хлоркрезолу. Її додають у кількості 0,05–0,1%. У рідинних вогнегасниках піддавати воду консервації не потрібно, тому що життєдіяльності мікроорганізмів запобігає сильно концентрований розчин поташу.

Контрольні питання

1. Пояснити особливості фазової діаграми води.
2. Пояснити чим обумовлена аномальність фізичних властивостей води.
3. Пояснити чим обумовлена низька змочувальна здатність води.
4. Розкрити хімічні властивості води, що обумовлюють можливість самозаймання речовин та матеріалів при контакті з водою.
5. Перелічити речовини, для гасіння яких не можна застосовувати воду.

ГЛАВА 2. МЕХАНІЗМ ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ ВОДОЮ. ВОГНЕГАСНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВОДИ

Розділ 1. Фізико-хімічні основи припинення горіння

Згасити пожежу з фізико-хімічної точки зору означає припинити процес горіння у всіх його видах, тобто створити в зоні горіння умови, що виключають можливість продовження процесу горіння в будь-якій формі. Існування горіння можливе лише за умови наявності горючого середовища та джерела запалення, яке надає системі достатньо енергії (більше, ніж енергія активації) для протікання хімічної взаємодії. Параметрами, які характеризують наявність цих умов, є концентраційні межі поширення полум'я, температурні межі поширення полум'я, межі за тиском і критичні значення енергії підпалення, граничні швидкості поширення процесів горіння, граничні значення температури зони горіння. Нижче граничних значень цих параметрів процес горіння існувати не може. В одному випадку, якщо горіння існувало, – воно припиниться, в іншому – просто не виникне. Ці умови залежать від виду горючої речовини, її агрегатного стану та режиму горіння, який визначається умовами тепло- і масообміну в зоні горіння.

Стійке горіння відбувається при балансі тепловиділення хімічної реакції в горючій системі і тепловіддачі від системи в навколишнє середовище:

$$q(+) = q(-).$$

Згідно з тепловою теорією, розвиненою в роботах радянських вчених М.М. Семенова, Я.Б. Зельдовича, Д.А. Франк-Каменецького, задача припинення горіння зводиться до зниження температури в зоні хімічної реакції до температури погасання шляхом порушення теплової рівноваги в зоні горіння так, що $q(+) < q(-)$ [7]. Порушення теплової рівноваги в зоні горіння можна здійснити або зниженням інтенсивності тепловиділення в зоні реакції нижче граничного значення, при якому неможливе мимовільне поширення горіння ($q'(+)< q(+)$), або

підвищенням інтенсивності тепловіддачі ($q'(-) > q(-)$), або одночасним зниженням інтенсивності тепловиділення і підвищенням інтенсивності тепловіддачі, доки температура в зоні реакції не знизиться до критичного значення – *температури погасання*.

Аналітично інтенсивність процесу тепловиділення для елементарного об'єму ΔV у фронті полум'я, в залежності від виду горючої речовини, концентрації компонентів горючої суміші та температури полум'я виражається рівнянням:

$$q(+) = Q_n \Delta V_{гс} \varphi_{гр}^n \varphi_{ок}^m k \exp\left(-\frac{E_{акт}}{RT_{ад}}\right), \quad (2.1)$$

де Q_n – нижча теплота згоряння горючої речовини;

$\Delta V_{гс}$ – елементарний об'єм горючої системи;

$\varphi_{гр}$ – концентрація горючої речовини;

$\varphi_{ок}$ – концентрація окислювача;

n, m – стехіометричні коефіцієнти відповідно при горючій речовині й окислювачі в реакції горіння;

k – константа швидкості хімічної реакції;

$E_{акт}$ – енергія активації;

R – універсальна газова стала;

$T_{ад}$ – адиабатична температура горіння.

При температурах вище, ніж температура самоспалахування, поступово відбувається зниження концентрації реагентів внаслідок їх вигорання. За рахунок цього швидкість хімічної реакції, а, отже, й інтенсивність тепловиділення при температурах, близьких до температури зони реакції, прагнуть не до нескінченності, як впливає з рівняння, а асимптотично наближаються до деякого максимального значення. Тому функція $q(+) = f(T)$ має точку перегину (рис. 2.1).

Інтенсивність сумарного процесу тепловіддачі з елементарної площі поверхні фронту полум'я визначається сумою променистої теплопередачі та передачею тепла конвекцією і описується рівнянням:

$$q(-) = \alpha \Delta S_{\text{ТВ}} (T_{\text{ад}} - T_0) + \sigma \varepsilon \Delta S_{\text{ТВ}} (T_{\text{ад}}^4 - T_0^4), \quad (2.2)$$

де α – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі;

$\Delta S_{\text{ТВ}}$ – елементарна площа поверхні тепловіддачі;

ε – ступінь чорноти полум'я;

σ – константа випромінювання абсолютно чорного тіла;

T_0 – температура навколишнього середовища.

Графічне відображення критичних умов припинення горіння представлено на рис. 2.1.

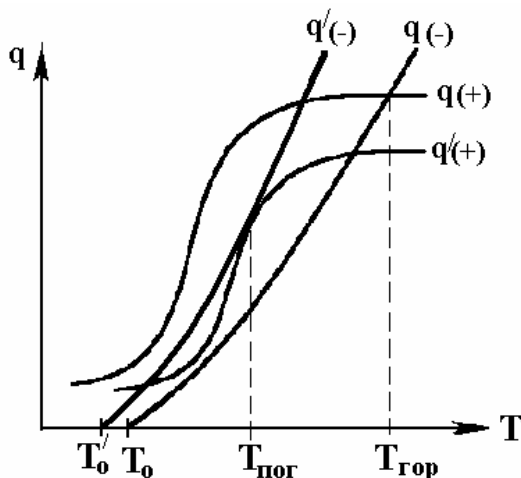


Рис. 2.1 – Схема досягнення температури погасання полум'я при зміні інтенсивностей тепловиділення та тепловіддачі:
 $q(+)$, $q(-)$ – тепловиділення та теплопередача за умови стійкого горіння;
 $q'(+)$, $q'(-)$ – тепловиділення та теплопередача за критичних умов припинення горіння.

При зовнішньому впливі на зону горіння можна змінити співвідношення між інтенсивністю тепловиділення і тепловіддачі так, що система перейде в положення, коли криві будуть мати дві загальні точки: точку дотику в області відносно високих температур і точку перетину в області низьких температур. При цьому виконуються наступні умови:

$$q'(+)=q'(-);$$

$$\left.\frac{dq'(+)}{dT}\right|_{T_{\text{пог}}}=\left.\frac{dq'(-)}{dT}\right|_{T_{\text{пог}}}$$

$$\left.\frac{d^2q'(+)}{dT^2}\right|_{T_{\text{пог}}}<0.$$

Аналізуючи стан системи в точці дотику при $T_{\text{пог}}$ методом малих збурень, переконуємося, що система знаходиться в нестійкій рівновазі, і незначне зниження температури на величину ΔT приводить до порушення теплового балансу та переходу системи в точку стійкої рівноваги в області низьких температур, тобто в області нескінченно повільного безполум'яного окислення.

Оскільки зниження температури в зоні горіння можна досягти різними шляхами (зменшенням тепловиділення, збільшенням тепловіддачі або одночасним зменшенням тепловиділення і збільшенням тепловіддачі), то температура погасання не є точно постійною величиною, а залежить від законів зміни інтенсивності тепловиділення та тепловіддачі, тобто від співвідношення, виду і взаєморозташування кривих $q(+)$ і $q(-)$.

Аналітичний розрахунок чисельного значення температури погасання для різних режимів горіння зв'язаний з певними труднощами обчислення параметрів процесів горіння

в близькограничних станах і тому має орієнтовний характер. Для розрахунку чисельних значень температур погасання досліджують залежність швидкості поширення полум'я від кількості тепла, що відводиться від фронту полум'я.

Аналіз закономірностей поширення кінетичного горіння по парогозових сумішах з урахуванням тепловтрат дає вираження критичної температури, за якої горіння має нестійкий характер. Температура погасання для кінетичного горіння дорівнює:

$$T_{\text{пог}} = T_{\text{ад}} - \frac{RT_{\text{ад}}^2}{E_{\text{акт}}}. \quad (2.3)$$

Однак на пожежі найчастіше зустрічається дифузійне горіння, яке має свої відмітні особливості. У дифузійного полум'я вище світимість через наявність в ньому твердих часток вуглецю, що призводить до збільшення тепловтрат випромінюванням і до зниження інтенсивності тепловиділення через неповноту згоряння. Проте зменшення температури дифузійного полум'я не призводить до зміни кількості газу, що згоряє на одиниці його поверхні, оскільки швидкість горіння визначається швидкістю фізичного процесу – дифузії. Тому припинення горіння через тепловтрати здійснюється в дифузійному полум'ї за меншої інтенсивності тепловиділення в порівнянні з кінетичним полум'ям заздалегідь перемішаних газів. У дифузійному полум'ї межа горіння має іншу фізичну природу, пов'язану з обмеженістю швидкості хімічної реакції. При збільшенні швидкості подачі окислювача або горючої речовини в зону реакції настає момент, коли швидкість хімічної реакції виявляється недостатньою для того, щоб переробити в полум'ї речовину, яка поступає, зона горіння охолоджується за рахунок надходження надлишкового холодного компоненту суміші, що приводить до подальшого зменшення швидкості реакції, та відбувається погасання полум'я.

Вступ	1
Глава 1. Властивості води	5
РОЗДІЛ 1. Фізичні властивості води	5
РОЗДІЛ 2. Хімічні властивості води	19
Контрольні питання	25
Глава 2. Механізм припинення горіння водою. Вогнегасна ефективність води	26
РОЗДІЛ 1. Фізико-хімічні основи припинення горіння	26
РОЗДІЛ 2. Вогнегасний вплив води	32
Вступ	3
Глава 1. Властивості води	7
РОЗДІЛ 1. Фізичні властивості води	7
РОЗДІЛ 2. Хімічні властивості води	21
Контрольні питання	27
Глава 2. Механізм припинення горіння водою. Вогнегасна ефективність води	28
РОЗДІЛ 1. Фізико-хімічні основи припинення горіння	28

Критична температура горіння $T_{\text{пог}}$ для дифузійного режиму горіння визначається як:

$$T_{\text{пог}} = T_{\text{ад}} - \frac{3RT_{\text{ад}}^2}{E_{\text{акт}}}. \quad (2.4)$$

Таким чином, механізм припинення горіння шляхом зміни теплового балансу в зоні горіння, що приводить до зниження температури в цій зоні до температури погасання, можна представити у виді таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

зниження $q(+)$		підвищення $q(-)$		
зміна концентрації реагентів у зоні реакції	підвищення $E_{\text{акт}}$	зниження температури навколо зони горіння	збільшення площі тепловіддачі	підвищення коефіцієнтів теплопередачі
• розведення системи одним із компонентів чи припинення доступу іншого компонента; • введення інертних речовин; • зниження тиску.	• введення в зону реакції хімічно активних інгібіторів	• введення в зону реакції речовин з високою теплоємністю та теплою фазових переходів	• введення в зону горіння поверхонь, які збирають на себе тепло	• збільшення випромінювальної здатності; • збільшення потужності конвекційних потоків (зрив полум'я)

На практиці частіше за все застосовують охолодження як найбільш простий, доступний і досить ефективний прийом гасіння. Як охолоджуючий вогнегасний засіб широко використовується вода або інші засоби на її основі – водні розчини.

Розділ 2. Вогнегасний вплив води

Припинення горіння водою обумовлюється її охолоджуючою дією, розбавленням горючого середовища парами, що утворюються при випаровуванні, ізоляцією горючого матеріалу від кисню повітря або механічним впливом на речовину, яка горить, тобто зривом полум'я. Практично всі чинники діють одночасно, але домінуючим в кожному конкретному випадку є один або два.

Так, наприклад, при подачі тонкорозпилених струменів води в полум'я гасіння відбувається за рахунок охолодження зони горіння. Також при випаровуванні об'єм води збільшується в 1700 раз, завдяки чому відбувається розбавлення компонентів горючої системи негорючою водяною парою. Однак, через нетривалість контакту води з зоною горіння в полум'ї водяної пари утворюється недостатньо, тому її роль в припиненні горіння не є домінуючою.

При подачі води на палаючу речовину компактними струменями припиняється горіння внаслідок охолодження або ізоляції речовин, які горять, а в разі гасіння газових фонтанів можливий також зрив полум'я механічною дією потужного водяного струменя за рахунок відокремлення зони горіння, тобто джерела запалення, від горючої системи.

В якості ізолюючого засобу вода виступає при гасінні нерозчинної в ній рідини з відносною густиною більше за одиницю, наприклад, сірковуглецю або твердих речовин, які можна залити водою, наприклад, в підвалах або трюмах. Наступний ефект гасіння заснований на розбавленні розчинних у воді деяких горючих речовин і втрати ними здатності горіти (наприклад, спирт, ацетон, розчиняючись у воді, утворюють негорючі суміші).

При гасінні тліючих пожеж ефект флегматизації водяною парою також не є визначальним, оскільки при тлінні, наприклад, деревини, текстилю і т. п., в самій горючій речовині міститься достатня для горіння кількість кисню, тому домінуючим механізмом

припинення гетерогенного горіння є охолодження зони горіння.

Розглянемо механізм припинення горіння речовин і матеріалів в різних агрегатних станах в залежності від домінуючого вогнегасного впливу води.

2.1 Вода як охолоджуючий вогнегасний засіб

Умовою гасіння пожежі є забезпечення певної інтенсивності тепловідводу від зони горіння або від горючої речовини $Q_{\text{відв.}}$, що призводить до зниження їх температури до певного чисельного значення, при якому горіння повністю припиниться. Необхідний тепловідвід може бути забезпечений за рахунок поглинання тепла вогнегасним засобом на протікання ендотермічних процесів його нагріву та фазового переходу $Q_{\text{погл.}}$ ВЗ. Тоді умовою гасіння пожежі за допомогою охолоджуючого вогнегасного засобу є співвідношення:

$$Q_{\text{погл}} > Q_{\text{відв}}$$

Інтенсивність теплопоглинання буде визначати необхідну питому витрату води та інтенсивність її подачі, при цьому параметри пожежогасіння будуть залежати від виду горючої речовини, її агрегатного стану та режиму горіння.

2.1.1 Гасіння методом охолодження зони горіння

У разі дифузійного горіння газів охолодження самих компонентів горючої суміші практично не має сенсу, оскільки газоповітряні суміші відповідного складу здатні горіти за будь-якої початкової температури. Тому тепло відводити необхідно безпосередньо від зони горіння. Умовою гасіння є співвідношення $T_{\text{зг}} < T_{\text{пог}}$, яке реалізовується за умови, якщо буде відведено:

$$q_{\text{відв.зг}} > \sum c_{\text{рпгi}} g_{\text{пгi}} (T_{\text{гор}} - T_{\text{пог}}). \quad (2.5)$$

де $q_{\text{відв. зг}}$ – інтенсивність тепловідводу від зони горіння, $\text{кДж}\cdot\text{с}^{-1}$;

$c_{\text{рпгі}}$ – питома теплоємність компонентів продуктів згоряння, $\text{кДж м}^{-3} \text{К}^{-1}$;

$g_{\text{пгі}}$ – об'ємна витрата кожного з компонентів продуктів згоряння, що утворюються, $\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$;

$T_{\text{гор.}}$ – температура горіння (полум'я), К ;

$T_{\text{пог}}$ – температура погасання, яка визначається за формулою (2.4), К .

У разі дифузійного горіння пари, що відтікає з вільної поверхні горючої рідини, справедлива та ж умова гасіння, що й для газів.

Однак в дифузійному турбулентному полум'ї важко виділити реакційну зону. Тому структуру полум'я спрощують. Полум'я вважають деяким фізичним об'ємом у видимих межах з середніми за об'ємом параметрами [8]. Експериментальних даних щодо середньооб'ємних температур погасання немає, тому провести кореляцію між температурою погасання в зоні реакції і температурою, середньою за об'ємом полум'я, не представляється можливим.

Численні експериментальні дані показують, що з достатньою достовірністю можна вважати максимальну температуру факела дифузійного полум'я більшості горючих речовин або матеріалів рівною 1500-1600 К (дуже рідко перевищує 1650 К). Так, температура полум'я горючих газів при дифузійному горінні у відкритому просторі становить 1550-1600 К (крім водню), горючих рідин за тих же умов 1500-1550 К , твердих горючих речовин і матеріалів 1450-1500 К . Припустимо, що початкова температура реагентів, тобто суміші горючої речовини з окислювачем, дорівнює $T_0 \sim 300 \text{ К}$, а температура продуктів горіння – приблизно температурі полум'я $T_{\text{пол}} \sim 1500 \text{ К}$. Це означає, що температура середовища в зоні горіння підвищила-

ся приблизно на 1200 К. Приріст температури продуктів горіння пропорційний кількості тепла, що виділяється внаслідок хімічних реакцій горіння, за вирахуванням тепловтрат на випромінювання. Якщо припустити, що втрати на випромінювання в навколишнє середовище становлять $\sim 0,4 Q_H$, то на підвищення температури в зоні горіння пішло приблизно 60% всієї теплоти згоряння даного виду горючої речовини.

Згідно з тепловою теорією температура погасання для полум'яного горіння більшості вуглеводневих горючих речовин становить 1300 К, отже, для припинення горіння необхідно знизити температуру факела полум'я приблизно на 200 К, що становить приблизно 17 % приросту температури в зоні горіння ($200/1200 = 0,17$). Тому для погасання полум'я необхідно знизити кількість тепла, що виділяється, ще на $\sim 17\%$ або відвести від факела полум'я додатково 17% тепла з тих 60%, які йдуть на підвищення температури зони реакції. Це означає, що при гасінні полум'я за механізмом припинення горіння охолодженням зони горіння для дифузійного полум'я горючих газів, пари горючих рідин і газоподібних продуктів, що утворюються при розкладанні твердих горючих матеріалів, для досягнення температури погасання необхідно з об'єму полум'я відібрати $\sim 0,17 \cdot 60\% = 10\%$ від теплоти згоряння даної горючої речовини:

$$Q_{\text{відв. зг}} = 0,1 \cdot Q_H. \quad (2.6)$$

Якщо у факел полум'я подати тонкорозпилену воду, то значна її частина або майже вся вода випарується, віднявши максимальну кількість тепла. Припустимо, що вся вода, подана в зону полум'я, повністю випарується, а пара, що утворилася, вся буде нагріватися до температури погасання. Розглянемо механізми припинення горіння для цього випадку.

При введенні води в зону горіння збільшується інтенсивність тепловідводу за рахунок видалення значної частини тепла реакційної зони на ендотермічні процеси нагріву і фазового перетворення. Основні механізми відведення тепла будуть наступні:

- зниження температури у факелі полум'я через витрати тепла на нагрівання крапель води масою m_B від початкової температури до температури кипіння:

$$Q_1 = c_{p_B} m_B (T_{\text{кип}} - T_0), \quad (2.7)$$

де m_B — маса води;

c_{p_B} — питома масова теплоємність води;

$T_0, T_{\text{кип}}$ — початкова температура і температура кипіння води відповідно.

- зниження температури полум'я через витрати тепла на випаровування крапель води масою m_B :

$$Q_2 = H_{\text{вип}} m_B, \quad (2.8)$$

де $H_{\text{вип}}$ — питома масова теплота пароутворення.

- зниження температури полум'я за рахунок витрати тепла на нагрівання пари води до температури зони горіння:

$$Q_3 = c_{p_{\Pi}} m_{\Pi} (T_{\text{пол}} - T_{\text{кип}}), \quad (2.9)$$

де m_{Π} — маса пари (рівна масі води m_B);

$c_{p_{\Pi}}$ — питома масова теплоємність пари води;

$T_{\text{пол}}$ — температура полум'я.

- розбавлення компонентів горючої суміші в зоні горіння парами води, що приводить до зниження інтенсивності тепловиділення за рахунок зменшення швидкості реакції;

- вода, що випарувалася навколо зони горіння, знизить температуру навколишнього середовища, що обумовлює підвищення інтенсивності тепловідводу від зони горіння за рахунок зростання інтенсивності як конвекційного, так і променистого тепловідводу від полум'я. Крім того, пара, що утворилася, призведе до зміни теплофізичних властивостей газового середовища (збі-

льшення коефіцієнта теплопровідності λ , теплоємності газового середовища c_p і ступеня чорноти полум'я ϵ).

Чисельно врахувати всі чинники, які обумовлюють відведення тепла, досить важко, тому розглянемо лише охолоджуючий вплив води. Будемо вважати, що все тепло, відняте з осередку пожежі, поглинається водою і відводиться з водяною парою. Причиною хорошого теплопоглинання води є високі значення її питомої теплоємності та теплоти пароутворення. Тоді згідно (2.7) – (2.9) питома кількість тепла, що поглинається одним кілограмом води ($m_v = 1$ кг), становить:

$$q_{\text{погл}} = c_{p_v} (T_{\text{кип}} - T_o) + H_{\text{вип}} + c_{p_{\text{п}}} (T_{\text{пол}} - T_{\text{кип}}). \quad (2.10)$$

Підставивши чисельні значення вхідних величин і прийнявши, що теплоємність води дорівнює $4,18 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, початкова температура води становить 20°C , найменша температура полум'я – 1000°C , теплоємність пари води в діапазоні температур від 100°C до 1000°C дорівнює $1,96 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, отримаємо $q_{\text{погл.}} \approx 4000 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, тобто теоретично один літр води, введеної в зону горіння, при повному її випаровуванні і нагріванні пари води до температури полум'я, здатний відняти від факела полум'я 4000 кілоджоулів тепла.

Питому витрату води g_v , яку потрібно забезпечити для гасіння дифузійного факела полум'я, можна визначити як відношення необхідної інтенсивності тепловіддачі до кількості тепла, що поглинається одним кілограмом води:

$$g_v = \frac{Q_{\text{відв.з.г.}}}{q_{\text{погл.}}} [\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}]. \quad (2.11)$$

Так, для припинення горіння висококалорійних вуглеводнів з $Q_n \approx 40000 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ треба подати в факел полум'я:

$$g_{\text{в}} \approx \frac{0,1 \cdot 40000}{4000} = 1 \text{ [л} \cdot \text{кг}^{-1}\text{]},$$

тобто теоретично один літр води може загасити горіння одного кілограму горючої рідини або одного кілограму горючих газів.

Вода, попадаючи в зону горіння, встигне повністю випаруватися тільки за умови, що час прогрівання краплі та її випаровування буде не більше часу польоту краплі в осередку горіння. Розглянемо чинники, що визначають величину цих часових проміжків.

Час польоту краплі залежить від шляху, який проходить крапля в полум'ї, та швидкості її польоту. Шлях, який проходить крапля води в полум'ї, визначається температурою та розмірами самого полум'я, а також положенням пристрою, що розпилює. Температура газового потоку, що відтікає від поверхні горючого матеріалу, може змінюватися від 500 до 1300 К. Розміри факела полум'я (діаметр об'єкта, що горить, або горизонтальна довжина полум'я) часто вимірюються десятками метрів, а площа пожежі при цьому вимірюється сотнями квадратних метрів. Положення пристрою, що розпилює, відносно факела полум'я визначається конструктивними особливостями розпилювача та зовнішніми умовами (наприклад, швидкістю вітру). На сьогодні можливо створити такі умови, за яких довжина шляху пробігу крапель в полум'ї коливається в межах від 1,5 до 6,0 м.

Швидкість руху краплі води в газовому потоці залежить від її розміру і натиску на розпилювачі. В момент вильоту з сопла розпилювача крапля має початкову швидкість W_0 . Наприклад, розпилювачі механічного типу створюють швидкість витікання з сопла від 16 до 25 м·с⁻¹. Під дією сил тяжіння та опору газового середовища крапля в перший час рухається з убутним прискоренням. У деякий момент часу прискорення стане рівним нулю, і потім крапля буде рухатися з постійною швидкістю відносно газового потоку, при якій сила тяжіння краплі

урівноважена силою аеродинамічної взаємодії краплі з потоком газу.

Швидкість осадження визначається на прикладі осадження одиночної краплини, що має форму кулі з діаметром d_k в нерухомому середовищі.

Сила, яка рухає краплину, визначається різницею між вагою краплини G і силою виштовхування A (сила Архімеда), яка дорівнює вазі газового середовища в об'ємі краплини:

$$G - A = \frac{\pi \cdot d_k^3}{6} g(\rho_k - \rho_g), \quad (2.12)$$

де g – прискорення вільного падіння, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$;

d_k – діаметр краплі, м ;

ρ_g, ρ_k – густина газового середовища і краплі відповідно, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

При русі краплини в середовищі виникає сила опору $F_{\text{опор}}$, яка у випадку рівномірного руху сферичної краплі в газовому середовищі визначається за формулою, структура якої була запропонована ще Ньютоном:

$$F_{\text{опор}} = \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} \cdot \frac{\rho_g \cdot W_g^2}{2} \cdot C_x, \quad (2.13)$$

де C_x – коефіцієнт лобового опору;

W_g – швидкість газового потоку.

Коефіцієнт лобового опору C_x залежить від форми тіла, що обтікається, числа Рейнольдса Re (характеризує відношення сил інерції до сил молекулярного тертя), і дещо меншою мірою від ступеня турбулентності газового потоку.

Коефіцієнт лобового опору для ламінарного режиму руху краплини можна визначити як:

$$C_x = \frac{24}{Re}.$$

Це співвідношення добре підтверджується експериментом тільки для малих чисел Рейнольдса ($Re < 2$). Функцію $C_x = f(Re)$ не вдається представити одним аналітичним рівнянням для всього інтервалу змін чисел Рейнольдса, що пояснюється складним характером обтікання краплини потоком газу. Відомо багато інтерполяційних формул, які більшою або меншою мірою точно описують цю функцію в обмеженому інтервалі чисел Re . Досить сказати, що таких формул на цей час відомо понад 40 [9].

За розвинутої турбулентності ($200000 > Re > 500$) $C_x = 0,44$. Для перехідної області ($2 < Re < 500$) $C_x = 18,5Re^{-0,6}$.

Експериментальні дані, отримані різними авторами в широкому діапазоні змін чисел Рейнольдса для різних умов руху кулі в рідині, дозволили отримати експериментальну залежність $C_x = f(Re)$ подану в логарифмічних координатах [10].

У початковий момент осадження краплина під дією сили тяжіння буде рухатися прискорено, але зі збільшенням швидкості зростає опір і, відповідно, зменшується прискорення. Дуже швидко настане динамічна рівновага сил, коли сила опору середовища зрівняється з силою $(G - A)$, яка рухає краплину. Починаючи з цього моменту, краплина буде рухатися рівномірно, з постійною швидкістю $W_k = W_\Gamma$. Цю швидкість називають *швидкістю витання*. Швидкість витання можна визначити за допомогою умови рівності сили, що рухає краплину, і сили опору середовища:

$$\frac{\pi \cdot d_k^3}{6} \cdot g(\rho_k - \rho_\Gamma) = C_x \cdot \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} \cdot \frac{\rho_\Gamma \cdot W_k^2}{2},$$

звідки

$$W_{\text{вит}} = \sqrt{\frac{4gd_{\text{к}}(\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{г}})}{3\rho_{\text{г}}C_{\text{х}}}}. \quad (2.14)$$

За приблизними підрахунками і дослідями встановлено, що краплі діаметром до $100 \cdot 10^{-6}$ м за початкової швидкості $100 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ вже через 0,4 секунди повністю втрачають початкову швидкість і набувають швидкості витання. При цьому вони встигають пройти шлях біля 0,25 м від розпилювача. Зі збільшенням розмірів крапель швидкість витання збільшується і для крапель діаметром в $(100 \div 150) \cdot 10^{-6}$ м коливається в межах від 0,1 до $0,3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Якщо не враховувати швидкість самого газового потоку відносно поверхні речовини, що горить, то час перебування таких крапель в полум'ї становить від 6 до 60 секунд. Насправді краплі у факелі рухаються відносно поверхні речовини значно швидше за рахунок того, що їх несе загальний потік повітря і газів, який створюється струменем розпилювача.

Крапля, що пролітає через розжарені гази, буде нагріватися, випаровуватися і зменшуватися в розмірі аж до повного її зникнення. Кількість тепла Q , яку отримує крапля від розжарених продуктів горіння у факелі полум'я, визначається за законом Ньютона:

$$Q = \pi \cdot d_{\text{к}}^2 \cdot \alpha (T_{\text{г}} - T_{\text{к}}), \quad (2.15)$$

де $d_{\text{к}}$ – початковий діаметр краплі;

$T_{\text{г}}$, $T_{\text{к}}$ – температура газового середовища і краплі відповідно;

α – коефіцієнт тепловіддачі.

Припустимо, що все тепло, що поступає до краплі, спочатку витрачається тільки на її нагрівання і при цьому не відбувається випаровування та зменшення розмірів краплі, тоді:

$$\pi d_{\kappa}^2 \alpha (T_{\Gamma} - T_{\kappa}) = \frac{1}{6} \pi d_{\kappa}^3 \rho_{\kappa} c_{p_{\kappa}} \frac{dT_{\kappa}}{d\tau},$$

де $c_{p_{\kappa}}$ – теплоємність краплі.

Після спрощення і розділення перемінних отримаємо рівняння:

$$d\tau = \frac{\rho_{\kappa} c_{p_{\kappa}} d_{\kappa}}{6\alpha (T_{\Gamma} - T_{\kappa})} dT_{\kappa}.$$

Інтегруючи це рівняння в межах при $\tau = 0$ $T_{\kappa} = T_o$, а при $\tau = \tau_{\text{наг}}$ $T_{\kappa} = T'_{\kappa}$, отримаємо:

$$\tau_{\text{наг}} = \frac{\rho_{\kappa} c_{p_{\kappa}} d_{\kappa}}{6\alpha} \ln \frac{T_{\Gamma} - T_o}{T_{\Gamma} - T'_{\kappa}},$$

де T'_{κ} – температура краплі до кінця нагрівання.

Оскільки температура газового середовища у факелі значно більша, ніж температура краплі, то можна, скориставшись розкладенням логарифму, спростити останню формулу. Тоді

$$\tau_{\text{наг}} = \frac{\rho_{\kappa} c_{p_{\kappa}} d_{\kappa}}{6\alpha} \frac{T'_{\kappa} - T_o}{T_{\Gamma} - T_o}. \quad (2.16)$$

Коефіцієнт тепловіддачі α залежить від радіуса краплі, яка випаровується, і швидкості її польоту і визначається як функція критерію Рейнольдса:

$$\alpha = \frac{\lambda_{\Gamma}}{r_{\kappa}} \left(1 + 0,08 \text{Re}^{2/3} \right), \quad (2.17)$$

де r_k – радіус краплі;

λ_Γ – коефіцієнт теплопровідності газового середовища;

Re – критерій Рейнольдса.

Критерій Рейнольдса можна виразити співвідношенням:

$$Re = \frac{W_k r_k}{\nu_\Gamma}, \quad (2.18)$$

де ν_Γ – кінематична в'язкість газового середовища;

W_k – швидкість польоту краплі.

Розрахунки показують, що при русенні крапель води в газовому середовищі з температурою біля 1000°C з швидкостями витання, обчисленими згідно з (2.14), критерій Рейнольдса буде значно меншим за одиницю. Це дозволяє з достатньою точністю вважати:

$$\alpha = \frac{\lambda_\Gamma}{r_k}. \quad (2.19)$$

Тоді формулу (2.16) можна переписати у виді:

$$\tau_{\text{наг}} = \frac{\rho_k c_{p_k} r_k^2}{3 \lambda_\Gamma} \frac{T_k' - T_0}{T_\Gamma - T_0}. \quad (2.20)$$

При дослідженні процесу випаровування крапель води розмірами від 10^3 м до $2 \cdot 10^3$ м в потоку повітря, нагрітого до температури, що перевищує температуру кипіння рідини, було показано [11], що навіть при температурі повітря 700°C і вище температура краплі не досягає температури кипіння. Результати вимірювань температури краплі за різних температур потоку повітря приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Залежність температури краплі води від температури нагрітого газу

$t_{\text{пов}}, ^\circ\text{C}$	100	150	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$t_{\text{к}}, ^\circ\text{C}$	35,5	42,2	48,6	57,3	64,8	70,7	74,9	78,5	82	86	88,5

Теоретичне обґрунтування отриманих експериментальних результатів приведено в додатку А, де показано, що залежність стаціонарної температури краплі від температури газового середовища має вид:

$$T_{\text{к}}' = T_{\text{с}} \left[(P_{\text{заг}} - P_{\text{п0}}) \cdot (1 - \exp(-A)) + P_{\text{п0}} \right], \text{ К},$$

де $T_{\text{с}}(P_{\text{п}})$ - температура насичення пари за заданого значення парціального тиску $P_{\text{п}}$ парової складової парогазової суміші (ця температура ще називається точкою роси);

$T_{\text{с}}(P)$ – залежність абсолютної температури насичення водяної пари від її тиску P ;

$P_{\text{заг}}$ – загальний тиск газового середовища;

$P_{\text{п0}}$ – парціальний тиск водяної пари у вихідному газовому середовищі;

A – параметр, який дорівнює:

$$A \equiv \frac{\text{Nu}}{\text{Sc}} \cdot \frac{\lambda}{c_{\text{рп}} D} \cdot \frac{T_{\text{г}} R_{\text{в}}}{2P_{\text{заг}}} \cdot \ln \left(1 + \frac{c_{\text{рп}} \cdot (T_{\text{г}} - T_{\text{к}}')}{\Delta H_{\text{вип}}} \right),$$

де Nu – число Нусельта, що характеризує процес теплообміну між краплею та газовим середовищем;

Sc – число Шмідта, що характеризує процес масообміну водяної пари в дифузійному шарі;

D – коефіцієнт дифузії водяної пари у повітрі, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;

λ – коефіцієнт теплопровідності газового середовища,

$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

T_{Γ} – температура газового середовища, К;

$\Delta H_{\text{вип}}$ - питома теплота пароутворення води, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

$R_{\text{в}}$ - питома газова стала води, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Максимальна температура $T'_{\text{к}}$, до якої може прогрітися крапля води, пролітаючи через потік гарячих газів, буде залежати від температури газового середовища. Динаміка наближення температури краплі до стаціонарного значення відображена на рис. 2.2. Необхідно відмітити, що стаціонарна температура краплі $T'_{\text{к}}$ мало залежить від початкової температури рідини і від розміру краплі. Розміри краплі будуть впливати тільки на час досягнення стаціонарної температури (рис. 2.3).

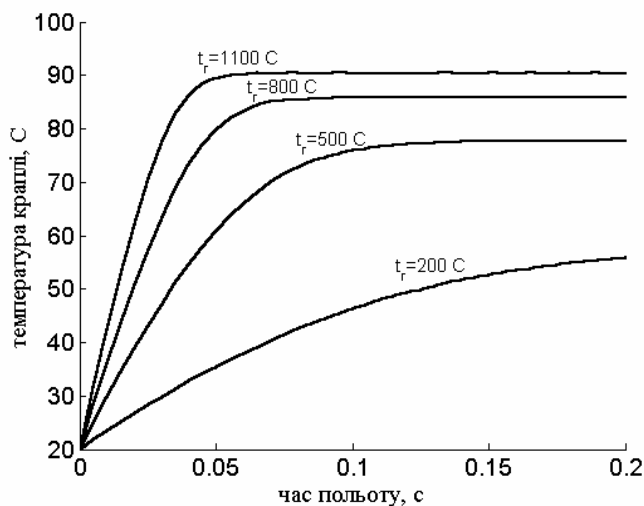


Рис. 2.2 – Зміна температури краплі води діаметром $200 \cdot 10^{-6}$ м за часом польоту в залежності від температури газового середовища

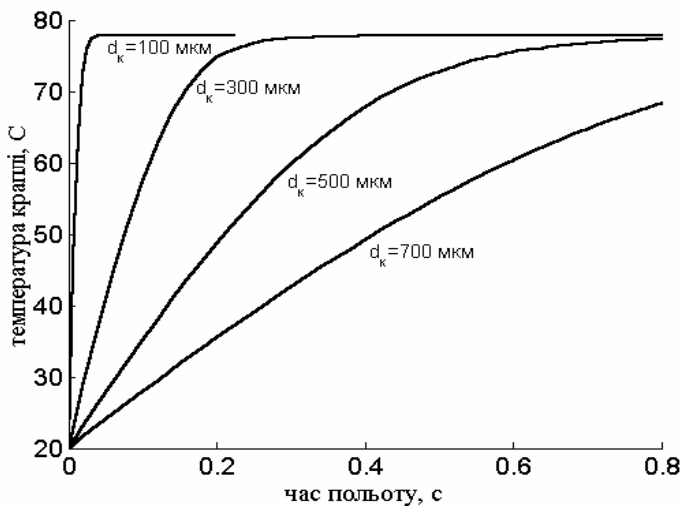


Рис. 2.3 – Зміна температури краплі води різних діаметрів за часом польоту за температури газового середовища 700°C

Крапля, яка нагрілася, почне випаровуватися за умови, що тиск насиченої пари біля поверхні розділу фаз стає більше за тиск пари в навколишньому газоподібному середовищі. Випаровування в процесі рушення краплі відбувається за рахунок тепла, що поступає від полум'я, при цьому розмір краплі буде зменшуватися. Тоді тепловий баланс можна записати як:

$$\pi d_k^2 \alpha (T_\Gamma - T_k) = -N_{\text{вип}} \rho_k \pi d_k^2 \frac{dr_k}{d\tau}. \quad (2.21)$$

Підставивши значення α з (2.19) в рівняння (2.21) й інтегруючи останнє, отримуємо вираз для часу повного випаровування:

$$\tau_{\text{вип}} = \int_0^{r_k} \frac{N_{\text{вип}} \rho_k}{\lambda_\Gamma (T_\Gamma - T_k)} r_k dr_k. \quad (2.22 \text{ а})$$

Оскільки $T_{\text{к}}^{\prime}$ незначною мірою відрізняється від початкової температури краплі T_0 , в порівнянні з $T_{\text{г}}$, рівняння (2.22а) можна записати як:

$$\tau_{\text{вип}} = \frac{H_{\text{вип}} \rho_{\text{к}}}{2\lambda_{\text{г}} (T_{\text{г}} - T_0)} r_{\text{к}}^2. \quad (2.22 \text{ б})$$

Час випаровування краплі зменшується з підвищенням температури газового середовища і швидкості газового потоку.

Площа поверхні краплі пропорційна квадрату радіуса і при випаровуванні змінюється з часом за лінійним законом. Залежність квадрату діаметра краплі від часу за різних температур повітря представлено на рис. 2.4.

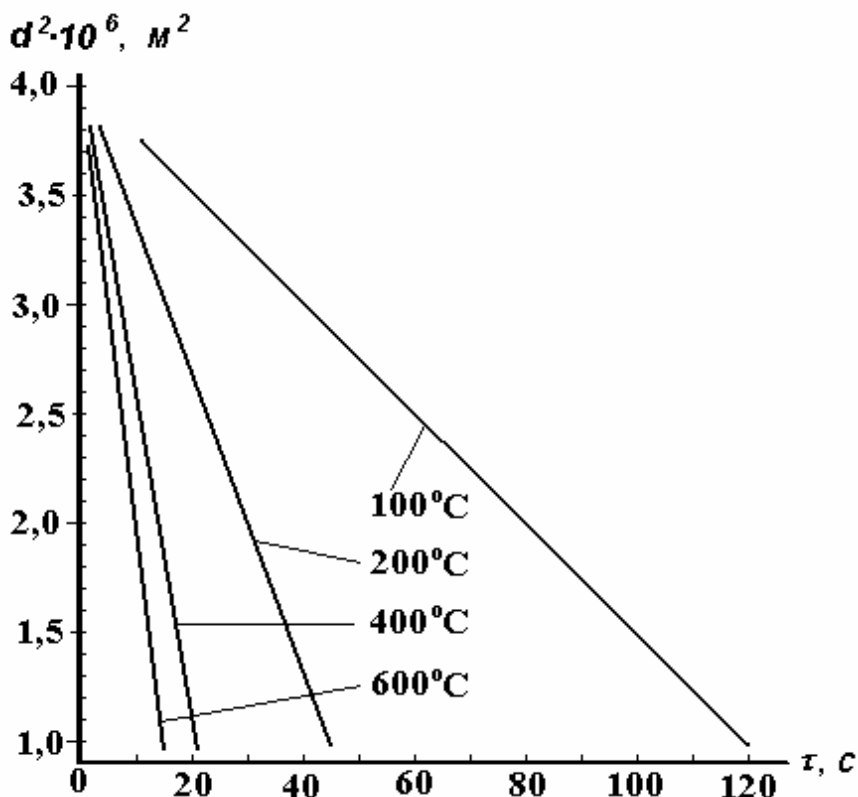


Рис. 2.4 – Залежність квадрату діаметра краплі від часу при швидкості повітряного потоку $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ і різних температурах

Таким чином, при випаровуванні крапель води в рухомому газовому середовищі за температури, яка перевищує температуру кипіння води, виконується закон Срезневського:

$$\frac{dS}{d\tau} = \text{const}.$$

Абсолютні значення $dS/d\tau$ за різних температур газового середовища і швидкості потоку представлені на рис. 2.5.

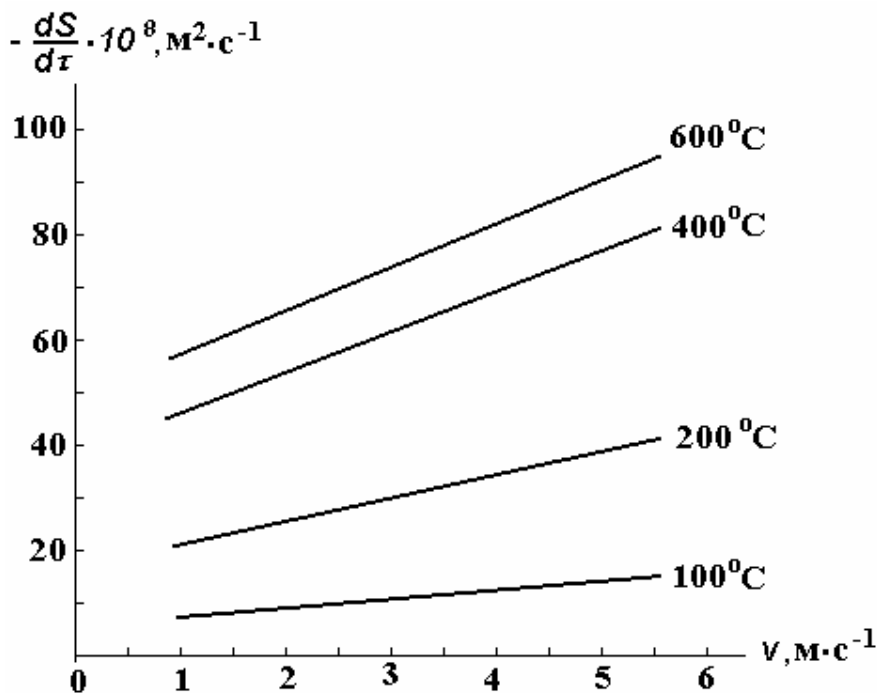


Рис. 2.5 – Залежність $\frac{dS}{d\tau}$ від швидкості повітряного потоку за різних його температур

Якщо порівняти час нагрівання і час випаровування крапельі, то з рівнянь (2.20) і (2.22 б) можна отримати:

$$\frac{\tau_{\text{вип}}}{\tau_{\text{нагр}}} = \frac{3}{2} \frac{H_{\text{вип}}}{c_{p_k} (T_k' - T_o)}. \quad (2.23)$$

Таким чином, відношення часу повного випаровування крапельі до часу їх нагрівання не залежить від радіуса крапельі, а залежить тільки від початкової температури води, що подається на гасіння, і температури газового середовища, в яке попадає крапля.

Якщо припустити, що початкова температура краплі води, яка подається на гасіння, дорівнює 20°C , а температура газового середовища в факелі 750°C , отже кінцева температура краплі – 80°C (див. табл. 2.2), то отримаємо, що час повного випаровування краплі в 13,5 рази більше часу нагрівання.

Так, для крапель діаметром в $100 \cdot 10^{-6}$ м, що пролітають зі швидкістю витання через факел полум'я з температурою 1000°C , час нагрівання становить $2,5 \cdot 10^{-3}$ с, а час повного випаровування – $34 \cdot 10^{-3}$ с. Тривалість "життя" краплі у факелі полум'я становитиме близько $36 \cdot 10^{-3}$ с. При збільшенні швидкості рушення в 250 разів час випаровування краплі зростає тільки приблизно в 1,3 рази і буде становити 0,04 с, тобто менше можливого мінімального часу польоту краплі, рівного приблизно 0,06 с.

Таким чином, краплі діаметром в $100 \cdot 10^{-6}$ м і менше повинні повністю випаруватися у факелі полум'я за час, менший ніж 0,04 с. Краплі діаметром в $150 \cdot 10^{-6}$ м встигнуть випаруватися тільки частково (в залежності від довжини шляху, який вони пролітають), а частково попадуть на поверхню речовини, яка горить. Більші краплі не встигнуть випаруватися і попадуть на стінки конструкцій, що оточують, або на поверхню речовини.

Отже, за умови, що час повного випаровування краплі $\tau_{\text{вип}}$ більший за час її польоту у факелі полум'я $\tau_{\text{пол}}$, рівняння (2.22а) можна переписати з іншими межами інтегрування:

$$\tau_{\text{пол}} = \int_0^{\tau_{\text{пол}}} d\tau = \int_{r_{\text{к}}^{\text{н}}}^{r_{\text{к}}^{\text{о}}} \frac{H_{\text{вип}} \rho_{\text{к}}}{\lambda_{\text{г}} (T_{\text{г}} - T_{\text{к}})} r_{\text{к}} dr_{\text{к}},$$

$$\tau_{\text{пол}} = \frac{H_{\text{вип}} \rho_{\text{к}}}{2\lambda_{\text{г}} (T_{\text{г}} - T_{\text{к}})} \left[\left(r_{\text{к}}^{\text{о}} \right)^2 - \left(r_{\text{к}}^{\text{н}} \right)^2 \right],$$

де $\tau_{\text{пол}}$ – час польоту краплі у факелі полум'я, протягом якого відбувається процес випаровування;

$r_{\text{к}}^0$ – початковий радіус краплі;

$r_{\text{к}}^/$ – радіус краплі на момент часу $\tau_{\text{пол}}$;

$T_{\text{к}}$ – температура краплі води.

Вирішення цього рівняння дає можливість визначити кінцевий розмір крапель після їх проходження через зону нагрітих продуктів горіння:

$$r_{\text{к}}^/ = \sqrt{\left(r_{\text{к}}^0\right)^2 - \frac{2\lambda_{\text{Г}} (T_{\text{Г}} - T_{\text{к}})}{H_{\text{вип}}\rho_{\text{к}}} \tau_{\text{пол}}} . \quad (2.24)$$

Оцінимо коефіцієнт використання води $k_{\text{вик}}(\Gamma)$ при гасінні полум'я як частку води, яка при подачі розпиленого струменю в зону горіння встигне випаруватися. Параметр $k_{\text{вик}}(\Gamma)$ можна представити як відношення інтенсивності випаровування до інтенсивності подачі води на гасіння, які в свою чергу можна виразити через відповідні маси води – кінцеву і вихідну, які було подано за час $\tau_{\text{пол}}$. Якщо не враховувати зміну густини води при нагріванні, масу води можна виразити через відповідні середні радіуси крапель, тоді:

$$k_{\text{вик}}(\Gamma) = \frac{I_{\text{вип}}}{I_{\text{под}}} = \frac{m_{\text{под}} - m_{\text{кін}}}{m_{\text{под}}} = \frac{\left(r_{\text{к}}^0\right)^3 - \left(r_{\text{к}}^/\right)^3}{\left(r_{\text{к}}^0\right)^3}, \quad (2.25, \text{ а})$$

$$k_{\text{вик}}(\Gamma) = 1 - \frac{\left(r_{\text{к}}^/\right)^3}{\left(r_{\text{к}}^0\right)^3},$$

де $I_{\text{вип}}$ – інтенсивність випаровування води з поверхні крапель;

$I_{\text{под}}$ – інтенсивність подачі води на гасіння;

$m_{\text{под}}$ – вихідна маса води, яку було подано за час $\tau_{\text{пол}}$;

$m_{\text{кін}}$ – кінцева маса води, яка залишилася після випаровування.

Таким чином, з урахуванням (2.24) частка води, що випаровується в газовому середовищі при проходженні через зону нагрітих продуктів горіння, виражається як:

$$k_{\text{вик}}(\Gamma) = 1 - \frac{\left((r_{\text{к}}^0)^2 - \frac{2\lambda_{\text{Г}} (T_{\text{Г}} - T_{\text{К}})}{H_{\text{вип}}\rho_{\text{К}}} \tau_{\text{пол}} \right)^{3/2}}{(r_{\text{к}}^0)^3}. \quad (2.25 \text{ б})$$

Відношення $\frac{2\lambda_{\text{Г}} (T_{\text{Г}} - T_{\text{К}})}{H_{\text{вип}}\rho_{\text{К}}}$ залишається постійним і

для вказаних умов ($\lambda_{\text{Г}} = 9,2 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $T_{\text{Г}} - T_{\text{К}} = 1000 \text{ К}$, $\rho_{\text{К}} = 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $H_{\text{вип}} = 2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$) дорівнює приблизно $8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Час польоту краплі залежить від розташування пристрою, який подає струмінь води в зону горіння, та від швидкості руху крапель. Якщо прийняти середній час польоту краплі 0,1 с, а початковий радіус краплі $200 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, то частка води, яка випаровується у факелі полум'я, $k_{\text{вик}}(\Gamma)$ становить 0,3. При зменшенні вихідного розміру крапель параметр $k_{\text{вик}}(\Gamma)$ значно збільшується, так при $r_{\text{к}}^0 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ $k_{\text{вик}}(\Gamma) = 0,91$.

Таким чином, отримане чисельне значення питомої кількості тепла, що поглинається водою в зоні горіння, відповідно до формули (2.10), має розрахунково-теоретичний характер.

Практично ж неможливо здійснити подачу води у факел полум'я, довівши його до повного погасання, і при цьому забезпечити повне випаровування всієї води і нагрівання її пари до температури газового середовища. Тому в розрахунках вводять поправочні коефіцієнти, які враховують втрати води при подачі у факел полум'я, неповноту випаровування крапель води, частковість прогрівання водяної пари до температури газового середовища в полум'ї [1].

Якщо припустити, що не вся вода попаде при розпиленні у факел полум'я, а тільки 80% її; крім того, вода, яка попала у факел полум'я, нагріється не до 100°C, а лише до 80°C; не вся нагріта вода випарується, а тільки 70% її, і що 80% пари, яка утворилася, прогріється до середньої температури у факелі полум'я (приблизно до 750°C), тоді питома кількість тепла, поглинутого водою та відведеного від зони горіння, буде дорівнювати:

$$q_{\text{погл}} \approx 0,8c_{\text{рв}}(80 - t_0) + 0,55H_{\text{вип}} + 0,4c_{\text{рп}}(750 - 80). \quad (2.26)$$

Після підстановки чисельних значень вхідних величин в (2.26) питома кількість тепла, що поглинається одним літром води, буде приблизно становити 2000 кДж·кг⁻¹, тобто вдвічі менше отриманого згідно (2.10) значення. Відповідно і необхідні питомі витрати води для припинення полум'яного горіння згідно (2.11) будуть в два рази більшими. Це означає, що для гасіння дифузійного факела полум'я висококалорійного вуглеводневого пального з $Q_{\text{н}} \approx 40000$ кДж·кг⁻¹ треба подати у факел полум'я:

$$g_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{відв. зг}}}{q_{\text{погл}}} \approx \frac{0,1 \cdot 40000}{2000} = 2 \text{ [л·кг}^{-1}\text{]},$$

тобто приблизно 2 л води на кілограм горючої речовини.

Але і ці значення в 5-10 разів менше витрат, що реалізуються на практиці (див. додаток **В**). Ця обставина показує,

які великі резерви підвищення вогнегасної ефективності води за механізмом охолодження факела полум'я приховані у вдосконаленні способів подачі води в зону горіння в процесі гасіння деяких видів пожеж.

Потрібно зазначити, що при полум'яному турбулентному горінні охолодити безпосередньо зону горіння, яка являє собою тонкий рухливий шар газу, практично неможливо. Тому на пожежі використовують інший метод гасіння – охолодження поверхні палаючої конденсованої речовини до температури нижче критичного значення.

2.1.2 Гасіння методом охолодження поверхні конденсованої речовини

Розглянемо механізм припинення процесів горіння за допомогою води охолоджуванням поверхні конденсованих горючих речовин і матеріалів.

Гасіння горючих рідин.

При дифузійному горінні горючої рідини гасіння полум'я розпиленою водою пов'язано з двома явищами – з випаровуванням води у факелі полум'я й на розжарених оточуючих твердих поверхнях і з охолоджуванням поверхневого шару палаючої рідини. Випаровування води в зоні горіння й охолодження горючої речовини протікають одночасно, але роль їх із точки зору кінцевого результату процесу неоднакова. В деяких випадках загасання полум'я відбувається внаслідок інтенсивного пароутворення води в зоні горіння, при якому різко знижується температура газового середовища і додатково зменшується концентрація компонентів горючої суміші за рахунок розбавлення їх паром. Так, для гасіння полум'я легкозаймистих рідин застосовують розпилену воду з середнім розміром крапель не більше за $100 \cdot 10^{-6}$ м, при цьому відбувається їх повне випаровування у факелі полум'я і охолодження зони горіння до температури погасання. Однак, в ряді випадків охолодження поверхні рідини, яка горить, може виявитися вирішальним чинником вогнегас-

ної дії води. Останнє має місце під час гасіння полум'я рідин з високою температурою спалаху, таких як гас і дизельне паливо.

Розглянемо механізм процесу гасіння горючої рідини методом охолодження її поверхневого шару. Розподіл температури за товщиною горючої рідини представлено на рис. 2.6.

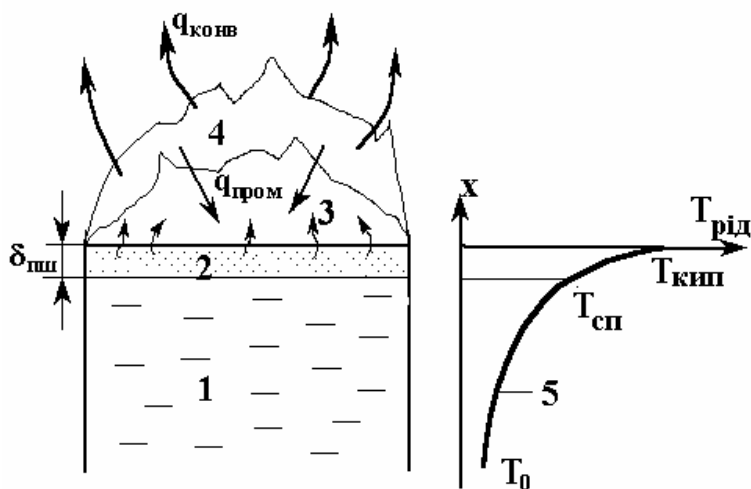


Рис. 2.6 – Зміна температури горючої рідини в залежності від відстані від поверхні:

1 – горюча рідина; 2 – поверхневий шар, прогрітий вище за температуру спалаху, товщиною $\delta_{\text{пш}}$; 3 – суміш горючих газів, які утворюються в процесі випаровування; 4 – факел полум'я; 5 – еюра поля температур в рідині при сталому горінні; x – відстань від поверхні горючої рідини в глибину; T_0 – початкова температура речовини; $\delta_{\text{пш}}$ – товщина шару рідини, прогрітого до критичної температури $T_{\text{кр}}$ (не нижче за температуру спалаху $T_{\text{сп}}$); $T_{\text{кип}}$ – температура поверхневого шару горючої рідини (наближається до температури кипіння).

Прийнято вважати, що профіль температур у прогрітому шарі описується рівнянням Міхельсона [12]:

$$T_{\text{рід}}(x) = T_o + (T_s - T_o)e^{-kx}, \quad (2.27)$$

де $T_{\text{рід}}(x)$ – температура рідини на відстані x ;

k – коефіцієнт, рівний відношенню лінійної швидкості вигорання горючої рідини v_l до коефіцієнта теплопровідності a_t .

Лінійну швидкість вигорання рідини можна представити як відношення масової швидкості вигорання до густини рідини, тоді коефіцієнт k дорівнює:

$$k = \frac{v_m}{a_t \rho_{\text{рід}}},$$

де v_m – масова швидкість вигорання горючої рідини, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$;

$\rho_{\text{рід}}$ – густина горючої рідини, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

a_t – коефіцієнт теплопровідності горючої рідини, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Надійного ефекту гасіння можна досягти тільки після того, як температура поверхневого шару стане меншою, ніж температура спалаху горючої рідини.

Кількість тепла, яку необхідно відвести від поверхневого шару горючої речовини, пропорційна часу гасіння, оскільки до моменту повного припинення горіння від факела полум'я весь час буде поступати певна кількість променистої енергії, яка обумовлює прогрів і випаровування горючої рідини. Отже припинення горіння реалізується, якщо від одиниці поверхні горючої рідини буде відведено наступну кількість тепла:

$$Q_{\text{відв. рід}} \geq q_{\text{пром}} \tau_{\text{гас}} + Q_{\text{зап. рід}}, \quad (2.28)$$

де $Q_{\text{відв. рід}}$ – питоме відведення тепла від одиниці площі поверхневого шару горючої рідини, $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2}$;

$q_{\text{пром.}}$ – інтенсивність променистого теплового потоку від факела полум'я до поверхні горючої рідини, $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$;

$\tau_{\text{гас.}}$ – час гасіння, с;

$Q_{\text{зап. рід}}$ – питома кількість тепла, що запасена в прогрітому шарі горючої рідини на одиниці площі поверхні рідини, $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2}$.

Кількість тепла, яка запасена в прогрітому шарі горючої рідини, залежить, насамперед, від виду горючої рідини і може бути виражена наступною формулою:

$$Q_{\text{зап. рід}} = \int_0^{\delta_{\text{пш}}} c_{\text{р рід}} \rho_{\text{рід}} (T_{\text{рід}}(x) - T_{\text{сп}}) dx, \quad (2.29)$$

де $\delta_{\text{пш}}$ – товщина прогрітого шару горючої рідини, яка залежить від теплофізичних характеристик рідини й часу горіння, м;

$c_{\text{р рід}}$ – питома теплоємність горючої рідини, $\text{кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;

$\rho_{\text{рід}}$ – густина горючої рідини, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

$T_{\text{рід}}(x)$ – функція розподілу поля температур за товщиною прогрітого шару горючої рідини, К;

$T_{\text{сп}}$ – температура спалаху горючої рідини, К.

Вираз (2.29) з урахуванням (2.27) і умови, що при $x = 0$ $T_{\text{рід}}(x)$ дорівнює $T_{\text{с}}$, а при $x = \delta_{\text{пш}}$ $T_{\text{рід}}(x) = T_{\text{сп}}$, можна записати у виді:

$$Q_{\text{запрід}} = \frac{\rho_{\text{рід}} \lambda_{\text{рід}}}{v_m} \left[1 - \exp \left(- \frac{v_m}{a_t \rho_{\text{рід}}} \delta_{\text{пш}} \right) \right] (T_s - T_o) - c_{\text{рід}} \cdot \rho_{\text{рід}} \cdot \delta_{\text{пш}} (T_{\text{сп}} - T_o) \quad (2.30)$$

Для пожеж резервуарів із горючими рідинами, у яких лінійна швидкість вигорання дорівнює швидкості прогріву, товщина $\delta_{\text{пш}}$ з часом не змінюється і приблизно дорівнює 0,05 м. Для рідин, у яких лінійна швидкість вигорання менше швидкості прогріву, у процесі горіння утворюється гомотермічний шар, при цьому задача розрахунку кількості тепла, яку потрібно відвести від горючої рідини для припинення горіння, ускладнюється тим, що товщина прогрітого шару пропорційна часу вільного розвитку пожежі. Товщина прогрітого шару зростає зі швидкістю, яка залежить від природи рідини і від умов, в яких протікає горіння (діаметра резервуара, швидкості вітру, відстані поверхні рідини від кромки резервуара і т.п.) [12]. Збільшення товщини прогрітого шару $\delta_{\text{пш}}$ із часом в першому наближенні можна розрахувати за формулою:

$$\delta_{\text{пш}} = v_{\text{прог}} \tau,$$

де $v_{\text{прог}}$ – середня швидкість прогрівання даної рідини;

τ – час, що відлічується від початку формування прогрітого шару (звичайно час з моменту запалення до початку формування шару не перевищує десяти хвилин).

Приведена формула справедлива тільки для порівняно невеликого часу горіння, що не перевищує одну годину. У разі тривалого горіння і значної висоти резервуара, заповненого горючою рідиною, товщина верхнього гомотермічного шару $\delta_{\text{пш}}$ прагне до граничного значення $\delta_{\text{кр}}$ згідно із законом:

$$\delta_{\text{пш}} = \delta_{\text{кр}} (1 - e^{-\eta \tau}),$$

де $\delta_{\text{кр}}$ – максимальна (критична) товщина прогрітого шару;

η – коефіцієнт, який залежить від властивостей рідини й діаметра резервуара;

τ – час, що відлічується від початку формування прогрітого шару.

Якщо передбачити, що все променисте тепло, яке поступає від факела полум'я до поверхні горючої рідини, витрачається на її нагрів від початкової температури до температури кипіння і на її випаровування, то питому кількість тепла, яку необхідно відвести від поверхневого прогрітого шару рідини, можна виразити через масову швидкість вигорання горючої рідини та її теплоту випаровування. Тоді формулу (2.28) з урахуванням (2.30) можна записати як:

$$\begin{aligned} Q_{\text{відв рід}} \geq & \tau_{\text{гас}} v_m [c_{\text{р рід}} (T_{\text{кип}} - T_0) + H_{\text{вип рід}}] + \\ & + \frac{\rho_{\text{рід}} \lambda_{\text{рід}}}{v_m} \left[1 - \exp \left(- \frac{v_m}{a_t \rho_{\text{рід}}} \delta_{\text{пш}} \right) \right] (T_s - T_0) - \\ & - c_{\text{р рід}} \cdot \rho_{\text{рід}} \cdot \delta_{\text{пш}} (T_{\text{сп}} - T_0), \end{aligned} \quad (2.31)$$

де $H_{\text{вип рід}}$ – теплота пароутворення горючої рідини, кДж·кг⁻¹.

При нанесенні води на поверхню палаючої речовини тепло прогрітого шару поглинається водою за рахунок протікання ендотермічних процесів нагріву і фазового переходу (випаровування). Питома кількість тепла, що поглинається шаром вогнегасної речовини на одиниці площі поверхні, може бути розрахована за формулою:

$$q_{\text{погл}} = q_1 + q_2 = c_{p_v} \delta_v \rho_v (T_{\text{кип}} - T'_k) + H_{\text{вип}} \delta_v \rho_v, \quad (2.32)$$

де q_1 – питомі витрати тепла на нагрівання шару води товщиною δ_v на одиниці площі поверхні від температури T'_k до температури кипіння;

q_2 – питомі витрати тепла на випаровування цієї води;

δ_v – товщина шару води, нанесеного на поверхню палаючої горючої речовини, м;

$T_{\text{кип}}$ – температура кипіння води;

T'_k – температура, з якою крапля води потрапляє на поверхню горючої рідини після проходження зони горіння;

$H_{\text{вип}}$ – питома теплота пароутворення води, кДж·кг⁻¹.

Однак відомо, що деякі горючі рідини добре розчиняються у воді, а багато горючих рідин вуглеводневої природи є легшими, ніж вода. Тому краплі води, які попали на поверхню горючої рідини, почнуть опускатися в її товщу.

Розглянемо поведінку одиночної краплі, яка рухається в горючій рідині. Краплі води дуже швидко втрачають свою початкову швидкість і падають потім із постійною швидкістю, величина якої залежить від в'язкості середовища й радіуса краплі і визначається зі співвідношення:

$$m_k \frac{dv_{oc}}{d\tau} = P - K v_{oc}^n, \quad (2.33)$$

де v_{oc} – швидкість, з якою осідає крапля води з масою m_k у товщі горючої рідини;

P – сила, яка рухає краплю, і визначається різницею між вагою краплі й архімедовою силою за формулою (2.12);

n – показник ступеня;

K – коефіцієнт опору.

Якщо рух краплі в товщі горючої рідини відбувається за законом Стокса, то значення $n = 1$, а коефіцієнт опору виражається формулою [13]:

$$K = 3\pi d_k \mu_{\text{рід}}, \quad (2.34)$$

де $\mu_{\text{рід}}$ – динамічна в'язкість горючої рідини.

Рішення диференційного рівняння (2.33) з урахуванням (2.12) та (2.34) дає можливість визначити швидкість, із якою осідає крапля води у товщі горючої рідини:

$$v_{\text{ос}} = \frac{\mu_{\text{рід}} Re}{d_k \rho_{\text{рід}}}. \quad (2.35 \text{ а})$$

Число Рейнольдса Re залежить від числа Архімеда Ar . Так, при ламінарному режимі осідання ($Ar \leq 36, Re \leq 2$).

$$Re = \frac{Ar}{18},$$

при турбулентному режимі осідання ($Ar > 83000, Re > 500$)

$$Re = 1,74 \sqrt{Ar},$$

при перехідному режимі осідання ($36 < Ar \leq 83000, 2 < Re \leq 500$)

$$Re = 0,152 Ar^{0,715},$$

де $Ar = \frac{g d_k^3 \rho_{\text{рід}}^2}{\mu_{\text{рід}}^2} \frac{\rho_k - \rho_{\text{рід}}}{\rho_{\text{рід}}}$ – число Архімеда (g – прискорення вільного падіння).

У випадку ламінарного руху рівняння (2.35 а) можна переписати як:

$$v_{oc} = \frac{g(\rho_k - \rho_{pid})}{18\mu_{pid}} d_k^2. \quad (2.35 б)$$

Швидкість осідання, а, отже, і час контакту краплі з поверхневим прогрітим шаром горючої рідини будуть залежати від розміру краплі й виду самої рідини. Так, якщо прийняти, що густина важких нафтопродуктів (нафта, дизельне паливо, мазут) у середньому становить $800 \div 850 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а динамічна в'язкість при $50^\circ\text{C} - (60 \div 80) \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$, то швидкість осідання крапель діаметром $100 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ приблизно дорівнює $1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $500 \cdot 10^{-6} \text{ м} - 3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, а краплі діаметром $1000 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ осідають зі швидкістю $0,01 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Час проходження крапель поверхневого шару товщиною $0,1 \text{ м}$ становитиме відповідно 800 с , 30 с , 8 с . У світлих нафтопродуктів (бензин, гас, октан) густина становить приблизно $700 \div 750 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а динамічна в'язкість при $50^\circ\text{C} - 8,5 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$, при цьому швидкість осідання крапель діаметром $100 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ приблизно дорівнює $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $500 \cdot 10^{-6} \text{ м} - 0,05 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, а краплі діаметром $1000 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ осідають зі швидкістю $0,16 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Час проходження краплями поверхневого шару товщиною $0,1 \text{ м}$ становитиме відповідно 60 с , 2 с , $0,6 \text{ с}$.

У перший момент крапля потрапляє в прогрітий поверхневий шар із температурою T_s . Оскільки температура поверхневого шару горючої рідини перевищує температуру краплі води в момент попадання її на поверхню рідини, то температура краплі під час просування в глибину починає підвищуватися й досягає своєї максимальної величини. За умови, що швидкість руху краплі визначається формулою (2.35 а), температура краплі в будь-якій точці її рушення може бути визначена з енергетичного балансу:

$$m_k c_{p_k} \frac{dT_k}{d\tau} = \alpha S_k (T_{\text{рід}}(x) - T_k), \quad (2.36 \text{ а})$$

або, якщо $d\tau$ представити як $dx/v_{\text{ос}}$:

$$\frac{dT_k}{dx} = \frac{\alpha S_k}{m_k c_{p_k} v_{\text{ос}}} (T_{\text{рід}}(x) - T_k). \quad (2.36 \text{ б})$$

Коефіцієнт теплопередачі α між краплею і рідиною визначається через число Нуссельта та характерний розмір краплі:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda_{\text{рід}}}{d_k}. \quad (2.37)$$

Для ламінарного режиму руху краплі число Нуссельта розраховується згідно критеріального рівняння:

$$\text{Nu} = 2 + 0,03 \text{Re}^{0,54} \text{Pr}^{0,33} + 0,35 \text{Re}^{0,53} \text{Pr}^{0,36},$$

де $\text{Pr} = \frac{\mu_{\text{рід}} c_{p_{\text{рід}}}}{\lambda_{\text{рід}}}$ – критерій Прандтля, що характеризує

теплофізичні властивості горючої рідини.

Вирішення рівняння (2.36 б) з урахуванням зміни температури горючої рідини згідно (2.27) дає можливість визначити температуру краплі води на будь-якій відстані від поверхні рідини:

$$T_k(x) = T_k' e^{-\beta x} + T_0 [1 - e^{-\beta x}] + \frac{\beta}{\beta - k} (T_s - T_0) [e^{-kx} - e^{-\beta x}], \quad (2.38)$$

де $\mathbf{x}$ – положення краплі в заданий момент часу;

$T_{\mathbf{k}}(\mathbf{x})$ – температура краплі на відстані $\mathbf{x}$;

$T'_{\mathbf{k}}$ – температура краплі води в момент попадання її на поверхню горючої рідини;

$\mathbf{k}$ – коефіцієнт, що характеризує процес вигорання й прогріву горючої рідини, дорівнює відношенню лінійної швидкості вигорання горючої рідини $\mathbf{v}_l$ до коефіцієнта температуропровідності $\mathbf{a}_t$;

β – коефіцієнт, що дорівнює:

$$\beta \equiv \frac{\alpha S_{\mathbf{k}}}{m_{\mathbf{k}} c_{p_{\mathbf{k}}} v_{oc}} = \frac{6 \lambda_{\text{рід}} Nu}{\rho_{\mathbf{k}} d_{\mathbf{k}}^2 c_{p_{\mathbf{k}}} v_{oc}}.$$

Якщо в процесі вигорання рідини на її поверхні встиг утворитися прогрітий шар, то після спрощення рівняння (2.36 а) та інтегрування рівняння (2.36 б) в межах від $\mathbf{x} = \mathbf{0}$,

$T_{\mathbf{k}} = T'_{\mathbf{k}}$ до $\mathbf{x} = \delta_{\text{пш}}$, $T_{\mathbf{k}} = T_{\text{max}}$ можна отримати вирази для швидкості зміни температури та максимальної температури, до якої крапля встигне нагрітися при проходженні через прогрітий шар горючої рідини товщиною $\delta_{\text{пш}}$ з температурою T_s :

$$\begin{aligned} \frac{dT_{\mathbf{k}}}{d\tau} &= \beta (T_s - T_{\mathbf{k}}), \\ T_{\text{max}} &= T_s - (T_s - T'_{\mathbf{k}}) \exp(-\beta \delta_{\text{пш}}). \end{aligned} \quad (2.39)$$

Максимальна температура, до якої нагрівається крапля води, залежить від розміру краплі, товщини і температури прогрітого шару, теплофізичних характеристик горючої рідини. Чим більший розмір краплі та менша температура T_s , тим повільніше вона прогрівається при проходженні через поверхневий шар рідини, і тим менша її максимальна температура.

Якщо горить висококипляча рідина, то з часом вигорання температура гомотермічного шару стане перевищувати 100°C . Крапля води, яка просувається через прогрітий шар горючої рідини, за рахунок теплопровідності прогріється до температури кипіння, і за умови подальшого підводу тепла, почне випаровуватися.

Кількість тепла, яку отримує рухома крапля за одиницю часу, буде пропорційна її поверхні, коефіцієнту теплообміну і різниці температур між краплею і середовищем, в якому вона рухається. Припустимо, що крапля рухається в поверхневому шарі горючої рідини, температура якого не змінюється й дорівнює T_s ; крім того у процесі нагрівання крапля не випаровується аж до досягнення температури кипіння. При цьому рівняння енергетичного балансу можна записати як:

$$\alpha \pi d_K^2 (T_s - T_K') \tau_n = \frac{1}{6} \pi d_K^3 \rho_K c_{p_K} (T_{\text{кип}} - T_K'), \quad (2.40)$$

де $T_{\text{кип}}$ – температура кипіння води;

T_K' – температура, з якою крапля води потрапляє на поверхню горючої рідини після проходження зони горіння.

Тоді час нагріву краплі до температури кипіння можна визначити з рівняння (2.40) з урахуванням (2.37) як:

$$\tau_n = \frac{\rho_K c_{p_K} (T_{\text{кип}} - T_K')}{6Nu\lambda_{\text{рід}} (T_s - T_K')} d_K^2. \quad (2.41)$$

Відстань, яку пройде крапля в процесі нагріву до початку її випаровування, з урахуванням (2.35 а) та (2.41) становитиме:

$$L_H = v_{oc} \tau_H = \frac{\mu_{pid} Re}{\rho_{pid}} \cdot \frac{\rho_K c_{pK} (T_{кип} - T_K')}{6Nu\lambda_{pid} (T_s - T_K')} d_K. \quad (2.42 \text{ а})$$

У випадку ламінарного руху після спрощення отримуємо:

$$L_H = 190 \frac{(\rho_K - \rho_{pid})}{\mu_{pid} \lambda_{pid}} \cdot \frac{(T_{кип} - T_K')}{(T_s - T_K')} d_K^3. \quad (2.42 \text{ б})$$

Якщо температура поверхневого шару горючої рідини перевищує 100°C, то крапля води після досягнення температури кипіння почне випаровуватися і зменшуватися в розмірі. Час повного випаровування краплі можна визначити зі співвідношення:

$$\alpha S_K (T_s - T_{кип}) d\tau = -S_K \rho_K H_{вип} dr_K, \quad (2.43 \text{ а})$$

$$\frac{d\tau}{dr_K} = -\frac{\rho_K H_{вип}}{\alpha (T_s - T_{кип})}. \quad (2.43 \text{ б})$$

Інтегруємо отримане рівняння:

$$\tau_{вип} \int_0^{r_K} d\tau = \int_0^{r_K} \frac{\rho_K H_{вип}}{\alpha (T_s - T_{кип})} dr_K.$$

Рішення цього рівняння з урахуванням (2.37) та при сталому числі Нуссельта дає час повного випаровування краплі:

$$\tau_{вип} = \frac{\rho_K H_{вип}}{Nu\lambda_{pid} (T_s - T_{кип})} r_K^2. \quad (2.44)$$

Тоді відстань, на якій крапля повністю випарується, можна визначити як:

$$L_{\text{вип}} = \int_0^{\tau_{\text{вип}}} v_{\text{ос}} d\tau = \int_{r_{\text{к}}}^0 v_{\text{ос}} \left(\frac{d\tau}{dr_{\text{к}}} \right) dr_{\text{к}} =$$

$$= \frac{\mu_{\text{рід}}}{\rho_{\text{рід}}} \frac{\rho_{\text{к}} H_{\text{вип}}}{\lambda_{\text{рід}} (T_{\text{с}} - T_{\text{кип}})} \int_0^{r_{\text{к}}} \frac{Re}{Nu} dr_{\text{к}} \quad (2.45 \text{ а})$$

що у випадку ламінарного руху (тобто за малих значеннях критерію Re) з урахуванням числа Архімеда дає:

$$L_{\text{вип}} = \frac{\mu_{\text{рід}}}{\rho_{\text{рід}}} \frac{\rho_{\text{к}} H_{\text{вип}}}{\lambda_{\text{рід}} (T_{\text{с}} - T_{\text{кип}})} \int_0^{r_{\text{к}}} \frac{g \rho_{\text{рід}} (\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{рід}}) d_{\text{к}}^3}{36 \mu_{\text{рід}}^2} dr_{\text{к}} =$$

$$= \frac{g (\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{рід}}) \rho_{\text{к}} H_{\text{вип}} d_{\text{к}}^4}{288 \mu_{\text{рід}} \lambda_{\text{рід}} (T_{\text{с}} - T_{\text{кип}})}.$$

Після спрощення отримуємо:

$$L_{\text{вип}} = 34 \frac{(\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{рід}})}{\mu_{\text{рід}} \lambda_{\text{рід}}} \frac{H_{\text{вип}}}{(T_{\text{с}} - T_{\text{кип}})} d_{\text{к}}^4. \quad (2.45 \text{ б})$$

В роботі [14] наведено результати розрахунків часу та відстані, на якій відбудеться повне випаровування краплі води, в залежності від виду горючої рідини та початкового діаметру крапель.

Таблиця 2.3 – Час повного випаровування та довжина шляху краплі води в нагрітій горючій рідині (початкова температура краплі становить 40°C).

$d_k, 10^{-6} \text{ м}$	$\tau_n, \text{ с}$	$L_n, 10^{-3} \text{ м}$	$\tau_{\text{вип}}, \text{ с}$	$L_{\text{вип}}, 10^{-3} \text{ м}$	$\tau_{\text{заг}}, \text{ с}$	$L_{\text{заг}}, 10^{-3} \text{ м}$
Бензин						
100	0,03	0,23	1,91	7,51	1,94	7,74
200	0,09	1,55	5,59	53,97	5,68	55,51
Трансформаторне масло						
100	0,01	0,02	0,11	0,10	0,12	0,11
200	0,02	0,12	0,38	1,14	0,40	1,26
400	0,06	1,01	1,07	9,71	1,13	10,72

Пара, що утворюється внаслідок випаровування краплі води, спінює горючу рідину. Виникнення скипання можливо при виконанні наступних умов:

- температура поверхневого шару горючої рідини T_s більша за температуру кипіння води;
- густина горючої рідини менша, ніж густина води;
- горюча рідина не розчиняється у воді;
- товщина прогрітого гомотермічного шару $\delta_{\text{пш}}$ більша, ніж відстань, на якій крапля встигне прогрітись й випаруватися ($L_n + L_{\text{вип}}$).

Перші три умови залежать тільки від теплофізичних характеристик горючої рідини, в той час як остання умова додатково визначається часом розвитку горіння (впливає на $\delta_{\text{пш}}$) та розмірами краплі (впливає на значення ($L_n + L_{\text{вип}}$)).

Якщо діаметр крапель води відносно великий і час стало-го горіння рідини незначний, то товщина прогрітого шару горючої рідини менша, ніж відстань, на якій крапля прогріється до температури кипіння або повністю випарується. Кінцевий розмір краплі після проходження прогрітого шару горючої рідини (за умови, що температура цього прогрітого шару більша, ніж температура кипіння води) можна визначити з енергетич-

ного балансу (2.43а), якщо $d\tau$ представити як dx/v_{oc} . Тоді отримаємо наступне співвідношення:

$$(T_s - T_{кип})dx = -\frac{\rho_k H_{вип} v_{oc}}{\alpha} dr_k.$$

Вирішення цього рівняння у випадку ламінарного руху, з урахуванням (2.35 б), (2.37) та числа Архімеда, дає:

$$r_k = 4 \sqrt{(r'_k)^4 - \frac{9Nu\lambda_{рід}\mu_{рід}}{H_{вип}\rho_k g(\rho_k - \rho_{рід})}(T_s - T_{кип})\delta_{пш}} \quad (2.46)$$

де r_k – кінцевий розмір краплі води після проходження прогрітого шару горючої рідини;

r'_k – радіус, з яким крапля потрапляє на поверхню рідини після проходження зони горіння і визначається формулою (2.24).

Оцінимо коефіцієнт використання води при випаровуванні її в товщі горючої рідини так само, як при охолодженні газової фази. Витрату води, яку було подано на гасіння m_0 , можна представити у виді суми маси води m_1 , яка випаровується за одиницю часу в газовій фазі, маси води m_2 , яка випаровується за одиницю часу в прогрітому шарі горючої рідини, і маси води m_3 , яка не випаровується, а, отже, прийемо, що не бере участі в процесі безпосереднього охолодження речовини:

$$m_0 = m_1 + m_2 + m_3.$$

Виразимо коефіцієнт використання води на кожному етапі як частку, яка встигла випаруватися, від загальної витрати води, поданої на гасіння. Тоді:

$$1 = k_{\text{вик}}(\Gamma) + k_{\text{вик}}(\text{ПШ}) + k_{\text{втр}},$$

де $k_{\text{вик}}(\Gamma) = \frac{m_1}{m_0}$ – коефіцієнт використання води в газовій фазі;

$k_{\text{вик}}(\text{ПШ}) = \frac{m_2}{m_0}$ – коефіцієнт використання води в поверхневому шарі горючої рідини;

$$k_{\text{втр}} = \frac{m_3}{m_0} \text{ – коефіцієнт втрат.}$$

Припустимо, що густина води залишається незмінною, тоді масу води можна виразити через відповідні середні радіуси крапель. Тоді, з урахуванням (2.25 а), коефіцієнт використання води в поверхневому шарі горючої рідини можна виразити як:

$$k_{\text{вик}}(\text{ПШ}) = 1 - k_{\text{вик}}(\Gamma) - k_{\text{втр}} = \frac{\left(\frac{r_{\text{к}}}{r_{\text{к}}^0}\right)^3 - \left(\frac{r_{\text{к}}}{r_{\text{к}}^0}\right)^3}{\left(\frac{r_{\text{к}}}{r_{\text{к}}^0}\right)^3},$$

де $r_{\text{к}}^0$ – початковий розмір крапель води, яка подається на гасіння;

$\frac{r_{\text{к}}}{r_{\text{к}}^0}$ – кінцевий розмір крапель після їх проходження через зону нагрітих продуктів горіння;

$r_{\text{к}}$ – кінцевий розмір крапель після їх проходження через прогрітий шар горючої рідини.

Підставивши значення $\frac{r_{\text{к}}}{r_{\text{к}}^0}$ з рівняння (2.24) та $r_{\text{к}}$ з рівняння (2.46), отримаємо:

$$k_{\text{вик(ПШ)}} = \frac{\left(\sqrt{(r_k^o)^2 - \frac{2\lambda_{\Gamma} (T_{\Gamma} - T_K)}{H_{\text{вип}} \rho_K} \tau_{\text{пол}}} \right)^3}{(r_k^o)^3} - \frac{\left(\sqrt[4]{(r_k^o)^4 - \frac{9Nu \lambda_{\text{рід}} \mu_{\text{рід}}}{H_{\text{вип}} \rho_K g(\rho_K - \rho_{\text{рід}})} (T_s - T_{\text{кип}}) \delta_{\text{пш}}} \right)^3}{(r_k^o)^3} \quad (2.47)$$

Значення $k_{\text{вик(ПШ)}}$ значною мірою залежить від температури й товщини прогрітого поверхневого шару горючої рідини. Так, якщо прийняти, що температура прогрітого шару 110°C , то навіть при товщині цього шару $0,1$ м і початковому радіусі краплі $200 \cdot 10^{-6}$ м коефіцієнт використання не перевищує $0,08$. Якщо температура прогрітого шару 200°C , початковий радіус краплі $200 \cdot 10^{-6}$ м, то $k_{\text{вик(ПШ)}}$ дорівнює $0,21$; $0,42$; $0,71$ при товщині гомотермічного шару $0,01$ м, $0,02$ м і $0,03$ м відповідно.

За мірою занурення углиб нагріті краплі води віддають тепло більш холодним нижнім шарам рідини. При цьому відбувається перенесення тепла від прогрітого верхнього шару до нижніх холодних шарів. Перенесення тепла вглиб спричиняє пониження температури поверхні горючої речовини, внаслідок чого зменшується швидкість випаровування. Зниження температури поверхні відбувається не тільки внаслідок перенесення тепла краплями, але й унаслідок конвекційного перемішування верхнього шару палива з нижніми шарами. Це перемішування спричиняється проходженням через рідину великої кількості крапель води. Якщо інтенсивність подачі розпиленої води досить велика, то температура поверхневого шару горючої рідини може стати меншою, ніж температура спалаху, і полум'я затухне.

Отже, гасіння полум'я шляхом охолодження поверхні палаючої рідини може бути досягнуте лише за умови, що температура крапель води, які попадають у прогрітий шар рідини, буде значно нижчою за температуру спалаху цієї рідини. Ефект охолодження тим вище, чим вище температура кипіння горючої рідини. Крім того, охолоджуюча дія води пов'язана певним чином із розмірами крапель, оскільки нагрівання їх у газовій фазі, а отже, їх температура в момент занурення в рідину залежать від початкового діаметру крапель. Великі краплі проходять через факел полум'я без істотного підвищення температури і тому виявляються найбільш ефективними з точки зору охолоджуючої дії саме поверхневого шару. Якщо ці краплі досить великі, гасіння полум'я буде відбуватися тільки внаслідок охолодження рідини; роль паротворення в зоні горіння при цьому буде зведена до мінімуму. Так, у роботі [15] експериментально було встановлено, що температура поверхневого шару горючих рідин у процесі горіння звичайно досягає значення, яке перевищує температуру спалаху на 70–80°C, а середня температура, до якої краплі води розмірами біля $500 \cdot 10^{-6}$ м встигнуть нагрітися при проходженні через зону розжарених продуктів горіння, становить 40–45°C.

Таким чином, гасіння полум'я горючих рідин з високою температурою спалаху легко здійснюється за допомогою розпиленої води з великим діаметром крапель. Це положення підтверджується вогневими дослідями й практикою пожежогашіння. Відомо, що горіння мазуту легко подавляється розпиленою водою з низьким ступенем дисперсності.

При введенні полідисперсного розпиленого струменя в осередок горіння деяка кількість крапель неминуче випаровується, причому маса води, що випаровується, визначається часткою дрібних крапель. У зв'язку з цим пароутворення завжди має місце навіть при гасінні полум'я рідин із високою температурою спалаху, а при гасінні полум'я легкозаймистих рідин, зокрема бензину, випаровування води у факелі полум'я і на твердих поверхнях має вирішальне значення.

Ефективність води як вогнегасного засобу залежить не тільки від міри дисперсності, але і від умов горіння рідини. Найбільш легкими відносно процесу гасіння полум'я є випадки горіння в закритих приміщеннях малого об'єму або горіння рідини, розлитої на поверхні і вбраної пористим матеріалом – піском, шлаком, ґрунтом і т.п. Найбільш складними є пожежі палива в резервуарах, ямах, канавах, тобто в тих випадках, коли горіння протікає при необмеженому доступі повітря, а товщина шару горючої речовини велика. Труднощі, що виникають при гасінні полум'я в цих умовах, пов'язані з тим, що водяна пара, яка утворюється над поверхнею палаючої рідини, безперервно розсіюється в навколишньому просторі.

Для аналізу ефективності процесу гасіння полум'я горючих рідин розпиленою водою проводилися полігонні досліді [16]. У перші ж секунди після введення розпиленої води в резервуар, що горить, спостерігається скипання горючої рідини, що супроводжується утворенням спіненого шару і, в деяких випадках, переливом через борт резервуара. При збільшенні товщини прогрітого шару горючої рідини потужність скипання зростає, тобто збільшується товщина шару, що піниться, і тривалість процесу спінювання. Процес скипання пояснюється тим, що краплі води розмірами від $100 \cdot 10^{-6}$ м до $500 \cdot 10^{-6}$ м не встигають повністю випаруватися у факелі полум'я і попадають у прогрітий шар горючої рідини, де стають центрами пароутворення. У результаті відбувається бурхливе кипіння по всій товщині прогрітого нафтопродукту. Товщина шару піни приблизно дорівнює подвоєній товщині прогрітого шару. Тому для того, щоб уникнути переливання через борт резервуара палаючої рідини під час гасіння пожежі розпиленою водою, необхідно, щоб висота вільної стінки резервуара більше ніж у два рази перевищувала максимально можливу товщину прогрітого шару горючої рідини.

Після введення розпиленої води у факел полум'я спостерігається відрив полум'я, що супроводжується хлопком. Потім періодично повторюються спалахи з поступово зростаючою силою,

доки не буде охолоджений поверхневий шар. Це явище пояснюється тим, що після введення розпиленої води у факел полум'я відбувається бурхливе пароутворення. Велика кількість водяної пари, що утворилася, відриває полум'я і знижує концентрацію пари горючої рідини. Наступає гасіння полум'я. Газове середовище швидко охолоджується, внаслідок чого велика частина крапель води, які продовжують поступати з розпилювача, вже не може випаруватися, концентрація пари води поступово знижується, а концентрація пари горючої рідини збільшується. Вибухонебезпечна концентрація горючої пари знову відновлюється й запалюється під впливом розжареної стінки резервуара – відбувається спалах. Полум'я знову спричиняє інтенсивне випаровування крапель води, і процес повторюється, доки весь прогрітий шар горючої рідини не буде охолоджений.

Необхідно відмітити двояку роль розігрітих стінок резервуара: з одного боку, вони сприяють більш інтенсивному прогріванню вглиб горючої рідини та виступають джерелом повторного запалення горючих газів; з іншого – нагріта стінка буде сприяти бурхливому пароутворенню води а створенню сприятливих умов для гасіння. Досліди показали, що ефект гасіння розпиленою водою наступав при деякій мінімальній для даного діаметра резервуара висоті вільного борта **h** . При висоті борта менше **$h_{\min}$** гасіння розпиленою водою не досягалось. При **$h > h_{\min}$** ефект гасіння розпиленою водою зростав із збільшенням **h** . Мінімальна висота вільного борту, за якої буде забезпечене впевнене гасіння розпиленою водою, може бути виражена наближеною формулою:

$$h_{\min} = 0,15 \cdot D ,$$

де **D** – діаметр резервуара.

Гасіння твердих горючих матеріалів.

Найбільш ефективно гасіння пожеж водою способом охолодження поверхні речовини, що горить, здійснюється під час

горіння твердих горючих матеріалів. При охолодженні палаючих речовин водою деяка її кількість випаровується і переходить в пару, завдяки чому підвищується швидкість гасіння. Поверхня матеріалу, що горить, при попаданні води частково змочується. У деяких випадках вода проникає в глибину за рахунок механічної дії струменів.

Потрібно зазначити, що у разі наявності гетерогенного горіння (тління, горіння коксу, деревного вугілля, сажі) дія водяного струменя приводить до охолодження безпосередньо зони горіння твердих речовин.

Розглянемо більш докладно процес гасіння твердих горючих матеріалів (ТГМ) методом охолодження поверхневого шару на прикладі горіння деревини. До моменту початку гасіння деревина, що горить, прогрівається на деяку глибину і на її поверхні утворюється шар вуглецевого залишку, товщина якого залежить від часу горіння. Під високопористим шаром вугілля, що утворився внаслідок вигорання летючих компонентів, знаходиться шар деревини, в якому відбувається процес піролізу за рахунок потоку тепла від поверхневого шару, тобто матеріал інтенсивно розкладається з виділенням великої кількості горючих газів, які проходять через пористий вуглецевий шар і утворюють концентрацію, достатню для підтримки горіння. Тому навіть якщо загасити полум'яне горіння, над поверхнею твердого матеріалу знову створюються умови, достатні для повторного займання газоподібних продуктів розкладання і продовження горіння. Якщо товщина вуглецевого залишку значна, то полум'яне горіння може самостійно припинитися. К тому ж припинення полум'яного дифузійного горіння ще не означає припинення горіння взагалі, оскільки багато твердих горючих матеріалів здатні до гетерогенного горіння. Потрібно зазначити, що температура поверхневого шару цих матеріалів у процесі горіння сягає вище за 500-600°C, це значно перевищує не тільки температуру самоспалахування, а й навіть температуру вимушеного запалювання багатьох горючих газів, які утворилися при розкладанні.

Отже, умовою повного й надійного припинення горіння твердих матеріалів є не тільки припинення полум'яного горіння над їх поверхнею, але й охолодження верхнього прогрітого шару до температури, яка нижче за температуру початку виходу горючих летючих фракцій або, іншими словами, початку піролізу (для деревини $< 200^{\circ}\text{C}$). При цьому концентрація горючих компонентів у зоні горіння зменшиться (стане нижче нижньої концентраційної межі поширення полум'я), інтенсивність тепловиділення знизиться, температура у фронті полум'я стане менше температури погасання, і горіння припиниться. Таким чином, умовою, необхідною й достатньою для припинення горіння твердих горючих матеріалів, буде:

$$T_s < T_{\text{пір}}, \quad (2.48)$$

де T_s – температура поверхневого шару твердого горючого матеріалу;

$T_{\text{пір}}$ – температура початку піролізу твердих горючих матеріалів.

Ця умова реалізується шляхом забезпечення відведення певної кількості тепла від поверхні палаючого матеріалу:

$$Q_{\text{відв. тв}} \geq \tau_{\text{гас}} (q_{\text{пром.}} + q_{\text{конв.}}) + Q_{\text{зап.тв.}}, \quad (2.49)$$

де $Q_{\text{відв. тв.}}$ – питома кількість тепла, яку необхідно відвести від одиниці поверхні прогрітого шару твердого горючого матеріалу для припинення процесу полум'яного горіння летючих речовин над поверхнею матеріалу і гетерогенного горіння в прогрітому шарі; $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2}$;

$q_{\text{пром.}}$ – питома інтенсивність променистого теплового потоку від факела полум'я до поверхні ТГМ, $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$;

$q_{\text{конв.}}$ – питома інтенсивність конвекційного теплового потоку від факела полум'я до поверхні ТГМ, $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ (на

відміну від рідин, тверді матеріали можуть знаходитися під різним кутом нахилу відносно напрямку поширення фронту полум'я, що призводить до збільшення конвекційної складової прогріву матеріалу);

$\tau_{\text{гас.}}$ – час гасіння, с;

$Q_{\text{зап. тв.}}$ – питома кількість тепла, яка запасена в поверхневому шарі ТГМ, прогрітому вище за температуру початку піролізу, $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2}$ (див. рис. 2.7).

Питома кількість тепла, запасена в прогрітому шарі на одиниці площі поверхні ТГМ, може бути виражена через приведений тепловміст цього шару:

$$Q_{\text{зап. тв.}} = \int_0^{\delta_{\text{пш}}} c_{\text{р тв}} \rho_{\text{тв}} (T(x) - T_{\text{пір}}) dx, \quad (2.50)$$

де $\delta_{\text{пш}}$ – товщина шару твердого горючого матеріалу, прогрітого до температури не нижче за температуру початку піролізу, м;

$c_{\text{р тв}}$ – питома теплоємність піролізованого шару твердого горючого матеріалу, $\text{кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$;

$\rho_{\text{тв}}$ – густина піролізованого шару твердого матеріалу, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

x – відстань від поверхні твердого матеріалу в глибину, м;

$T(x)$ – функція розподілу поля температур за товщиною прогрітого шару ТГМ.

Питома теплоємність і густина піролізованого шару залежать від температури і міри його термічного розкладання. Приймаючи, що температура прогрітого шару твердого матеріалу змінюється відповідно до рівняння Міхельсона (2.27), вираз (2.50) можна записати у виді:

$$Q_{\text{зап. тв}} = \frac{\rho_{\text{тв}} \lambda_{\text{тв}}}{v_{\text{м}}} \left[1 - \exp \left(- \frac{v_{\text{м}}}{a_{\text{т}} \rho_{\text{тв}}} \delta_{\text{пш}} \right) \right] (T_{\text{s}} - T_{\text{o}}) - c_{\text{р тв}} \rho_{\text{тв}} \delta_{\text{пш}} (T_{\text{пір}} - T_{\text{o}}) \quad (2.51)$$

де $\lambda_{\text{тв}}$ – коефіцієнт теплопровідності піролізованого шару твердого матеріалу, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

$a_{\text{т}}$ – коефіцієнт температуропровідності піролізованого шару твердого матеріалу, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;

T_{o} – початкова температура твердого матеріалу, К ;

$v_{\text{м}}$ – масова швидкість вигорання твердого матеріалу, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Якщо припустити, що тепло, яке поступає від факела полум'я до поверхні твердого горючого матеріалу за рахунок променистої й конвекційної теплопередачі ($q_{\text{пром.}} + q_{\text{конв.}}$), витрачається на процес термічного розкладання, а теплота процесів, які протікають у поверхневому шарі при піролізі, пропорційна масовій швидкості вигорання, то кількість тепла, яку необхідно відвести від одиниці поверхні прогрітого шару твердого матеріалу, можна виразити рівнянням:

$$Q_{\text{відв тв}} \geq \tau_{\text{гас}} v_{\text{м}} H_{\text{пір}} + \frac{\rho_{\text{тв}} \lambda_{\text{тв}}}{v_{\text{м}}} \left[1 - \exp \left(- \frac{v_{\text{м}}}{a_{\text{т}} \rho_{\text{тв}}} \delta_{\text{пш}} \right) \right] (T_{\text{s}} - T_{\text{o}}) - c_{\text{р тв}} \rho_{\text{тв}} \delta_{\text{пш}} (T_{\text{пір}} - T_{\text{o}}), \quad (2.52)$$

де $H_{\text{пір}}$ – питома теплота процесу піролізу, що протікає в поверхневому шарі ТГМ, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Отже, для гасіння твердих горючих матеріалів методом охолодження поверхневого шару водою необхідно забезпечити такі умови, за яких кількість тепла, що поглинається вогнегасною речовиною, буде перевищувати кількість тепла, що необхідно відвести від поверхневого прогрітого шару ТГМ. Гасіння станеться за умови:

$$Q_{\text{погл.}} \geq Q_{\text{відв. тв.}} \quad (2.53)$$

У роботі [17] розраховано мінімально необхідну кількість води, яку необхідно подати на одиницю площі деревини для успішного гасіння. Розглядається спрощена схема процесу дифузійного горіння горизонтально розташованого термічностовстого зразка. При цьому конвекційною складовою теплового впливу від полум'я на поверхню зразка можна нехтувати. Припускається також, що процес вільного горіння продовжувався досить довго, при цьому деревина, яка має велику загальну товщину зразка, прогрілася на максимальну глибину (товщина прогрітого шару $\delta_{\text{пш}}$ становить величину порядку 0,01–0,02 м), а поверхневий шар досяг максимальної температури ($t_s = 500\text{--}700^\circ\text{C}$). Масова швидкість вигорання деревини V_m на пожежі становить близько $0,01 \text{ кг м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, густина частково піролізованої деревини ρ становить $300 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, теплоємність $c_p = 1,47 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Питома теплота піролізу твердих горючих матеріалів при дифузійному горінні складає малу частку від загальної кількості тепла, що виділяється при горінні більшості натуральних і синтетичних ТГМ. Як правило, для деревини $H_{\text{пир}}$ не перевищує 5-6 % робочої теплоти згорання Q_p , яка, в свою чергу, приблизно дорівнює $16800 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$ [18].

Процес горіння твердого горючого матеріалу представлений у виді наступної схеми (рис. 2.7).

Процес гасіння представлений таким чином, що на всю поверхню деревини рівномірно нанесений шар води певної необхідної товщини δ_v за достатньо короткий проміжок часу (умовно 10 с). Нанесений шар води не стікає з поверхні, тобто

вся подана вода повністю бере участь у процесі гасіння (рис. 2.8).

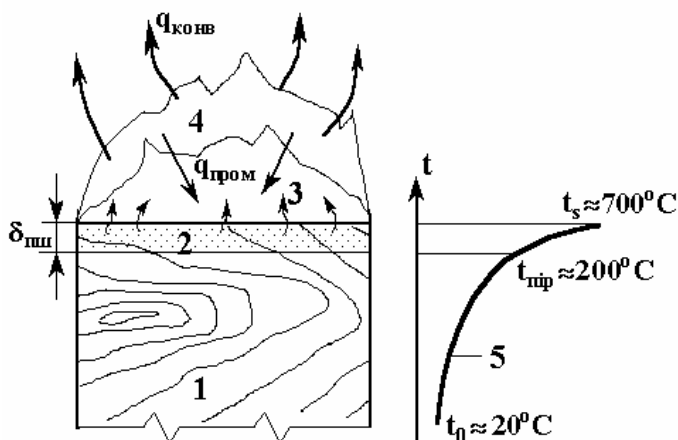


Рис. 2.7 - Схема процесу горіння над горизонтальною поверхнею твердого горючого матеріалу:

1 – твердий горючий матеріал (деревина); 2 – поверхневий шар, прогрітий вище за температуру піролізу, товщиною $\delta_{\text{пш}}$; 3 – суміш горючих газів, які утворюються в процесі піролізу; 4 – факел полум'я; 5 – епюра поля температур у деревині при сталому горінні.

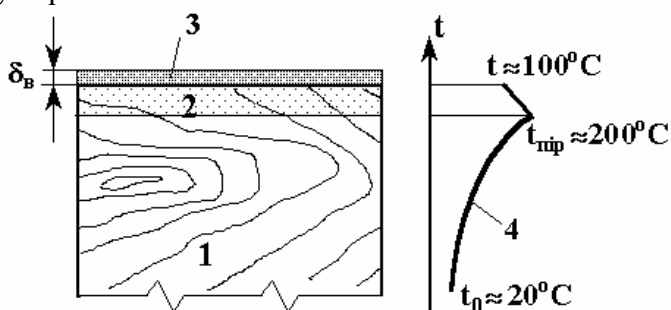


Рис. 2.8 - Схема процесу гасіння полум'я водою над горизонтальною поверхнею твердого горючого матеріалу:

1 – твердий горючий матеріал (деревина); 2 – поверхневий прогрітий шар; 3 – шар води товщиною $\delta_{\text{в}}$, необхідною для гасіння; 4 – епіюра поля температур у деревині в момент гасіння.

При цьому не враховується охолоджуюча дія води й водяної пари на зону полум'я, а також ізолюючий та екрануючий вплив води, яка протягом певного часу знаходиться на поверхні деревини, вбирається в її поверхневий шар і захищає від променистого й конвекційного теплових потоків, що йдуть від зони горіння. Ці ефекти йдуть у запас надійності процесу гасіння.

Розглядається лише домінуючий механізм охолодження поверхневого шару палаючої деревини при контакті з водою за рахунок прогрівання води до температури кипіння та її випаровування з розігрітої поверхні деревини.

Тоді задача зводиться до визначення товщини шару води на поверхні деревини $\delta_{\text{в}}$, необхідної для припинення горіння над поверхнею зразка. Питома кількість тепла, яку буде відведено від одиниці площі палаючого матеріалу водою, нанесеною на поверхню в процесі гасіння, обумовлюється тією кількістю тепла, що поглинається шаром вогнегасної речовини за рахунок нагріву і випаровування води, і може бути розрахована за формулою (2.32).

Після вирішення системи рівняння (2.32), (2.52), (2.53) відносно $\delta_{\text{в}}$ і підстановки чисельних значень величина $\delta_{\text{в}} \approx (0,2 \div 0,5) \cdot 10^{-3}$ м у залежності від густини карбонізованого залишку, температури поверхневого шару та інших теплофізичних параметрів поверхневого шару горючої речовини. Таким чином, в середньому питома витрата води на гасіння ТГМ методом охолодження поверхні становить близько $0,5 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2}$. Однак такими малими питомими витратами води можна згасити пожежу тільки за заздалегідь визначених умов:

- поверхня, що горить, розташована горизонтально;
- розміри поверхні відносно невеликі;
- вода, яка подається на гасіння, не стікає з поверхні твердого матеріалу і повністю бере участь в охолодженні поверхневого шару.

У лабораторних випробуваннях, де виконуються такі умови, аналітично отримані значення підтверджуються експериментально з достатньою точністю. При порушенні прийнятих умов механізм гасіння істотно змінюється, задача втрачає свою однозначність через невизначений час подачі води, неодноразовність подачі її на поверхню зразка, що горить, через інтенсивне стікання води у випадку похилого або вертикального положення палаючої поверхні. Значення критичної витрати розпиленої води, які визначені експериментально різними авторами [19, 20] для гасіння деревини, на порядок більше, ніж теоретично необхідна витрата. При переході від модельних вогнищ до реальних пожеж різниця між теоретичною та фактичною витратою води зростає ще більше [21]. Так, статистичні дані, отримані при гасінні пожеж твердих горючих матеріалів, показують, що навіть у найбільш успішних випадках гасіння мінімальна витрата води становить близько $50\text{--}100 \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}$, тобто з усієї кількості води, що подається на гасіння пожежі, в гасінні бере участь не більше 1%. На гасіння складних пожеж витрачається $500\text{--}600 \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}$, а найбільш складні випадки гасіння тривалих пожеж на найбільш складних у пожежному відношенні об'єктах (типу лісобірж, складів лісопиломатеріалів, підвалів тощо) дають значення порядку $1500\text{--}2000 \text{ л}\cdot\text{м}^{-2}$ [22, 23].

Це пояснюється тим, що інтенсивність виходу летючих горючих фракцій, а, отже, розмір зони полум'яного горіння твердих горючих матеріалів значною мірою залежить від величини питомої площі поверхні горіння ($S_{\text{пит}} = S_{\text{гор}}/V_{\text{гр}}$), коефіцієнта поверхні горіння ($K_{\text{п}} = S_{\text{гор}}/S_{\text{пож}}$), температурного режиму процесу горіння, просторової орієнтації горючого матеріалу та інших чинників, що визначають режим горіння ТГМ. При збільшенні площі пожежі істотно зростає нерівномірність розподілу води по поверхні речовини, яка горить. Нерівномірність розподілу по площі має місце, коли площа пожежі стає більшою за площу, зрошувану одним пожежним стволом або одним розпилюючим пристроєм.

Крім того, на реальних пожежах ТГМ коефіцієнт поверхні горіння становить $3 \div 7$, при цьому більше за половину поверхні, що горить, недоступно для прямого нанесення на неї вогнегасних засобів, отже, різко зростає питома витрата води.

У роботі [24] пропонується емпірична залежність питомої витрати води $g_{\text{факт}}$ ($\text{л} \cdot \text{м}^{-2}$) на гасіння ординарних пожеж ТГМ від площі пожежі $S_{\text{пож.}}$ (м^2):

$$\lg g_{\text{факт}} = 1,1 \cdot \lg S_{\text{пож.}} + 0,302. \quad (2.54)$$

Таким чином, необхідною й достатньою умовою гасіння пожежі у всіх випадках є забезпечення певної інтенсивності тепловідводу від зони горіння або поверхні горючої речовини, за якої їх температура знижується до критичного значення ($T_{\text{пог}}$ для зони горіння і $T_{\text{сп}}$ або $T_{\text{пір}}$ для поверхні конденсованих речовин). Чисельне значення інтенсивності тепловідводу залежить від виду горючої речовини, режиму її горіння, об'єму зони горіння, товщини прогрітого шару горючої речовини й часу гасіння, причому воно тим нижче, чим менший час гасіння.

У роботі [25] показано, що оптимальні інтенсивності тепловідводу, які потрібні для припинення горіння, віднесені до інтенсивності тепловиділення при цих режимах горіння, є величини приблизно постійні. Дане відношення запропоновано як критерій процесу гасіння:

$$K_{\text{гас}} = \frac{q_{\text{відв}}}{q_{\text{вид}}}, \quad (2.55)$$

де $q_{\text{відв}}$ – інтенсивність тепловідводу від зони горіння або з одиниці поверхні конденсованої горючої речовини, $\text{кДж} \cdot \text{с}^{-1}$;

$q_{\text{вид}}$ – інтенсивність тепловиділення при горінні, яку можна виразити як:

$$q_{\text{вид}} = \beta v_m Q_n, \text{ кДж} \cdot \text{с}^{-1} \quad (2.56)$$

де β – коефіцієнт повноти згоряння;

v_m – масова швидкість вигорання горючої речовини ($\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ – для газів або $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$ – для конденсованих горючих речовин);

Q_n – нижча теплота згоряння горючої речовини ($\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3}$ для газів або $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ для конденсованих горючих речовин).

Підставивши чисельні значення величин у формулу (2.55), можна побачити, що для гасіння пожеж методом охолодження зони горіння $K_{\text{гас}} = 0,1$, а методом охолодження поверхні конденсованого горючого матеріалу $K_{\text{гас}} = 0,2 \div 0,4$.

Знаючи чисельне значення критерію гасіння для всіх видів горючих речовин, можна розрахувати необхідну витрату вогнегасних речовин:

$$g_v = \frac{q_{\text{відв}}}{q_{\text{погл}}} = \frac{K_{\text{гас}} \beta v_m Q_n}{q_{\text{погл}}} \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (2.57)$$

а також усі основні параметри процесу гасіння – інтенсивність подачі вогнегасної речовини, нормативний час гасіння, сумарний запас вогнегасної речовини, необхідний для гасіння пожежі. Все це дозволяє розробити наукові основи проектування автоматичних систем пожежогасіння з оптимальними параметрами систем і процесу гасіння.

2.2 Вода як флегматизуючий вогнегасний засіб

У практиці пожежогасіння часто застосовується об’ємний спосіб, за якого вогнегасний засіб розподіляється у всьому об’ємі, що захищається, створюючи при цьому в кожному його елементі необхідну вогнегасну концентрацію. Водяна пара знаходить широке застосування під час гасіння пожеж в закритих об’ємах або технологічних установках.

Усі розрахунки, приведені вище, були побудовані на припущенні, що вода при гасінні чинить тільки охолоджуючий ефект, без урахування таких механізмів припинення горіння, як розбавлення зони горіння парою води, а також зміна теплофізичних властивостей парогазової суміші в зоні протікання хімічних реакцій.

Якщо при фіксованому співвідношенні вмісту горючої речовини й окислювача до їхньої суміші додавати негорючі компоненти, які самі не беруть участі в протіканні хімічної реакції окислення, швидкість реакції зменшується, а отже, згідно (2.1) зменшується тепловиділення $q(+)$ у зоні горіння. Це, в свою чергу, призводить до зниження температури в зоні реакції. За певного розбавлення температура стає меншою за температуру погасання, а суміш стає негорючою. Крім того, при введенні негорючих компонентів в систему додатково відбуваються втрати тепла на нагрівання цих розріджувачів від початкової температури до температури зони горіння, тому чим вище теплоємність компонентів, які вводяться, тим більшу кількість тепла вони можуть "поглинути", а, отже, тим вища їх вогнегасна дія. Так, теплоємність водяної пари при 600°C ($c_{p \text{ пар}} = 2,2 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) в 2 рази більша, ніж у азоту або вуглекислого газу. Однак потрібно враховувати, що за рахунок різкого підвищення коефіцієнта теплопередачі λ газу, які додаються, можуть збільшувати інтенсивність теплопередачі із зони горіння до свіжої горючої суміші. Це сприяє більш швидкому прогріванню підготовчої зони у фронті полум'я, а отже, швидкість поширення горіння й температура зони горіння при цьому підвищуються. Тобто чим більше коефіцієнт теплопровідності, тим швидше свіжа горюча суміш отримає достатню кількість тепла й загориться, і отже, тим нижче ефективність використання негорючого газу. У зв'язку з цим комплексним параметром, що характеризує вогнегасну ефективність газових розріджувачів, може служити відношення c_p/λ .

Нарівні з можливістю швидкого гасіння методом розбавлення, подача водяної пари в об'єм, що захищається, забезпечує попередження вибуху – флегматизацію. Так, при роботі з

горючими газами, рідинами або дисперсними матеріалами на хімічних підприємствах є ризик накопичення в закритих об'ємах горючих речовин у вибухонебезпечних концентраціях. Флегматизація ізольованого простору інертними добавками є одним із перспективних напрямів пожежної профілактики таких технологічних процесів. Водяна пара відноситься до простих теплових флегматизаторів – негорючих газових розріджувачів із високим значенням теплоємності, які забирають тепло із системи на власний нагрів.

Інтенсивність флегматизуючої дії залежить від співвідношення концентрацій горючої речовини й кисню, з одного боку, та флегматизатора, - з іншого. З розбавленням горючої суміші негорючими компонентами відбувається звуження області вибухонебезпечних концентрацій, доки нижня й верхня частини кривої концентраційної межі поширення полум'я не зійдуться в одній точці, що зветься точкою флегматизації або мисом області вибуховості. Типова діаграма займистості потрійної суміші "горюча речовина - повітря - розріджувач" (крива 1) наведена на рис. 2.9.

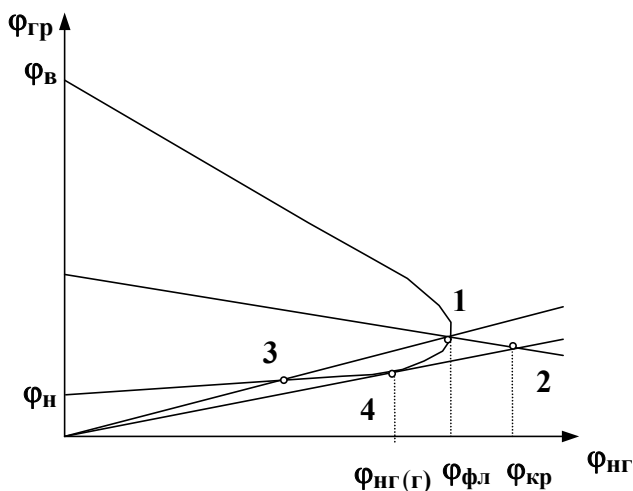


Рис.2.9 – Зміна області займистості в залежності від концентрації негорючого газу

Дослідження складів потрійних сумішей показали, що для більшості розріджувачів точкам флегматизації (екстремальній точці області займання) відповідають суміші, початковий склад яких є приблизно стехіометричним по відношенню до згоряння до CO і H_2O .

Концентрація горючої речовини в суміші, стехіометричній по відношенню до згоряння до CO і H_2O , пов'язана з концентрацією розріджувача співвідношенням:

$$\varphi_{\text{гр}}^{\text{CO}} = \frac{100 - \varphi_{\text{фл}}}{1 + 100 \frac{\beta_{\text{CO}}}{\varphi_{\text{O}_2}}}, \quad (2.58)$$

де $\varphi_{\text{гр}}^{\text{CO}}$, $\varphi_{\text{фл}}$ – відповідно концентрація горючої речовини і негорючого розріджувача в суміші, яка відповідає точці флегматизації;

β_{CO} - стехіометричний коефіцієнт кисню в реакції згоряння до CO і H_2O ;

φ_{O_2} – концентрація кисню в окислювальному середовищі.

Критичну флегматизуючу концентрацію деяких розріджувачів можна розрахувати за відомою формулою [26]:

$$\varphi_{\text{фл}}^0 = 100 \frac{h'_{\text{f}} H_{\text{f}} + h'_{\text{ф}} + \sum h'_j m_j}{h''_{\text{ф}} - 1 + \sum h''_j m_j}, \% \quad (2.59)$$

де H_f – стандартна теплота утворення горючої речовини в газоподібному стані, кДж·моль⁻¹;

h_f – коефіцієнт при теплоті утворення горючої речовини, моль·кДж⁻¹;

$h_j^/, h_j^{//}$ – коефіцієнти атомів та структурних груп;

$h_f^/, h_f^{//}$ – вільні члени;

m_j – число атомів j -го типу в горючій речовині.

Склад потрійних сумішей може бути охарактеризований співвідношеннями $\Phi_{гр}/\Phi_{нг}$ та $\Phi_{гр}/\Phi_{ок}$. Суміші, що знаходяться в закритих об'ємах, для яких концентрація негорючого газу більше $\Phi_{фл.}$, є негорючими при будь-якому співвідношенні горючої речовини та окислювача. Однак, якщо станеться розгерметизація даного об'єму, вміст окислювача в суміші збільшиться, відношення $\Phi_{гр}/\Phi_{ок}$ зменшиться: при цьому співвідношення $\Phi_{гр}/\Phi_{нг}$ залишиться попереднім. Внаслідок подібної аварії можуть утворюватися вибухонебезпечні суміші. Концентраційні межі поширення горіння таких сумішей можна знайти з перетину прямої 3, тангенс кута нахилу якої рівний $\Phi_{гр}^{CO}/\Phi_{фл.}$, з діаграмою займистості (рис. 2.9 точки 1 та 3).

На кривій флегматизації (1) є точка дотику прямої (4), яка виходить з початку координат. Суміш, що відповідає цій точці, називається *граничною за горючістю*, а $\Phi_{гр(г)}$, $\Phi_{нг(г)}$ – відповідно концентрація горючої речовини та негорючого газу-розріджувача в граничній за горючістю потрійній суміші (точка 4). Для цієї суміші характерна рівність енергії, що постачається речовиною, яка горить у даному окислювальному середовищі, й енергії, яка затрачується на нагрів негорючого компонента. Якщо система за рахунок реакції окислення горючого компонента здатна виділити енергії більше, ніж потрібно на нагрів флегматизатора до температури горіння, то в системі

можливе виникнення самостійного самонагрівання і подальше виникнення горіння.

Склад граничних за горючістю сумішей розраховується на основі енергетичного балансу реакції горіння потрійної суміші при згорянні до CO та H_2O [27]. Однією з основних закономірностей горіння на нижній межі газів і парів органічних речовин різних класів є приблизна постійність адіабатичної температури горіння $T_{\text{ад}}$. [28].

В роботі [27] показано, що в граничній за горючістю суміші концентрація горючої речовини $\Phi_{\text{гр(г)}}$ та негорючого газу-розріджувача $\Phi_{\text{нг(г)}}$ знаходяться у співвідношенні:

$$\frac{\Phi_{\text{гр(г)}}}{\Phi_{\text{нг(г)}}} = \frac{H_{\text{нг}}^{T_{\text{г}}} - H_{\text{нг}}^{T_0}}{H_{\text{f}} + \sum H_j m_j - k \left(H_{\text{пов}}^{T_{\text{г}}} - H_{\text{пов}}^{T_0} \right)}, \quad (2.60)$$

де $H_{\text{нг}}^{T_0}, H_{\text{нг}}^{T_{\text{г}}}$ – абсолютні мольні ентальпії негорючого газу відповідно при початковій температурі T_0 і при температурі горіння $T_{\text{ад}}$;

$H_{\text{нг}}^{T_0}, H_{\text{нг}}^{T_{\text{г}}}$ – абсолютні мольні ентальпії повітря відповідно при початковій температурі T_0 і при температурі горіння $T_{\text{ад}}$;

$$k \equiv 100 \frac{\beta_{\text{CO}}}{\varphi_{\text{O}_2}}$$

H_j – тепловий ефект реакції горіння j -го атома за умови згорання суміші до CO і H_2O ;

m_j – число атомів виду j в молекулі горючої речовини.

Знаючи координати точки 4, можна описати пряму (4) рівнянням:

$$\Phi_{гр} = \Phi_{нг} \frac{\Phi_{гр(г)}}{\Phi_{нг(г)}}. \quad (2.61)$$

Область під прямою (4) відповідає сумішам, які не здатні поширювати полум'я при будь-якому вмісті повітря. Отже, для того, щоб не утворювалися вибухонебезпечні суміші в технологічному процесі навіть у разі виникнення аварійного режиму розгерметизації, необхідно вміст розріджувача підвищити до $\Phi_{кр}$ (точка 2). Значення мінімально необхідного вмісту газу-розріджувача в окислювальному середовищі можна отримати, вирішуючи систему рівнянь (2.58), (2.60) та (2.61):

$$\Phi_{кр} = \frac{100}{1 + \frac{\Phi_{гр(г)}}{\Phi_{нг(г)}} (1 + k)}. \quad (2.62)$$

Підставляючи вираз (2.60) у формулу (2.62), отримуємо значення мінімальної флегматизуючої концентрації для будь-якого інертного газу або суміші негорючих газів, що використовується для флегматизації:

$$\Phi_{кр} = \frac{100(S - k)}{S - k + L(1 + k)}, \quad (2.63)$$

де
$$S \equiv \frac{H_f + \sum H_j m_j}{H_{пов}^{Tг} - H_{пов}^{To}}, \quad L \equiv \frac{H_{нг}^{Tг} - H_{нг}^{To}}{H_{пов}^{Tг} - H_{пов}^{To}}.$$

Отримана концентрація флегматизатора забезпечить вибухобезпеку потрібної суміші "горюча речовина - повітря - розріджувач" при будь-якому співвідношенні пального й окислювача (наприклад, у разі випуску зафлегматизованої горючої суміші з технологічного апарату в повітря). Порівняння розрахункових

значень, отриманих за формулою (2.63), з експериментальними даними, приведеними в [29], показує, що відносна середньоквадратична похибка розрахунку не перевищує 20%.

При визначенні загальної витрати вогнегасної речовини для флегматизації вибухонебезпечного середовища всередині технологічного обладнання або при гасінні методом розбавлення необхідно враховувати особливості водяної пари як газу-розріджувача. На відміну від негорючих газів, таких як CO_2 , N_2 , Ar , водяна пара при контакті з поверхнями, які мають температуру меншу, ніж температура насичення пари, переходить у рідкий стан, тобто починається конденсація, а отже, концентрація пари в об'ємі, що захищається, зменшується. Через конденсацію потрібна додаткова подача пари для підтримки вогнегасної концентрації в об'ємі.

Задача врахування конденсації пари при пароводяному гасінні зводиться до оцінки кількості води, що конденсується на поверхні огороження з пароповітряної суміші.

Конденсація пари відсутня, коли температура поверхонь огороження t_c перевищує $t_s(P_{\Pi})$ температуру насичення пари за заданого значення парціального тиску P_{Π} парової складової пароповітряної суміші (ця температура називається точкою роси). Так, якщо для оцінок загальний тиск газового середовища в об'ємі вважати нормальним, тобто $P_{\text{заг}} = 101,3$ кПа, то за вогнегасної концентрації 30% парціальний тиск пари становить $P_{\Pi} = 0,3 \cdot P_{\text{заг}} = 30,4$ кПа, що відповідає $t_s(P_{\Pi}) = 69^\circ\text{C}$. Таким чином у даному випадку конденсація буде спостерігатися тільки на поверхнях з температурою, меншою за 69°C .

Для оцінки внеску конденсації у загальну витрату пари часто застосовують формулу, що описує конденсацію чистої пари на вертикальній поверхні. Ця формула отримана на підставі аналізу ламінарного плину плівки конденсату по поверхні конденсації. Залежність густини потоку пари, що конденсується на стіні, від температури має вид:

$$j = A \cdot [t_k - t_c]^{3/4}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (2.64)$$

де A – розмірний множник, що слабо залежить від температури й обумовлений фізичними характеристиками конденсату;

t_k – температура на зверненій до пари поверхні плівки конденсату (у випадку чистої пари вона збігається з $t_s(P_{n0})$ – точкою роси, визначеною при тиску пари вдалині від поверхонь конденсації P_{n0});

t_c – температура стінки, на якій відбувається конденсація пари.

Оцінки витрати пари, зроблені з урахуванням формули (2.64), указують на необхідність збільшення витрати в десятки разів. Однак, співвідношення (2.64) дає завищену величину витрати пари. Це пояснюється тим, що наявність у середовищі іншого газу, в якості якого виступає повітря, змінює не тільки тиск пари, але міняє характер руху пари у приповерхній області. Конденсація пари на стінках означає її видалення із пристінної області. При незмінному загальному тиску пароповітряної суміші останнє явище приводить до надлишку повітря біля стінок. Тут формується так званий дифузійний шар: шар суміші з більш високою (ніж у глибині приміщення) концентрацією повітря. У результаті пара, щоб дійти до стіни і сконденсуватися, повинна подолати додатковий повітряний бар'єр. Відмінність полягає в наступному: у випадку конденсації чистої пари переборюється тільки тепловий опір плівки конденсату, а у випадку конденсації пари із суміші з'являється додатковий послідовний опір дифузії пари крізь збагачену повітрям пристінну область. Як показують досліди, починаючи з вмісту повітря в пароповітряній суміші у декілька відсотків, другий опір є домінуючим.

Проілюструємо дане твердження, спираючись на рівняння тепломасопереносу. Задачу будемо розглядати як одномірну. У якості незалежної просторової перемінної x візьмемо відстань від поверхні стінки уздовж зовнішньої нормалі до неї (рис. 2.10). Вісь y спрямовано паралельно вектору прискорення вільного падіння g ; відлік координати x ведеться від поверхні конденсації в середину приміщення.

У розглянутому діапазоні тисків стаціонарні концентрації пари й повітря у просторі з достатньою точністю задовольняють рівнянню стану ідеального газу:

У такій ситуації, нехтуючи малими ефектами типу термодифузії, систему рівнянь тепломасопереносу у пароповітряній суміші можна представити у виді:

$$\mathbf{j}_n = -D \frac{d\varphi_n}{dx} + w(x) \varphi_n = \text{const}, \quad (2.67)$$

$$\mathbf{j}_{\text{пов}} = -D \frac{d\varphi_{\text{пов}}}{dx} + w(x) \varphi_{\text{пов}} = 0, \quad (2.68)$$

$$\mathbf{q} = -\lambda \frac{dt}{dx} + \mathbf{j}_n H_n(t) = \text{const}. \quad (2.69)$$

де $\mathbf{j}_n$ – густина потоку сухої пари по нормалі до площини конденсації, моль·м⁻²·с⁻¹;

$\mathbf{j}_{\text{пов}}$ – густина потоку повітря по нормалі до площини конденсації, моль·м⁻²·с⁻¹;

$\mathbf{q}$ – густина теплового потоку через пароповітряну суміш, Вт·м⁻²;

$D(x)$ – коефіцієнт дифузії, м²·с⁻¹;

$w(x)$ – загальна швидкість руху потоку суміші, м·с⁻¹;

λ – коефіцієнт теплопровідності суміші, Вт·м⁻¹·К⁻¹;

$H_n(t)$ – питома ентальпія пари, Дж·моль⁻¹.

При написанні граничних умов до рівнянь (2.67), (2.68), які описують пароповітряну суміш, вважається, що біля поверхні конденсату формується дифузійний шар товщиною δ_D (рис. 2.10), за межами якого склад суміші приймає свої об'ємні значення. У всьому газовому об'ємі зберігається потік речовини й тепла. Це одночасно є граничною умовою на границі дифузійного шару з однорідною сумішшю.

Граничною умовою для пароповітряної суміші з боку плівки конденсату є збереження потоку води (тобто $\mathbf{j}_n$) і густини потоку тепла ($\mathbf{q}$). Для написання цих умов необхідно вміти

описувати потоки речовини й тепла у конденсаті, тобто треба вирішити двомірну задачу про стікання конденсату уздовж поверхні огороження. В якості граничної умови до системи рівнянь (2.67) – (2.69) є рівність $\mathbf{j} = \mathbf{j}_n$, у якій величина $\mathbf{j}$ визначається за допомогою співвідношення (2.64) з невизначеною температурою t_k . При цьому умова безперервності теплового потоку також виконується. Останньою граничною умовою є задання значення парціального тиску пари на поверхні плівки конденсату: $P_n = P_s(t_k)$, де $P_s(t)$ являє собою відому залежність тиску насиченої пари від температури t .

Вирішення системи рівнянь (2.65)–(2.68) дає густину потоку пари:

$$j_n = j_D \ln \left(\frac{P - P_{n0}}{P - P_s(t_k)} \right), \quad (2.70)$$

де P_{n0} - парціальний тиск пари за межами дифузійного шару;

j_D – величина, що обчислюється за формулою:

$$j_D = \frac{P}{R} \left(\frac{D}{T} \right)_{\text{сер}} \frac{1}{\delta_D}, \quad (2.71)$$

де $(D/T)_{\text{сер}}$ - середнє по дифузійному шару значення відношення D/T .

Спільний (з урахуванням рівності $\mathbf{j} = \mathbf{j}_n$) розгляд рівнянь (2.64) і (2.70) дозволяє визначитися з температурою поверхні плівки $t_{пл}$. Через те, що конденсація чистої пари проходить значно інтенсивніше конденсації пари із пароповітряної суміші, для розрахунку потоку пари можна використовувати формулу (2.70), беручи в ній в якості температури зовнішньої поверхні конденсату t_k температуру огороження t_c .

У результаті в (2.70) залишається один невизначений параметр (див. (2.71)) – товщина дифузійного шару δ_D , яка тісно пов'язана з характером обтікання відносно холодних поверхонь пароповітряною сумішшю. Величина δ_D залежить як від геометрії цих поверхонь, так і від виду конвекції. Для визначення δ_D необхідно або, використовуючи апарат теорії подібності, залучати експериментальні дані, або вирішувати двомірні нелінійні задачі тепломасопереносу в бінарній суміші "пара-повітря". При флегматизації та гасінні пожежі методом розбавлення водяною парою більш природно розглядати вільну конвекцію. Визначення густини потоку пари $j_{\text{п}}$ у цьому випадку розглянуто у додатку С.

Підсумкова формула розрахунку середньої густини потоку пари на вертикальній ділянці висотою L буде мати вид:

$$j_{\text{сер}} = -0,71 \cdot 10^{-2} \frac{\Delta r}{L^{0,25} T_0^{0,1}} \left(\Delta r + 2,1 \frac{T_0 - T_c}{T_0} \right)^{0,25}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \text{ с}^{-1}, \quad (2.72)$$

де T_0 – температура пароповітряної суміші в глибині об'єму;

T_c – температура поверхні стінки;

Δr - зміна об'ємної частки пари при русі суміші з глибини до поверхні конденсату.

У даному випадку Δr оцінюється співвідношенням:

$$\Delta r = r_{10} - \frac{P_s(t_c)}{P_{\text{заг}}},$$

де r_{10} - об'ємна частка пари в глибині приміщення;

$P_{\text{заг}}$ - загальний тиск газу у приміщенні.

Якщо як оцінну температуру суміші взяти $T_0 = 373 \text{ К}$, то формула (2.72) спроститься до

$$j_{\text{сер}} = -3,9 \cdot 10^{-3} \frac{\Delta r}{L^{0,25}} \left(\Delta r + 5,5 \cdot 10^{-3} (100 - t_c) \right)^{0,25}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \quad (2.73)$$

Оцінимо густину потоку. Нехай температура стінки $t_c = 40^\circ\text{C}$, а вогнегасна концентрація водяної пари складає $r_{1,0} = 0,3$, тобто:

$$\Delta r = r_{10} - \frac{P_s(40)}{P_0} = 0,30 - \frac{7,4}{101,3} \approx 0,23.$$

У такій ситуації формула (2.73) при $L = 1$ м дає:

$$j_{\text{сер}} = -3,9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,23 \cdot (0,3 + 5,5 \cdot 10^{-3} \cdot 60)^{0,25} = -0,78 \cdot 10^{-3}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Таке значення густини потоку пари на порядок менше за величину, що виходить на основі формули (2.64), тобто без врахування дифузії пари крізь пристінний повітряний шар. Незважаючи на це, конденсацію все-ж таки необхідно враховувати, тому що внесок у загальну витрату пари, обумовлений конденсацією, як правило, перевищує складову витрат пари, спрямовану на створення вогнегасної концентрації пари в об'ємі.

Таким чином, очевидно, що для визначення нормативних параметрів пожежогасіння необхідно орієнтуватися не на одиначні досліди з гасіння, а на встановлення зазначених залежностей – питомої витрати й часу гасіння від інтенсивності подачі вогнегасного засобу. Використання вогнегасних складів при оптимальних режимах їхньої подачі й оптимальному співвідношенні складових компонентів забезпечує істотне зниження питомої витрати засобів гасіння і, отже, підвищення їх вогнегасної ефективності.

Контрольні питання

1. Графічне та математичне відображення критичних умов припинення горіння. Температура погасання.
2. Основні методи та способи припинення горіння.
3. Пояснити механізм припинення горіння при охолодженні водою зони горіння.
4. Пояснити закономірності зміни температури та розмірів краплі при її русленні через зону горіння.
5. Як впливає розмір краплі на коефіцієнт використання води під час гасіння полум'я.
6. Розкрити механізм припинення горіння при охолодженні водою поверхневого шару горючої рідини.
7. Розкрити фактори, що впливають на коефіцієнт використання води при охолодженні поверхневого прогрітого шару рідини.
8. Розкрити механізм та умови припинення горіння водою твердих горючих матеріалів.
9. Особливості застосування водяної пари в якості флегматизатора.
10. При яких температурах огороження існує конденсація пари на ній?
11. Який фізичний механізм визначає швидкість процесу конденсації водяної пари із пароповітряної суміші?

ГЛАВА 3. ПІДВИЩЕННЯ ВОГНЕГАСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОДИ

При гасінні водою, в більшості випадків, не реалізуються її унікальні фізичні властивості внаслідок ряду причин. Широке використання води для цілей пожежогасіння і при цьому досить низький коефіцієнт її використання – усе це давно спонукало фахівців шукати способи підвищення вогнегасної ефективності води.

Найбільший ефект гасіння при подачі води спостерігається в тому випадку, коли її охолоджуючий ефект буде максимальним, тобто коли вся подана на гасіння пожежі вода випарується за рахунок відведення тепла від факела полум'я. Тому при такому механізмі припинення горіння потрібно прагнути, щоб максимально можлива кількість води випаровувалася в об'ємі факела полум'я, а не за його межами. Недосконалість техніки подачі й розпилення води багато в чому знижує її ефективність.

При гасінні ж водою шляхом подачі її на поверхню горючих рідин або твердих горючих матеріалів максимальний охолоджуючий ефект буде спостерігатися при повному випаровуванні всієї поданої на гасіння води за рахунок відібрання тепла від прогрітого поверхневого шару конденсованого горючого матеріалу.

Вогнегасна ефективність води залежить від ряду чинників, основними з яких є розмір крапель води й вплив хімічних добавок. Тому можна виділити два основних методи підвищення вогнегасної ефективності: 1) фізичний – зміна дисперсності й температури води, що подається на гасіння, і 2) хімічний – використання для цілей пожежогасіння водних розчинів різних хімічних сполук.

Розглянемо ці методи більш докладно.

Розділ 1. Рідинні розпилені струмені

При оцінці вогнегасної ефективності води велике значення має спосіб подачі її в осередок пожежі - суцільним або розпиленим струменем.

Суцільні струмені являють собою нерозривний потік води, що має велику швидкість і порівняно невеликий перетин. Ці струмені характеризуються певною ударною силою і великою дальністю польоту; при цьому значні об'єми води впливають на малу площу. Компактний струмінь, пройшовши крізь зону горіння, не чинить на неї майже ніякого впливу і сам не відчуває значного впливу полум'я, оскільки має невелику площу поверхні контакту з полум'ям і малий час взаємодії.

Суцільними струменями гасять великі пожежі, коли потрібно подати воду на велику відстань або надати їй значної ударної сили. Наприклад, суцільні струмені використовують під час гасіння пожеж великої площі, коли через значний тепловий вплив осередку горіння до нього неможливо близько доставити пристрій для подачі води, а також при необхідності з великої відстані охолоджувати сусідні з палаючим об'єктом будівельні конструкції, резервуари тощо. Ударну силу потужних компактних струменів води використовують під час гасіння великих розвинених пожеж штабелів деревини, при цьому, завдяки сильному натиску, вода попадає всередину штабеля, де також відбувається горіння матеріалу. Під час гасіння газових фонтанів суцільні струмені "підіймають" нижню кромку факела полум'я. Цей спосіб гасіння й охолодження є найбільш простим і поширеним. Одним із недоліків такого традиційного способу водного пожежогасіння є нерівномірне зрошування зони пожежі, при цьому далеко не вся вода, тим більше ті порції, які стікають нижче за рівень зони пожежі, впливає на процес горіння. Так, із загальної кількості води, яка подається у вигляді компактних струменів, на гасіння використовується усього від 6 до 10% її об'єму, а в окремих випадках – не більше 1%.

У останні роки, завдяки подальшому розвитку промисловості й науки, з'явилася реальна можливість підвищити вогнегасну ефективність води шляхом її перетворення з поверхневого в об'ємно-поверхневий засіб гасіння пожеж. При цьому вода в зону пожежі подається у виді розпиленого струменя, тобто одночасно впливає на факел полум'я й горючу речовину, причому практично однаково ефективно як на горизонтальну, так і на вертикальну її поверхні.

Розпилені струмені – це потік води, який складається з дрібних крапель. Розпиленість струменів поділяють на тонку дисперсність (розмір крапель становить $(10 \div 100) \cdot 10^{-6}$ м), середню дисперсність $((100 \div 1000) \cdot 10^{-6}$ м) і грубу дисперсність $((1000 \div 6000) \cdot 10^{-6}$ м).

Розпилені струмені характеризуються незначною ударною силою та дальністю дії, але зрошують велику поверхню. При подачі води розпиленими струменями створюються найбільш сприятливі умови для її випаровування, при цьому відбувається підвищення охолоджувального ефекту та розбавлення горючого середовища негорючою парою. Відомо, що при однаковій інтенсивності подачі води на охолодження металевих конструкцій сумарний коефіцієнт тепловіддачі в разі застосування розпилених струменів у два - три рази більший, ніж при охолодженні компактним струменем [30].

Підвищення охолоджувального ефекту води обумовлено зростанням тепловідводу за рахунок збільшення, в порівнянні з компактним струменем, сумарної поверхні краплин, по якій відбувається тепловіддача.

Крім того, тонко розпилені струмені з краплями води діаметром приблизно $50 \cdot 10^{-6}$ м мають здатність рівномірно змочувати поверхні будь-якої складної конфігурації, проникати в об'єми й порожнини, недоступні для звичайних струменів, ефективно охолоджувати реакційну зону факела полум'я й продукти горіння. Завдяки розвиненій поверхні, потік таких крапель добре поглинає (абсорбує) частки диму. Таким чином, краплини заповнюють весь об'єм приміщення, що горить,

і захоплюються газовими потоками, перешкоджаючи поширенню пожежі у напрямках цих потоків.

Перші відомості про успішне гасіння розпиленою водою нафти в ямах відносяться до початку 20 сторіччя. В 30-ті роки пожежною охороною Азнафти та Грозненським загonom пожежної охорони проводилися дослідження з гасіння розпиленою водою нафти та нафтопродуктів у резервуарах. Ці досліді показали, що палаючу нафту в резервуарі діаметром 4 м можна гасити водою, що подається розпилювачами системи Лопаткіна й Іванова.

У 40-их роках в ЦНДІПО проводилися дослідження з гасіння полум'я бензину, гасу, мазуту та нафти в резервуарах із різною площею. Вода розпилювалась розпилювачами системи Снегирьова, Петрова, Безуглова. В результаті дослідів гасіння полум'я бензину не було досягнуто; полум'я гасу і мазуту гасилося за 30 - 40 с.

У 1954 році Г.Н. Худяковим і І. Росбахом-Роговським уперше робляться спроби встановити механізм вогнегасної дії розпиленої води. У результаті цих досліджень було встановлено, що механізм вогнегасної дії води полягає в різкому охолодженні зони горіння внаслідок миттєвого випаровування великого числа дрібних крапель. Крім того, пара води, що утворилася, розбавляє компоненти пароповітряної суміші. Усе це в поєднанні сприяє гасінню полум'я.

Розглядаючи в загальному виді механізм гасіння полум'я розпиленою водою, можна виділити три характерні процеси. Це подрібнення струменя або плівки води на краплини, осадження краплин у зоні горіння під дією різних сил (інерційних, гравітаційних) і тепло-масообмін між краплями і полум'ям. Кожний з цих процесів має відносно самостійний характер і є предметом вивчення у великій кількості дослідницьких та наукових робіт. Але, незважаючи на це, на сьогодні не розроблена єдина теорія, яка б достовірно описувала названі процеси, як самостійно, так і в загальному виді, що викликано складним характером взаємодії різних факторів у просторі та часі. Все це

певною мірою стримує розвиток засобів пожежогасіння, пов'язаних із розпиленою водою.

1.1 Уявлення про механізм розпаду плівок і струменів

Існує кілька точок зору на причини, що викликають розпад рідини при розпилюванні: капілярні сили, турбулентні пульсації, кавітація, зовнішні й інерційні сили. Із усіх сил, які існують у двофазних системах, тільки сили поверхневого натягу прагнуть надати краплині сферичної форми, а інші сили прагнуть її деформувати. На процес розпилення впливають також фізичні властивості самої рідини й оточуючого середовища.

Очевидно, що однією з цих причин не можна пояснити процес подрібнення при всіх можливих і різноманітних умовах; на певних стадіях подрібнення вирішальною може стати будь-яка з них. Проте головною й вирішальною причиною руйнування струменя (плівки) є розвиток у ньому коливальних процесів, які виникають через дію зовнішніх і внутрішніх факторів.

До зовнішніх відносяться інерційні аеродинамічні сили, які прагнуть деформувати й розірвати струмінь (плівку). Значення зовнішніх сил стає вельми істотним при високих швидкостях витікання рідин із форсунок. До внутрішніх сил можна віднести збурення, зумовлені якістю виготовлення розпилювача, його вібраціями, конструктивними особливостями тощо.

Механізм подрібнення рідини, яка покинула розпилювач, залежить, головним чином, від форми витікаючого струменя й співвідношення швидкості струменя й оточуючого газу, які, у свою чергу, визначаються способом розпилювання, класом і конструкцією розпилювача. При гідравлічному розпилюванні швидкість оточуючого газу в більшості випадків значно менша швидкості витікання, а рідина витікає з розпилювача у вигляді циліндричного струменя, плоскої, колової, або конічної плівки.

Руйнування циліндричного струменя на краплини виникає внаслідок розвитку в ньому поперечних пружних коливань. В основі розвитку теорії розпаду струменів лежить класична постановка задачі, запропонована Релеєм, в якій

передбачається, що розпад струменя на краплини зумовлений нестійкістю нескінченного "стовпа" рідини кругового перетину під дією сил поверхневого натягнення.

Під впливом збурюючих чинників частки рідини, прилеглі до поверхні струменя, зміщуються, поверхня деформується й відхиляється від рівноважної форми. Збільшення вільної енергії поверхні, пов'язане з деформацією струменя, веде до вияву дії молекулярних сил, що прагнуть скоротити загальну поверхню струменя і надати їй форму, відповідну рівновазі. Частки рідини, виведені з рівноважного положення, прагнуть знову повернутися до нього. Проходячи за інерцією через положення рівноваги, частки рідини знову відчують дію відновних сил. Внаслідок таких збурень на поверхні струменя виникають коливання, які через існування множини збурень можуть накладатися одне на одне. При цьому вони можуть затухати або зростати в залежності від фізичних параметрів струменя і навколишнього середовища, а також від умов витікання. Із зростанням амплітуди коливань стійкість струменя порушується, і він розпадається на окремі частки, що і приводить до розпаду струменя на краплини. Розпад струменя за теорією Релея відбувається в момент, коли довжина хвилі коливання перевищує довжину кола перетину незбуреного струменя.

На процес розпаду струменя впливають фізичні властивості самої рідини і газового середовища, із яких найбільш істотне значення мають в'язкість μ і поверхневе натягнення σ рідини, а також співвідношення густини рідини $\rho_{\text{рід}}$ і навколишнього газу $\rho_{\text{г}}$. Відзначено, що із збільшенням в'язкості характер розпаду струменя змінюється – зникають повздовжні хвилі, що стабілізує структуру струменя. З режимних параметрів на процес розпаду струменя домінуючий вплив виявляє швидкість рушення струменя рідини в газовому потоку.

Підхід Релея був поширений Вебером на випадок в'язкої рідини. У загальному випадку при поширенні в повітрі рідинного струменя в його структурі можна виділити наступні характерні частини: компактна, роздібнена і розпилена.

Вебер визначив залежність довжини суцільної частини струменя від умов витікання і фізичних властивостей рідини. Експериментально встановлено, що при швидкості витікання струменя в атмосферу до $30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ довжина компактної частини **L** збільшується з підвищенням швидкості витікання, а при зменшенні – скорочується.

Поступове збільшення швидкості витікання з насадки спочатку призводить до осесиметричного, а потім до хвилеподібного розпаду струменя, в основі яких лежать різні механізми розпаду струменя на окремі краплини. Довжина суцільної ділянки струменя при осесиметричному розпаді може бути визначена з виразу:

$$L=22,4d_c \left[(v-v_o) \sqrt{\frac{\rho_{\text{рід}} d_c}{g \sigma}} \right]^{0,8} \left[1 + \frac{1}{250} \cdot \frac{\sqrt{\rho_{\text{рід}} \sigma \mu_{\text{рід}}}}{\mu_{\text{рід}}} \right], \quad (3.1)$$

де **v₀** – початкова швидкість витікання рідини в атмосферу;

d_c – діаметр форсунки;

σ – коефіцієнт поверхневого натягнення;

μ_{рід} – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини;

g – прискорення вільного падіння.

Розпад самих крапель (тобто безпосередньо розпилення) також залежить від швидкості витікання. При малій швидкості краплини не дробляться й захоплюються повітрям. Із збільшенням швидкості краплини втрачають стійкість і розпадаються на більш дрібні. При дуже великих швидкостях краплина під впливом перепаду тиску на її поверхні утворює тіло, схоже на еліпсоїд, який швидко сплющується в центрі й перетворюється на рідке кільце з тонкою оболонкою. Діаметр кільця все збільшується, після чого останнє руйнується з утворенням безлічі найдрібніших крапель.

У більшості випадків процес подрібнення крапель і струменів рідини прийнято розглядати з позиції впливу аеродинамічних сил, що деформують краплини. З теорії розпилення рідини відомо, що подрібнення струменя і великих крапель починається з моменту, коли сила опору стає рівною силі поверхневого натягнення.

Краплина рідини, що летить окремо, знаходиться під дією сили тяжіння, сил опору повітря і капілярних сил, які, внаслідок кривизни краплини, створюють в середині неї деякий надлишковий тиск. Цей тиск визначається за формулою Лапласа:

$$P = \frac{4\sigma}{d_k},$$

де d_k - діаметр краплини.

Сила капілярного натягнення визначається за формулою:

$$F_{\text{нат}} = \frac{4\sigma}{d_k} \cdot \frac{\pi d_k^2}{4} = \pi \sigma d_k. \quad (3.2)$$

При падінні краплі під дією сили тяжіння в різних точках її поверхні створюється різний тиск. Більший тиск утворюється на лобових ділянках краплини. Лобовий опір визначається сумою опору тертя й опору тиску. Перша складова обумовлена тертям на границі між краплею й середовищем і діє в межах прикордонного шару, друга – наявністю відривних течій і різницею тиску в лобовій і кормовій частинах краплини. Повний опір можна визначити за формулою (2.13).

Внаслідок різниці тисків усередині краплі виникає рух рідини, крапля змінює форму і руйнується, перетворюючись на велику кількість дрібних краплин. Руйнування відбувається до тих пір, поки не встановиться рівновага між капілярними силами

і динамічною дією повітря на поверхню краплі. Тоді, з урахуванням (2.13) і (3.2), можна записати умову рівноваги як:

$$\sigma \pi d_o = \frac{\pi d_k^2 \rho_{\Gamma} W^2}{8} C_x, \quad (3.3)$$

де d_o – початковий діаметр великих крапель;

d_k - діаметр розпилених крапель;

ρ_{Γ} - густина газового середовища (повітря);

C_x - коефіцієнт лобового опору;

W - швидкість незбуреного газового потоку.

З виразу (3.3) можна визначити діаметр розпиленої краплі як:

$$d_k = \sqrt{\frac{8 \cdot \sigma d_o}{\rho_{\Gamma} W^2 C_x}}, \quad (3.4)$$

звідки видно, що із зростанням відносної швидкості газового потоку W (або швидкості поширення струменя рідини або великих крапель) діаметр розпиленої краплі зменшується.

Указаний підхід є вельми спрощеним, оскільки подрібнення великих крапель є багатопараметричним процесом, протікання якого залежить від безлічі різних факторів.

Співвідношення між тиском, який створюється швидкісним напором, і тиском, що створюється поверхневим натягом, дає безрозмірний критерій Вебера We :

$$We = \frac{\rho_{\text{рід}} W^2 d_k}{2 \sigma}. \quad (3.5)$$

Розглядаючи аеродинамічну дію газу на краплини і враховуючи критерій Вебера за визначальний в цьому процесі, багато авторів пропонують установити критичне значення цього параметра, який відповідає виду рідини, що розпилюється. Руйнування крапель і струменів рідини відбувається за умови, що число Вебера перевищує деяке критичне значення:

$$We > We_{кр}.$$

Наприклад, М.С. Волинський [31] наводить такі дані. Коли число Вебера менше десяти, крапля залишається цілою; якщо число Вебера дорівнює десяти, то виникає роздвоєння; при числі **We** трохи більшому за десять – крапля розпадається на кілька великих, приблизно рівних частин. Якщо число **We** досягає 14, відбувається перехід до режиму розпилювання: краплини, які виникли в результаті розпаду, мають розміри, на порядок менші, ніж у вихідної краплини. При зростанні числа Вебера більше 14 (закритична область) краплинні осколки все більше подрібнюються.

Для обтікання сфери отримано критеріальну залежність числа **We_{кр}** від параметра **A**, названого *критерієм стійкості краплини*:

$$We_{кр} = \frac{1}{2} \cdot Re_{кр}^2 \cdot \left(\frac{\mu_{г}}{\mu_{рід}} \right)^2 \cdot \frac{\rho_{рід}}{\rho_{г}} \cdot A, \quad (3.6)$$

де $A = \frac{\mu_{рід}^2}{\sigma \cdot \rho_{рід} \cdot d_{к}}$ – критерій стійкості краплини;

$\mu_{г}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості газового середовища;

$\mu_{рід}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини.

Однак потрібно зазначити, що число Вебера не єдиний критерій, який визначає поведінку краплини в газовому потоку. В залежності від умов проведення експериментів, його критичне значення може змінюватися в досить широкому діапазоні $We_{кр} = 3 \div 25$. У загальному випадку $We_{кр}$ залежить від в'язкості рідини, діаметра краплини, а також від часу впливу газового потоку на краплину.

На жаль, характер і можливі різновиди руйнування крапель і струменів рідини в газовому потоку і спектр часток, що виникають внаслідок руйнування, теоретично поки ще досліджені недостатньо. У зв'язку з цим єдино надійним джерелом інформації про поведінку краплини є експеримент.

Оскільки точне визначення розмірів крапель, що утворюються при розпиленні водяних струменів, ускладнено, представляє інтерес оцінка мінімального й максимального діаметрів крапель, які утворюються. Мінімальний d_{min} , максимальний d_{max} і середній $d_{сер}$ діаметри крапель можуть бути визначені наступним чином:

$$d_{min} = d_0 \left(\frac{B}{We} \right)^{\frac{1}{3}},$$

$$d_{max} = d_0 \left(\frac{B}{3} \right)^{\frac{1}{3}},$$

$$d_{сер} = d_0 \cdot 0,9 \cdot B^{\frac{1}{3}} \cdot \lg \frac{We}{3},$$

де: d_0 - діаметр первинних крапель при розпаді струменя;

$B = 0,38$ – експериментальний коефіцієнт.

В залежності від середнього діаметра крапель води $d_{сер}$ ефективність гасіння буде різною, тому необхідно розглянути питання впливу розміру крапель на вогнегасну ефективність води.

1.2 Вплив розміру крапель на вогнегасну ефективність води

Відомо, що при подачі води розпиленими струменями за рахунок зменшення діаметра краплини скорочується час випаровування, збільшується коефіцієнт теплопередачі і тим самим підвищується охолоджуючий ефект. Крім того, за рахунок утворення досить великої кількості пари відбувається додаткове розбавлення горючого середовища в полум'ї. Так, в [32] зазначається, що, зменшивши діаметр крапель у розпиленому струмені, можна істотно зменшити витрату води на гасіння пожежі (рис. 3.1).

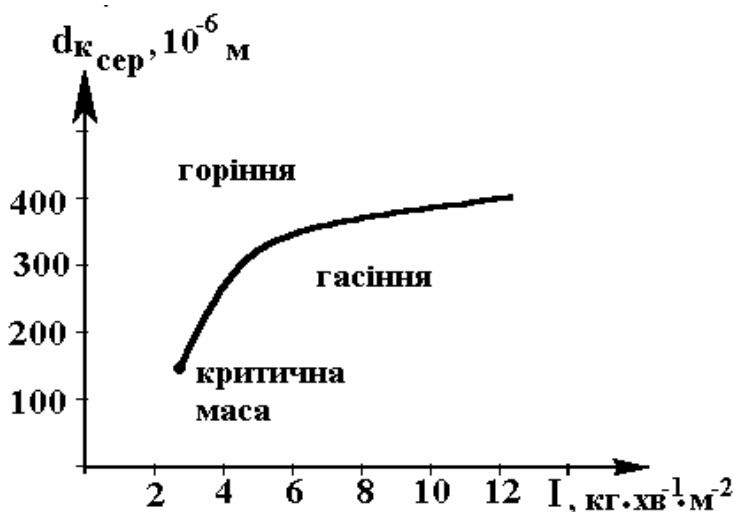


Рис. 3.1 – Вплив діаметра крапель на необхідну густину зрошування

Розглянемо більш детально природу цього явища.

Тепло, що відводиться із зони реакції горіння, внаслідок конвекційної дифузії підводиться до прикордонного шару краплі, а звідти переноситься всередину краплі. Кількість тепла, що відбирається тілом від газового середовища, описується рівнянням:

$$Q = \tau S \alpha (T_r - T_n), \quad (3.7)$$

де τ – час контакту тіла з газовим середовищем;
 S – площа поверхні контакту тіла з газовим середовищем;
 T_r – температура газового середовища;
 α – коефіцієнт тепловіддачі;
 T_n – початкова температура тіла.

Збільшення площі поверхні контакту розпиленої рідини з високотемпературним газом (факелом полум'я), згідно (3.7), за інших рівних умов призводить до збільшення кількості тепла, що відводиться в одиницю часу.

При однаковій масовій витраті рідини із зменшенням діаметра крапель збільшується їх питома поверхня, а, отже, збільшується поверхня контакту розпиленої рідини з розжареним газом в осередку пожежі:

$$S_{\Sigma \text{твід}} = S_k n_k = \pi d_k^2 \frac{m_{\text{рід}}}{M_k} = \pi d_k^2 \frac{m_{\text{рід}}}{\frac{1}{6} \pi d_k^3 \rho_k} = \frac{6m_{\text{рід}}}{d_k \rho_k}, \quad (3.8)$$

де $S_{\Sigma \text{твід}}$ – сумарна площа поверхонь крапель у розпиленому струмені, що бере участь в процесі теплообміну;

S_k – середня площа поверхні однієї краплі;

n_k – число крапель у розпиленому струмені, що бере участь у процесі теплообміну;

$m_{\text{рід}}$ – маса рідини, поданої у вигляді розпиленого струменя;

M_k – середня маса однієї краплі.

Згідно (2.23), найбільш тривалим процесом, що відбувається з краплиною у факелі полум'я, є процес випаровування. Оскільки випаровування є ендотермічним процесом, отже

інтенсивність відведення тепла від факела полум'я залежить від швидкості випаровування краплини. Середню інтенсивність відведення тепла одиничною масою води можна визначити зі співвідношення:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{H_{\text{вип}}}{\tau_{\text{вип}}},$$

де $H_{\text{вип}}$ – кількість тепла, яку поглинає 1 кг води під час випаровування.

Час випаровування, за який крапля води відбере від зони горіння максимально можливу для неї кількість тепла, залежить від температури і швидкості газового потоку (див. (2.22 б)), але найбільш суттєвий вплив чинить початковий діаметр краплі. Так, збільшення діаметра краплі на порядок призводить до збільшення часу випаровування на два порядки. В [33] відзначається, що при температурі 100°C краплі води діаметром $20 \cdot 10^{-6}$ м; $40 \cdot 10^{-6}$ м; $120 \cdot 10^{-6}$ м випаровуються за 0,05 с; 0,27 с; 1,6 с відповідно. Отже швидкість відведення тепла від зони горіння також буде залежати від розміру крапель води.

Враховуючи, що $\tau_{\text{вип}} = \frac{H_{\text{вип}} \rho_{\text{к}}}{2\lambda_{\text{Г}} (T_{\text{Г}} - T_0)} r_{\text{к}}^2$ і різницю

$(T_{\text{Г}} - T_0)$ можна замінити на $T_{\text{Г}}$, отримуємо наступну залежність:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \frac{\lambda_{\text{Г}} T_{\text{Г}}}{2\rho_{\text{к}}} \frac{1}{d_{\text{к}}^2}. \quad (3.9)$$

Збільшення температури й швидкості рушення газового потоку призведе до збільшення інтенсивності відведення тепла. Розрахунки показують, що при розпиленні 1 г води на краплини діаметром 10^{-3} м у середовищі з температурою 1000K і $\lambda_{\text{Г}} = 9,2 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (швидкість газового потоку не перевищує

$1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$), середня інтенсивність відведення тепла буде рівна $0,5 \text{ кДж} \cdot \text{с}^{-1}$. При розпиленні води на краплини діаметром 10^{-4} м $\frac{dQ}{d\tau} = 50 \text{ кДж} \cdot \text{с}^{-1}$, а розпил на краплини 10^{-5} м забезпечує інтенсивність відведення тепла порядку $5000 \text{ кДж} \cdot \text{с}^{-1}$. Цю залежність можна відобразити графічно (рис. 3.2).

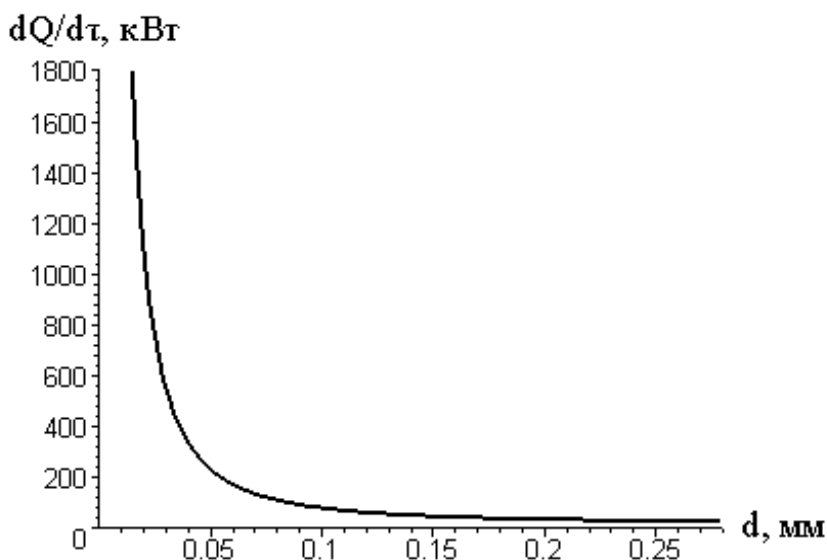


Рис. 3.2 – Залежність кількості тепла, що відводиться при випаровуванні, від діаметра крапель

Кількість тепла, що відбирається водяним струменем від зони горіння, залежить також від часу взаємодії вогнегасної речовини з полум'ям. У компактного струменя теплова й аеродинамічна взаємодія з факелом полум'я дуже мала; більша – у розпиленого струменя, ще більша – у тонкорозпиленої води.

Час взаємодії крапель рідини з газовим середовищем зони горіння τ буде залежати від швидкості і траєкторії рушення краплини в об'ємі полум'я. Проникаюча здатність розпилених

струменів визначається їх натиском, кутом нахилу пожежного ствола до горизонту Φ_0 , підйомною силою повітря і газоподібних продуктів згоряння, розміром крапель d_k . Підйомна сила полум'я зумовлена тепловою конвекцією і пропорційна висоті полум'я. Натиск струменя визначається швидкістю рушення крапель W_k і потоку повітря, що захоплюється ними; він оцінюється за реакцією насадки, із якої викидається струмінь.

Траєкторія рушення краплини рідини в газовому середовищі визначається дією сили тяжіння, сили гідродинамічного опору, реактивної сили, зумовленої відтоком нагрітих газів [34]. Рівняння рушення краплини в цьому випадку має вид:

$$\frac{d\vec{W}_k}{d\tau} = \vec{g} + \frac{\vec{P}}{M_k} - (\vec{W}_k - \vec{V}) \frac{d \ln M_k}{d\tau}, \quad (3.10)$$

де $\vec{W}_k$ – вектор швидкості краплини в Декартовій системі координат;

$\vec{g}$ – вектор прискорення вільного падіння;

$\vec{P}$ – сила опору повітря;

$\vec{V}$ – вектор швидкості, із якою витікає газовий потік від зони горіння.

Під впливом теплового потоку діаметр краплини меншає за рахунок випаровування, а температура збільшується. Тоді рівняння балансу маси й енергії записуються таким чином:

$$\frac{dd_k}{d\tau} = - \frac{2j_n}{\rho_{pid}}, \quad (3.11)$$

$$\frac{dT_k}{d\tau} = - \frac{6(q - c_{pid} T_k j_n)}{\rho_{pid} c_{pid} d_k}, \quad (3.12)$$

де $\dot{j}_n$ – густина масового потоку пари;

q – густина теплового потоку.

При вирішенні системи рівнянь (3.10) – (3.12) і траєкторних рівнянь

$$\frac{dx}{d\tau} = W_{kx}, \quad \frac{dy}{d\tau} = W_{ky}, \quad \frac{dz}{d\tau} = W_{kz},$$

можна отримати час випаровування краплини води, відстань, яку проходить крапля до повного випаровування або до осідання на поверхні палаючого матеріалу, а також зміну діаметра і швидкості краплини.

Проведені розрахунки показали, що краплини з діаметром від $200 \cdot 10^{-6}$ м до $800 \cdot 10^{-6}$ м, подані в полум'я з середньою температурою 1100K під кутом 15° до горизонту з висоти 1,5 м із швидкістю $25 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, випаровуються цілком за час рушення у факелі полум'я, проходячи при цьому відстань від 0,6 до 5 м. Краплі з діаметром більше за 10^{-3} м не встигають повністю випаруватися й пролітають зону горіння "наскрізь".

В залежності від швидкості польоту, середнього діаметра крапель і кута подачі розпиленого струменя, змінюється також дальність подачі струменя вогнегасного засобу. Згідно з роботою [35], дальність подачі можна виразити наступним рівнянням:

$$L_{\text{под}} = \sqrt{\left(\frac{\rho_k}{A\sigma_k}\right)^2 d_k^4 \cdot W_k^4 + \left(\frac{2}{g} \frac{\rho_k}{A\sigma_k}\right) W_k^4 \cdot d_k^2 \cdot \sin 2\varphi - \left(\frac{\rho_k}{A\sigma_k}\right) d_k^2 \cdot W_k^2}.$$

Залежність дальності подачі розпиленого струменя $L_{\text{под}}$ від діаметра крапель d_k і початкової швидкості крапель W_k представлена на рис. 3.2.

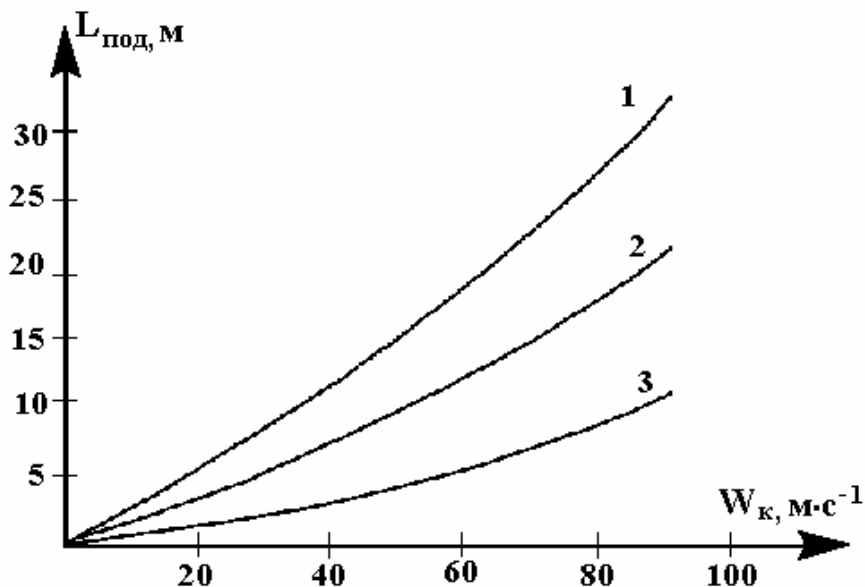


Рис. 3.3 – Залежність дальності подачі розпиленого струменя від початкової швидкості крапель:

1 – $d_k = 150 \cdot 10^{-6}$ м; 2 – $d_k = 100 \cdot 10^{-6}$ м; 3 – $d_k = 50 \cdot 10^{-6}$ м.

Таким чином, проникаюча здатність струменя убуває із зменшенням натиску струменя й розміру крапель. Для підвищення дальності подачі необхідно збільшувати початкову швидкість крапель, крім того, для ефективного гасіння необхідно отримувати краплини у вузькому діапазоні значень. У залежності від натиску струменя змінюється й оптимальний розмір крапель; так, при натиску 2,6 кПа оптимальний d_k дорівнює $300 \cdot 10^{-6}$ м. При діаметрі крапель вище за $800 \cdot 10^{-6}$ м проникаюча здатність струменя мало залежить від його натиску.

Із зменшенням діаметра крапель коефіцієнт корисного використання води підвищується також через те, що, згідно із залежністю Ранца–Маршала [36], коефіцієнт тепловіддачі між краплею і гарячим газом при цьому збільшується:

$$\alpha = \frac{\lambda_{\Gamma}}{d_{\kappa}} \left[2 + 0,6 \cdot \left(\frac{c_{\text{пр}} \mu_{\Gamma}}{\lambda_{\Gamma}} \right)^{0,33} \left(\frac{\rho_{\Gamma} W_{\kappa} d_{\kappa}}{\mu_{\Gamma}} \right)^{0,5} \right], \quad (3.13)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від газу до краплини рідини;

λ_{Γ} – коефіцієнт теплопровідності газового середовища;

μ_{Γ} – коефіцієнт динамічної в'язкості газового середовища;

W_{κ} – відносна швидкість рушення краплини в газовому потоку.

З виразу (3.13) випливає, що теплообмін між краплею і високотемпературним газовим потоком зростає із збільшенням відносної швидкості краплини і буде тим інтенсивніше, чим менше її діаметр.

На рис. 3.4 представлена залежність коефіцієнта тепловіддачі від діаметра крапель і швидкості краплинного потоку, яку побудовано за рівнянням (3.13).

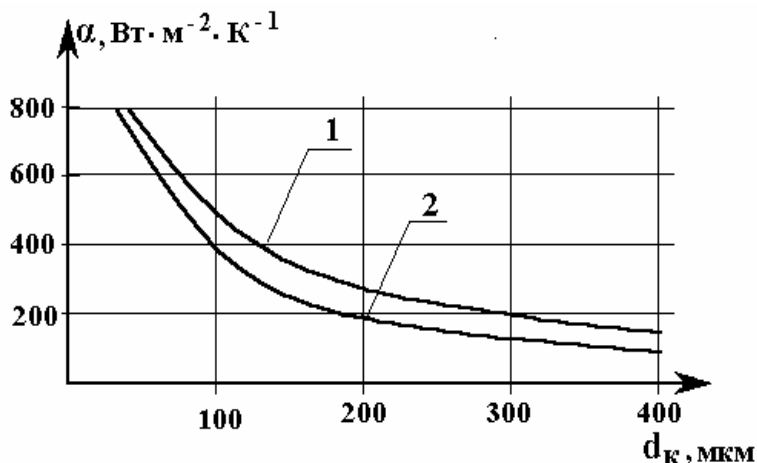


Рис. 3.4 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі від нагрітого газу до краплини від діаметра краплини і відносної швидкості потоків

1 – $W_{\kappa} = 100 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$; 2 – $W_{\kappa} = 50 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$

Зі зменшенням розмірів крапель нижче за $150 \cdot 10^{-6}$ м відбувається різке збільшення значення коефіцієнта тепловіддачі. Збільшення швидкості розпиленого струменя з $50 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ до $100 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ призводить до збільшення коефіцієнта тепловіддачі на 5–10 %.

Таким чином, кількість тепла Q , що відводиться в одиницю часу, прямо залежить від відносної швидкості краплини W_k і зворотно пропорційна квадрату розміру крапель d_k^2 .

Так, в [17] наведені дані, із яких випливає, що 1 м^3 води, розпиленої у виді крапель діаметром $0,3 \cdot 10^{-3}$ м, відбирає в 5,42 рази більше тепла, ніж та ж кількість води, розпилена у виді крапель з діаметром $1 \cdot 10^{-3}$ м при температурі газового середовища 573 К.

Таким чином, при використанні розпилених струменів створюються найбільш сприятливі умови для гасіння. Це найбільш повно відповідає поняттю об'ємної подачі рідкого вогнегасного засобу в зону горіння. При об'ємному методі гасіння найбільш доцільно подавати вогнегасний засіб у зону протікання хімічних реакцій горіння "об'ємно", тобто заповнюючи ним максимально можливу частину об'єму полум'я.

При гасінні твердих горючих матеріалів застосування води з більш високим ступенем дисперсності дозволяє збільшити ефективність гасіння не тільки за рахунок різкої інтенсифікації процесу охолодження зони полум'яного горіння, але, крім того, дрібні краплини води, діаметр яких порівняний з діаметром пор і тріщин, що наявні на високотемпературній поверхні вугілля, проникають всередину вугільного шару, де й випаровуються, ліквідуючи гетерогенне горіння. Випробування імпульсного вогнегасника IFEX–3000 показали, що, завдяки високій швидкості потоку розпиленої рідини ($100 \div 150$) $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$, деревина, текстиль, бавовна та інші волокнисті матеріали намокають на значну глибину, що істотно підвищує ефективність гасіння даних матеріалів.

Гасіння розпиленими струменями має ряд переваг:

- абсолютна екологічна чистота вогнегасної речовини, відсутність озоноруйнуючого ефекту й токсичності;

- відсутність шкідливого впливу на людей, що перебувають в приміщенні, яке захищається;

- підвищена вогнегасна ефективність за рахунок комбінованого впливу:

- охолодження зони горіння;

- розбавлення реагуючих компонентів у зоні горіння за рахунок збільшення повноти випаровування крапель води й утворення значної кількості водяної пари;

- охолодження й змочування поверхні матеріалу, що горить;

- скорочення витрати вогнегасного засобу, а отже, зменшення негативного впливу води на матеріали й обладнання, що захищається;

- підвищення ефективності поглинання теплового випромінювання й адсорбційної здатності води при димоосадженні, що має першорядне значення для забезпечення безпечної евакуації людей з приміщень.

Тому в останні роки спосіб пожежогасіння мілкорозпиленою водою знаходить все більше застосування.

У Фінляндії [38] в ході експериментальних досліджень були промодельовані пожежі у приміщеннях житлових будівель. У приміщенні розмірами (3,6×2,4×2,4) м горів штабель брусків і гасіння здійснювалося мілкорозпиленою водою. При цьому зазначається, що при гасінні використовувалися краплі $d_k < 400 \cdot 10^{-6}$ м. Відмічається також, що у всіх випадках використання засобів імпульсної подачі мілкорозпиленої води [39] вдавалося швидко збити полум'яне горіння і значно знизити температуру в приміщенні до подачі стволів від пересувної пожежної техніки. Крім цього, застосування засобу імпульсної подачі практично не завдає матеріальних збитків від використання води. При переході у спринклерних установках на

мілкорозпилену воду з $d_k \in (10 \div 100) \cdot 10^{-6}$ м вода найбільш швидко переходить у пару й її витрата на гасіння зменшується в $10 \div 20$ раз у порівнянні з існуючими аналогами.

Здавалося б, для підвищення ефективності гасіння доцільно було б максимально збільшувати питому поверхню розпиленого струменя шляхом усе більшого подрібнення крапель, оскільки питома поверхня теплообміну буде тим більшою, чим менший діаметр краплини. Однак такий шлях виправданий лише в тому випадку, коли пристрій викиду вогнегасної речовини розташований безпосередньо в полум'ї.

Якщо краплини мають дуже малий діаметр, то сумарна поверхня їх контакту буде досить великою, однак маса крапель при цьому буде незначною. При гасінні ж ззовні дрібні частки швидко гальмуються в газовому середовищі і не долітають не тільки до поверхні, яка горить, але й не зможуть проникнути в глибину області горіння. Дрібні краплі випаровуються у зовнішніх зонах факела полум'я або уносяться вгору інтенсивними конвекційними газовими потоками, практично не вплинувши на процес горіння. Отже, розмір крапель, тобто міра їх дисперсності, й одночасно час перебування їх у зоні горіння повинні бути такими, щоб добуток цих параметрів був максимальним. Ця умова забезпечує максимальне відведення тепла із зони реакції горіння. Тому існує певна межа для розміру крапель.

Є ряд теоретичних і практичних досліджень із визначення найбільш ефективних розмірів крапель. Найбільшим час контакту краплини з факелом полум'я буде при швидкості польоту краплини, близькій до швидкості витання.

Для того щоб частка не підіймалася вгору, динамічний натиск висхідних струменів газу повинен урівноважуватися силою тяжіння. Знаючи швидкість висхідних газових потоків у газовій колонці над факелом полум'я, можна визначити діаметр краплини, здатної до витання, виходячи з рівняння (2.14), з урахуванням, що $\rho_k \gg \rho_g$:

$$d_k = \frac{3C_x \rho_g w_{\text{вит}}^2}{4g\rho_k}, \quad (3.14)$$

де C_x – коефіцієнт лобового опору;

$w_{\text{вит}}$ – швидкість витання краплі, яка залежить від швидкості висхідних потоків продуктів горіння.

При $\frac{\rho_g}{\rho_k} = 10^{-3}$ з рівняння (3.14) можна отримати значення критичного діаметра, за якого час знаходження краплі в зоні полум'я буде найбільшим (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 - Розмір краплини, здатної до витання при різній швидкості висхідних газових потоків

$v, \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	1	2	5	10
$d_k, \text{м}$	$75 \cdot 10^{-6}$	$300 \cdot 10^{-6}$	$1875 \cdot 10^{-6}$	$7500 \cdot 10^{-6}$

У полум'ї відбувається природний розподіл крапель води: легкі несуться потоком угору, важкі – опускаються. Це сприяє збільшенню розміру розпиленої хмари в полум'ї, при цьому відбувається додаткове екранування поверхні матеріалу від випромінювання зони горіння. Для кожного конкретного полум'я є свій оптимальний спектральний набір розмірів крапель води. Максимум розподілу часток за розмірами лежить навколо d_k , який визначається за формулою (3.14) і пов'язаний із середнім значенням величини швидкості висхідного газового потоку продуктів горіння.

За кордоном також активно ведуться роботи в цьому напрямі. Так, в науково-дослідному центрі FRMC (США) регулярно проводяться крупномасштабні випробування з метою визначення оптимального розміру крапель. В [40] зазначено, що найбільша ефективність гасіння досягається при дисперсності краплинного потоку $(80 \div 200) \cdot 10^{-6}$ м. У ході

комп'ютерного моделювання пожежі в житловому приміщенні також визначено, що для ефективного гасіння необхідно використовувати краплини $d_k = 150 \cdot 10^{-6}$ м. При цьому йдеться про те, що така дисперсність буде закріплена в новому стандарті США для установок пожежогасіння NFPA – 750.

В [41] доведено, що для гасіння пожеж необхідно застосовувати вогнегасну рідину, розпилену до $(40 \div 400) \cdot 10^{-6}$ м. В [42] наводяться дані, що для гасіння пожеж у фарбувальних камерах ефективно використовувати краплинні потоки з дисперсністю $(20 \div 200) \cdot 10^{-6}$ м, а для гасіння проток дизельного палива рекомендують застосовувати розпилену воду з d_k від $100 \cdot 10^{-6}$ м до $350 \cdot 10^{-6}$ м.

У роботі [43] було запропоновано емпіричне рівняння, яке пов'язує час гасіння з характеристикою дисперсності струменя води й основними параметрами, що характеризують процес горіння й гасіння:

$$\tau = 50 \frac{d_k \tau_{в.г.}}{I \Delta T^{1,75}},$$

де τ - час гасіння, с;

d_k - середній діаметр крапель розпиленого струменя, м;

I - витрата води на одиницю поверхні, що горить, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$;

$\tau_{в.г.}$ - тривалість вільного горіння (до початку гасіння), с;

ΔT - різниця між температурою займання рідини й температурою навколишнього середовища.

Це рівняння підтверджує положення, що час гасіння рідини тим менший, чим вище її температура займання, менший час вільного горіння і чим менше розміри крапель водяного струменя.

На рис. 3.5 представлено основні експериментальні дані з визначення оптимального розміру крапель при гасінні речовин

різного роду. Очевидно, що краплини розміром $(100\div 200)\cdot 10^{-6}\text{м}$ забезпечують ефективне гасіння практично в усіх випадках.

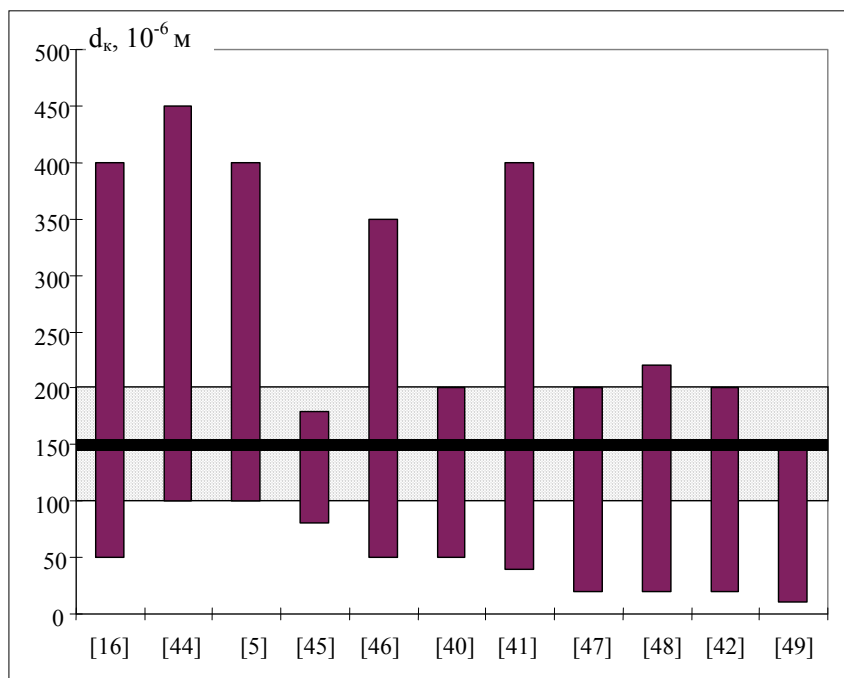


Рис. 3.5 – Дисперсність крапель, що забезпечує ефективне гасіння

З урахуванням того, що більшість пожеж виникає у приміщеннях житлових будівель, при створенні нових зразків пожежної техніки потрібно прагнути отримати краплини розміром $(100\div 150)\cdot 10^{-6}\text{м}$, що найчастіше рекомендується.

До обмеження параметрів розпиленого струменя за діаметром крапель потрібно додати обмеження за швидкістю краплинного потоку. Для підвищення ефективності гасіння пожеж бажано, щоб швидкість потоку становила $(80\div 150)\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Висока швидкість краплинного потоку дозволяє збільшити проникаючу здатність і дальність подачі розпиленого струменя.

1.3 Способи і пристрої розпилення рідин

Для підвищення вогнегасної здатності води необхідно розроблення методів і техніки розпилення води, що дозволяють отримувати з одиниці маси велику питому поверхню крапель із переважаючими розмірами діаметра порядку $(10 \div 50) \cdot 10^{-6}$ м.

Питанням розпилення рідин приділялося й приділяється дуже багато уваги. Це викликано широким спектром застосування технологій розпилення рідин у промисловості, енергетиці та інших сферах технічної діяльності людини. На сьогодні розроблено багато методів розпилення рідин, які класифікуються за способом підведення енергії, що витрачається на подрібнення потоку рідини. Існує декілька способів розпилення рідини: гідравлічний, механічний, пневматичний, пульсаційний, ультразвуковий, електричний, акустичний, комбінований тощо [50]. Кожний з методів має свої переваги й недоліки, але в плані практичного застосування найбільший інтерес представляють гідравлічний, механічний, пневматичний і пульсаційний способи.

У пожежній техніці для розпилення води використовується переважно **гідравлічний** метод, як найбільш простий і економічний за споживанням енергії на диспергування рідини ($2 \div 4$ кВт на диспергування 1 т рідини). При гідравлічному розпиленні основним енергетичним фактором, який приводить до розпаду рідини на краплини, є тиск нагнітання. При проходженні через розпилювальний пристрій рідинний потік, по-перше, набуває великої швидкості і, по-друге, приймає форму, яка сприяє швидкому й ефективному розпаду (струмінь, плівка, великі частинки, залежно від того до якого класу відноситься розпилювальний пристрій). Однак, розпил, що утворюється при цьому, є досить грубим і неоднорідним (можна досягти дисперсності краплин близько $300 \cdot 10^{-6}$ м) до того ж утруднено

регулювання витрати рідини при заданій якості розпилення, а також розпилення високов'язких рідин.

При *механічному* способі розпилення рідина отримує енергію внаслідок тертя об поверхню робочого елемента, що обертається з великою швидкістю. Набуваючи разом із робочим елементом руху обертання, вода під дією відцентрової сили відривається від розпилювача (у вигляді плівок або струменів) і дробиться на краплини.

У цей час подібна техніка розпилення рідини здійснюється переважно за допомогою установки на стволи спеціальних форсунок: дефлекторних, щілинних, гвинтових, відцентрових та розпилювачів, які працюють за принципом зіткнення струменів. Найбільш широке поширення отримали гвинтові і відцентрові (турбінні) розпилювачі, що дозволяють отримувати тонкорозпилений струмінь із розміром крапель $100-200 \cdot 10^{-6}$ м. Істотним недоліком указаних розпилювачів є вельми обмежена дальність польоту струменя, що не перевищує 7-8 м. Невисока далекобійність струменів обумовлена ефектом розпилення рідини в безпосередній близькості від вихідних соплових перетинів. При цьому навіть у разі забезпечення високої швидкості витікання крапель останні швидко гальмуються, пролітаючи невеликі відстані.

До переваг цього способу треба віднести можливість розпилення високов'язких і забруднених рідин і регулювання продуктивності розпилювача без істотних змін диспергування. Недоліками цього способу є те, що розпилювачі такого типу мають високу вартість та складні у виготовленні й експлуатації (енергоємність становить 15 кВт на диспергування 1 т рідини), а їх продуктивність обмежується геометричними розмірами диска й швидкістю його обертання. Крім того, вони створюють широкий факел розпилу, при якому важко забезпечити необхідні характеристики з інтенсивності зрошування. Механічне розпилювання використовують, головним чином, для подрібнення в'язких рідин та суспензій.

При *пневматичному* способі диспергування енергія підводиться до рідини, головним чином, унаслідок динамічної взаємодії її з високошвидкісним потоком розпилювального агента – стиснутим газом (звичайно повітрям). Завдяки великій відносній швидкості потоків у розпилювачі або за його межами рідина спочатку розсіюється на окремі нитки, які потім розпадаються на краплі. Крім дії надлишкового тиску, в соплі розпилювача відбувається турбулізація потоку повітря, при цьому досягається високий ступінь дисперсності води при великому радіусі дії струменя за рахунок імпульсу, що вноситься в потік газом. До переваг пневматичного способу відносяться: невелика залежність якості розпилювання від витрати рідини (у той час як при гідравлічному способі вона є суттєвою), надійність в експлуатації, можливість досягти високої дисперсності розпилу з медіанним перетином краплин у кілька мікронів і створити необхідний факел розпилу, можливість розпилювання високов'язких рідин. Але при цьому не можна забезпечити високу продуктивність розпилювача. Основний недолік цього способу – необхідність у розпилювальному агенті і в додатковому обладнанні для його подачі (застосування компресорів та іншої газової апаратури), велика витрата газу для розпилення води, підвищена витрата енергії (50-60 кВт на 1 т рідини). Усе це збільшує вартість такого способу диспергування рідини.

При *пульсаційному* розпиленні збурення, що спричиняють дроблення струменя рідини, посилюються за рахунок пульсацій тиску і зміни витрати. Пульсації тиску призводять до додаткових коливань рідини, збільшення поверхневої енергії струменів, швидкої втрати її стійкості і, як наслідок, до більш тонкого розпилення.

Робота більшості конструкцій стволів-розпилювачів цього типу заснована на періодичному повному перекритті проточних ліній, внаслідок чого відбувається підвищення тиску перед форсункою й витікання рідини певними порціями. Застосовуються також конструкції, в яких відбувається накладення пульсацій тиску на основну витрату рідини. При цьому

ефективність розпили визначається співвідношенням статичного тиску основної витрати й рівня амплітуд пульсацій, що накладаються.

Пульсуюче витікання рідини з подальшим мілкодисперсним розпилом може бути створено також за допомогою установок циклічної дії, в яких струмінь формується за рахунок видавлювання рідини заздалегідь стиснутим газом. Стиснення газу в ємності здійснюється, в основному, або за допомогою вприскування в робочий об'єм пневмогідроаккумулятора горючих сумішей і подальшого їх запалення, або за рахунок безпосереднього введення в останній стиснутого повітря або продуктів спалення пороху.

При цьому в пневмогідроаккумуляторі забезпечується тиск порядку $(3-5) \cdot 10^6$ Па, під яким і здійснюється подача рідинного струменя. Достойнством указаних конструкцій є можливість подачі струменів на відносно великі відстані (до ~ 100 м) при добрій якості розпили. Однак, ці конструкції мають істотні недоліки: зміна параметрів витікання при зменшенні тиску в пневмогідроаккумуляторі, високе значення відношення часу заповнення пневмогідроаккумулятора до часу витікання, конструктивна складність і необхідність наявності джерела стиснутого повітря або палива для забезпечення функціонування установок.

Аналіз вітчизняних і зарубіжних пристроїв розпилення рідин показує, що особливу увагу розробники приділяють проблемам підвищення якості й ефективності розпилення, а також підвищенню тонкості диспергування. В розвинених країнах Європи й Америки вже тривалий час широко використовують для цих цілей насоси високого тиску. Удосконалення установок пожежогашіння відбувається шляхом підвищення тиску (до декількох сотень атмосфер) при порівняно невеликій витраті води ($0,3-0,5 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$). К технічним новинкам такого типу відносяться пристрої пожежогашіння високого тиску HDL 250 німецької фірми MINIMAX, система KAMAT-FOGTEC, яку представляє

голландська фірма FireX. Варто згадати і ручний імпульсний вогнегасник IFEX 3000, запропонований тією ж фірмою.

Найбільш цікавими вітчизняними розробками в цій області є установка "Тайфун 1-10" і російська розробка "Игла 1-0.4".

Установка "Тайфун 1-10"

Переваги установки:

- висока швидкодія;
- мобільність (швидка доставка до місця пожежі і швидка підготовка до роботи);
- універсальність (дозволяє використовувати в якості вогнегасного реагенту як звичайну, так і морську воду, водні розчини змочувача, піноутворювача);
- економічність (у більшості випадків використовується тільки вода і стисле повітря);
- екологічна безпека;
- значний охолоджуючий ефект, що дозволяє оператору швидко проникати в приміщення, що горить, і при необхідності робити евакуацію людей.

Технічні характеристики:

1. Місткість:

посудини для води **10 л**

балона для повітря **2 л**

2. Робочий тиск у балоні для повітря **20 МПа**

3. Дальність викиду вогнегасної речовини
10 м

не менше

**4. Кількість імпульсних подач
вогнегасної речовини за одну за-
правку** **10**

5. Тривалість:

**підготовки до приведення вогнегасни-
ка в дію** **40с**
не більше

перезарядки ствола не більше **3 с**

6. Маса вогнегасника повна **30 кг**

7. Габаритні розміри **200/280/750,**
м

Ранцева установка пожежогасіння "Игла 1-0.4"

Призначена для придушення локальних осередків пожежі класу А, В, Е. Установка "Игла-1-0.4" проводить гасіння за допомогою високошвидкісного тонкорозпиленого струменя води.

Технічні характеристики:

- 1. Кількість вогнегасної рідини** до 12 л
- 2. Дальність** до 10 м
- 3. Дисперсність крапель води** біля $100 \cdot 10^{-6}$ м
- 4. Швидкість струменя**

в області осередку пожежі не менше за $20 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$

на виході зі ствола більше за $80 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
- 5. Маса в заправленому стані**

без дихальної системи до 20 кг

з дихальною системою до 23 кг
- 6. Габарити** 600/450/300 мм
- 7. Час перезарядки для використан-** 20-60 с
ня
- 8. Час роботи дихальної системи**

з балоном 2л

до 20 хв.

з балоном 4л

до 40 хв.

При сертифікаційних випробуваннях підтверджено, що система може успішно застосовуватися для ліквідації наступних пожеж:

- модельний осередок пожежі класу **3А** (штабель із 144 дерев'яних брусків розміром 735х40х40 мм і кількістю шарів – 18, площа поверхні горіння становить 17,4 м² деревини). Установкою ця пожежа гаситься 6–7 літрами рідини.

- модельний осередок пожежі класу **89В** (89 літрів бензину у ванні діаметром 1,89 м). Для гасіння осередку потрібно 4–5 літрів води (з 3% піноутворювача типу "Легка вода").

- енергоустаткування за класом **Е**. Установка безпечна при гасінні електроустановок і обладнання під напругою до 36000 вольт із відстані не менше за 1 метр.

Останнім часом знайшло застосування гасіння пожеж водою аерозольного розпилу, отриманого внаслідок перегріву води за допомогою електричного нагрівача або за рахунок проходження хімічних екзотермічних процесів. Вода нагрівається до температури, що перевищує температуру кипіння за нормальних умов [51, 52]. При цьому використовуються установки, які складаються з ізотермічної ємності для нагріву й зберігання води і розводящого трубопроводу з перфорацією уздовж робочої довжини.

Процес витікання перегрітої рідини супроводжується адіабатичним скипанням, яке починається в той момент, коли тиск рідини стає нижче за тиск насичення при даній температурі рідини. Так, при випуску води, перегрітої до 150°C, швидкість парорідинного потоку досягала надзвукової. При цьому відбувалося скипання струменя води по всьому її об'єму, що супроводжувалось розпадом на досить дрібні краплини (менше

за $100 \cdot 10^{-6}$ м) з утворенням аерозольного розпилу. Вимірювання розмірів крапель показали однорідність структури потоку. Формування струменя завершується на відстані приблизно 0,2 м від зрізу сопла, і далі зміна розмірів крапель не відбувається. На відстані 0,5 м від сопла температура струменя не перевищує 60°C .

Потрібно зазначити, що гасіння водою з підвищеною температурою є більш ефективним, оскільки гаряча вода, попадаючи в полум'я, відбирає тепло із зони горіння в 5-7 разів більше, ніж холодна. Це пояснюється тим, що із зростанням температури зростає частка води, що випаровується з поверхні краплини. Нагріта вода легше переходить у газоподібний стан і при цьому забирає значну кількість тепла із зони горіння ($H_{\text{вип.}} = 2265 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$), а холодній воді необхідний більший час для попереднього нагріву й переходу в пару. При цьому краплини холодної води за час їх знаходження в полум'ї можуть не встигнути повністю випаруватися й забрати максимально можливу кількість тепла.

При проведенні експериментальних досліджень і гасінні реальних пожеж установлено, що застосування перегрітої води є найбільш ефективним при пожежогасінні в обмежених об'ємах. Так, гасіння загоряння бензину і дизельного палива в насосних станціях об'ємом 210 і 1250 м^3 досягалося при інтенсивності подачі води $0,007 \text{ л} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ і вище за час не більший за 70 с. Зафіксовано також швидке осадження диму, чого не відбувалося при використанні звичайних засобів пожежогасіння.

Очевидно, що застосування перегрітої води для цілей пожежогасіння вимагає певних витрат енергії для нагрівання води, однак вони можуть бути істотно знижені за рахунок використання перегрітої технологічної води, що є в ряді сучасних виробництв (на теплових електростанціях, об'єктах металургії, нафтохімії та інших).

Принцип попереднього перегріву води використовується в сучасних водоаерозольних вогнегасниках російського виробництва типу ОВА-9Е із зарядом вогнегасної речовини $0,0052 \text{ м}^3$

і потужністю нагрівача 2 кВт, а також у термохімічних пароаерозольних генераторах ТПАГ. Генерація водяної пари перегрітої води і хімічно активного аерозолі в ТПАГ здійснюється внаслідок екзотермічної реакції спеціальної енергоакуючої речовини з водою.

В цілому, аналіз тенденцій розвитку техніки пожежогашіння дозволяє зробити висновок про перспективність використання установок аерозольного розпилю води, особливо для боротьби з пожежами в житлових і адміністративних будівлях, де непрямий збиток від пожежі часто перевищує безпосередні втрати від вогню.

Таким чином за допомогою зміни дисперсності вогнегасної речовини можна змінювати умови тепломасообміну між вогнегасною речовиною й полум'ям і, отже, за рахунок збільшення загальної площі поверхні випаровування збільшувати вогнегасну ефективність речовини.

Розділ 2. Вплив хімічних добавок на вогнегасну ефективність води

При гасінні рідин із високою температурою спалаху і твердих горючих матеріалів велике значення має охолодження за допомогою води поверхневого шару горючого матеріалу. Кількість тепла, яку поглинає крапля води при контакті з поверхнею матеріалу, що горить, можна виразити формулою:

$$Q = \tau S_k \alpha (T_{\text{пов.}} - T_k), \quad (3.15)$$

де τ – час контакту краплі з поверхнею матеріалу, що горить;

S_k – площа контакту краплі з поверхнею матеріалу, що горить;

$T_{\text{пов.}}$ – температура поверхневого шару матеріалу, що горить;

T_k – температура краплі.

Отже, збільшення часу контакту за рахунок підвищення адгезійних властивостей води і зменшення швидкості стікання (збільшення в'язкості) призводять до зростання кількості тепла, що відбирається від поверхні горіння. Цей же результат спостерігається при збільшенні площі контакту й коефіцієнта тепловіддачі, який, у свою чергу, пов'язаний з кутом змочування зворотною залежністю [53]. Таким чином, ефективність гасіння можна підвищити, інтенсифікуючи теплообмін за рахунок зміни в'язкості, поверхневого натягнення й кута змочування вогнегасного засобу.

Змінити властивості води, наприклад, підвищити змочувальну здатність і в'язкість, знизити температуру замерзання і корозійну активність, і тим самим підвищити вогнегасну ефективність води, можна шляхом введення різних хімічних добавок.

Відсутність теоретичних досліджень механізму вогнегасної дії різних добавок до води не дозволяє досить точно кількісно прогнозувати результат впливу тієї або іншої добавки на вогнегасну ефективність води. Тому в розв'язанні питання щодо ефективності добавок основна увага приділяється експериментальним дослідженням.

Дослідження процесу гасіння водою й розчинами можна провести на лабораторній установці, схема якої представлена на рис. 3.6.

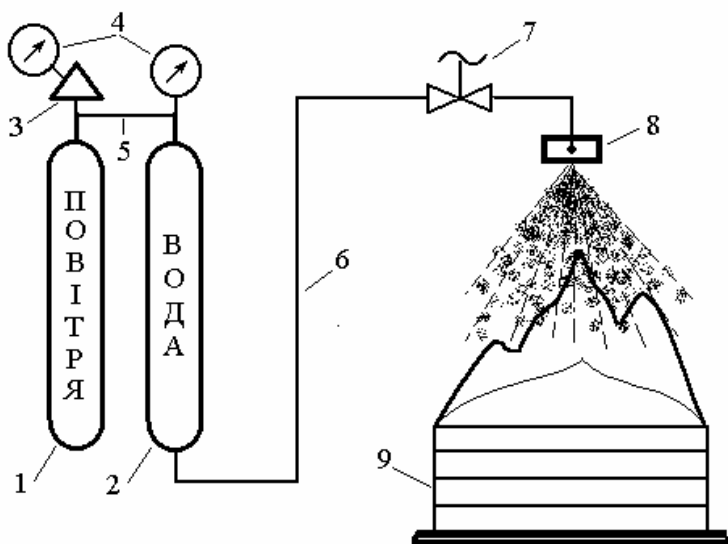


Рис. 3.6 – Схема лабораторної установки з визначення вогнегасної ефективності води та водних розчинів

1 – балон із повітрям; 2 – ємність із водою; 3 – редуктор; 4 – манометри; 5 – пневматичний трубопровід; 6 – гідравлічний трубопровід; 7 – регулювальний кран; 8 – зрошувач; 9 – модельний осередок пожежі класу 1А

Принцип дії установки полягає в наступному: стиснуте повітря з балона (1) по пневматичному трубопроводу (5) подається в ємність (2), із якої по трубопроводу (6) вогнегасна речовина подається на об'єкт гасіння (9). Пуск води здійснюється за допомогою запірного вентиля (7). Тиск у балоні з повітрям становить $120 \cdot 10^5$ Па. Об'єм води в ємності – 5 літрів. Редуктор (3), встановлений на балоні, зменшує тиск таким чином, щоб на виході зі зрошувача (8) (діаметр sprisku 4 мм) тиск становив $(4 \div 6) \cdot 10^5$ Па. Тиск фіксується манометрами (4). Випробування проводяться на спеціальному стенді, що забезпечує приток кисню, витяг продуктів горіння і візуальний огляд.

Як об'єкт дослідження використовується модельний осередок пожежі класу 1А – це штабель з 72 брусків сосни (вогкістю від 10 до 14%) з поперечним перетином у вигляді квадрата зі стороною 40 мм, довжина бруска становить 500 мм. Бруски, які створюють поверхневі грані штабеля, для міцності закріплюються скобами. Штабель розміщується на двох сталевих кутках, встановлених над деко з бензином таким чином, щоб відстань від основи штабеля до поверхні рідини становила 400 ± 10 мм. Установлюють дерев'яні бруски так, як показано на рисунку 3.7. Бруски кожного наступного шару кладуться перпендикулярно до брусків шару, який лежить нижче, таким чином, щоб вони утворили канали прямокутного перетину по всьому об'єму.

Деко розмірами $400 \times 400 \times 100$ розміщують на платформі під штабелем. Виставляють деко горизонтально, дно його покривають шаром води як базою і заливають бензином А-76 літнім у кількості 1,1 літр. Підпалюють горючу рідину, після вигорання якої деко забирають з-під штабеля. Тривалість вільного горіння вогнища становить 3 хвилини. З відстані 1 метра відбувається гасіння осередку пожежі. Модельна пожежа вважається погашеною, коли повністю ліквідоване гетерогенне горіння. Час гасіння визначається за секундоміром із моменту подачі вогнегасної речовини до припинення полум'яного горіння і до повної ліквідації горіння.

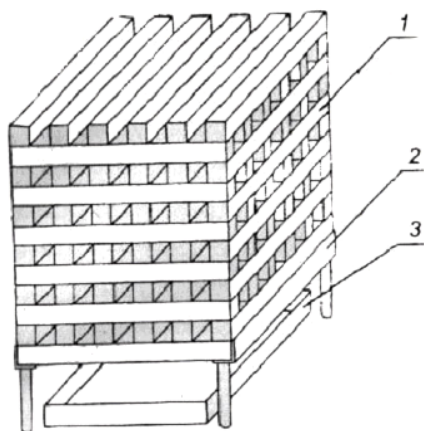


Рис. 3.7 - Загальний вигляд модельного осередку пожежі класу 1А

1 – штабель із дерев'яних брусків; 2 – опори; 3 – деко для підпалу штабеля.

За показники вогнегасної ефективності добавок, що застосовуються, взято коефіцієнти K_1 і K_2 . Коефіцієнт K_1 показує, у скільки разів час ліквідації полум'яного горіння водою більше, ніж розчинами добавок. Коефіцієнт K_2 показує, у скільки разів час повного припинення горіння (включаючи і гетерогенне у разі горіння твердих горючих матеріалів) водою більше, ніж розчинами добавок:

$$K_1 = \frac{\tau_{1\text{вод}}}{\tau_{1\text{розч}}}, \quad K_2 = \frac{\tau_{2\text{вод}}}{\tau_{2\text{розч}}}, \quad (3.16)$$

де $\tau_{1\text{вод}}$, $\tau_{1\text{розч}}$ – час ліквідації полум'яного горіння водою й розчином добавки відповідно;

$\tau_{2\text{вод}}$, $\tau_{2\text{розч}}$ – час повної ліквідації горіння водою й розчином добавки відповідно.

2.1 Підвищення вогнегасної ефективності води при використанні змочувачів

Істотним недоліком води є її порівняно низька змочувальна здатність і велика текучість, які обумовлені високим значенням коефіцієнта поверхневого натягу при відносно малій в'язкості (див. табл. 1.2). Ці властивості води зумовлюють той факт, що поверхня зіткнення крапель води з палаючою поверхнею невелика, і при гасінні вода з них швидко стікає.

Дуже важко гасити волокнисті, пилоподібні та особливо тліючі матеріали. Тліюню піддаються матеріали з великою питомою поверхнею, у порах яких міститься повітря у кількості, достатній для підтримки горіння, тому такі матеріали можуть горіти при значно зменшеному вмісті кисню в навколишньому середовищі. Проникнення вогнегасних засобів у пори тліючих матеріалів, як правило, досить ускладнено. Відомий, наприклад, випадок, коли скинена в ріку палаюча кипа бавовни продовжувала зсередини жевріти після того, як її витягли з ріки через кілька тижнів. Великі труднощі викликає забезпечення надійного гасіння пожеж теплоізоляційних конструктивних елементів (наприклад, великих холодильників), виконаних, як правило, із волокнистих матеріалів. Нерідко в подібних випадках доводиться робити повне розбирання таких конструктивних елементів. Крім того, деревне вугілля, що утворюється на пожежах при горінні целюлозних матеріалів (деревини, бавовни, паперу, тканини, сіна, соломи та інших), має гідрофобні властивості, що не дозволяє воді проникати у пори вугілля; при цьому процес охолодження відбувається повільно.

Для збільшення площі зіткнення води з деревиною, що горить, і, отже, швидкості охолодження на практиці, в залежності від конкретних умов, використовують компактну частину суцільного струменя або розпилений струмінь. У першому випадку площа поверхні зіткнення збільшується за рахунок введення води під тиском в пори вугілля, у другому – за рахунок подачі води на велику площу поверхні. Ці прийоми

прискорюють процес гасіння, але не можуть значно знизити інтенсивність подачі води на гасіння.

Таким чином, значна частина води, що подається в зону горіння для гасіння пожежі, практично витрачається даремно і, більше того, у процесі гасіння зайві протоки води наносять додатковий матеріальний збиток. Частково ці недоліки води як вогнегасного засобу компенсуються застосуванням розчинів спеціальних добавок.

Для поліпшення вогнегасних властивостей води необхідно зменшити її поверхневий натяг і підвищити змочувальну здатність. У цьому випадку при зіткненні з матеріалом, що горить, вона буде розтікатися по його поверхні, покривати велику площу, легше проникати в пори матеріалу й охолоджувати його, а, отже, можна швидше досягти ефекту гасіння. Для зменшення поверхневого натягу води при гасінні пожеж горючих речовин, що погано змочуються водою, застосовуються водні розчини змочувачів. Завдяки цьому краплі води втрачають кулеподібну форму, легко розтікаються та проникають у капіляри й пори твердих горючих матеріалів, витісняючи з них повітря.

Змочувачі, що застосовуються для зменшення поверхневого натягнення води, є **поверхнево-активними речовинами (ПАР)**.

Поверхнево-активними називаються речовини, здатні при розчиненні у воді накопичуватися на поверхні, зменшуючи поверхневий натяг на межі з повітрям або іншим середовищем і, головним чином, здатні різко змінювати поверхневий натяг в залежності від концентрації.

По відношенню до води поверхнево-активними є мила, солі сульфованих вуглеводнів, спирти, аміни, перфторовані вуглеводні, білки, продукти їх переробки та інші сполуки.

Як правило, ці речовини мають асиметричну будову і є дефільними, тобто складаються з короткої полярної та довгої неполярної частини. Полярна частина молекули ПАР (на рис. 3.8 частина б), яка добре гідратується, визначає розчинність її у воді. Неполярна вуглеводнева частина молекули ПАР

(на рис. 3.8 частина *а*) розташовується в повітрі або в іншій неполярній речовині, що межує з водним розчином ПАР.

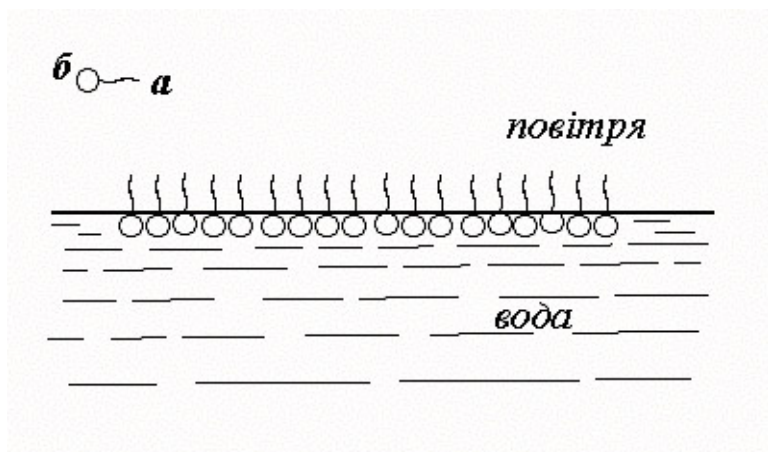


Рис. 3.8 – Розташування молекул ПАР
у поверхневому шарі води

а – гідрофобна частина молекули ПАР,

б – гідрофільна частина молекули.

Властивості ПАР залежать від хімічної природи та будови молекул. ПАР умовно можна розділити на дві великі групи.

До першої групи відносяться речовини, які розчинні у воді, але не дисоціюють і не створюють іонів, – **неіоногенні ПАР**. До неіоногенних речовин можна віднести поліоксисполуки, прості поліефіри, поліаміни. Розчинення таких сполук у воді зумовлено створенням між атомами оксигену цих сполук і молекулами води водневого зв'язку й утворенням гідратів. Вуглеводнева частина, що входить у сполуку, зумовлює її гідрофобні властивості.

Як подібні змочувачі при пожежогасінні використовуються змочувач ДБ, емульгатор ОП-4, допоміжні речовини ОП-7 і ОП-10, що є продуктами приєднання 7÷10 молекул етиленоксиду до моно- і діалкілфенолам, алкільний радикал яких містить 8÷10 атомів вуглецю.

У другу групу входять речовини, молекули яких при розчиненні у воді дисоціюють на іони. Такі ПАР називають *іоногенними*. В залежності від заряду вуглеводневих іонів їх ділять на дві підгрупи:

- катіоноактивні, при дисоціації яких утворюється позитивно заряджений вуглеводневий іон і, як правило, невеликий неорганічний аніон, що зумовлює розчинність молекули у воді (солі високомолекулярних органічних азотовмісних сполук);

- аніоноактивні, при дисоціації яких утворюється негативно заряджений вуглеводневий іон і невеликий катіон, що зумовлює розчинність ПАР у воді (мила, органічні сульфати і сульфонати, відомі як "миючі засоби").

Питання застосування змочувачів для цілей пожежогашіння досить детально розглянуті в роботах [54, 55].

Найбільш широко в пожежній охороні застосовуються аніоноактивні сполуки. До них відносяться:

- алкілсульфати первинних і вторинних спиртів (отримують сульфатуванням жирних спиртів сірчаною кислотою з подальшою нейтралізацією лугом);

- алкіларилсульфонати (сульфоноли НП-1 і НП-3, які синтезують із бензолу й полімерів пропілену з подальшим сульфатуванням і нейтралізацією алкілбензолсульфокислот, змочувач дибутилнафталін сульфат НБ);

- алкілсульфонати (утворюються сульфохлорируванням парафінових вуглеводнів);

- змочувач РАС (отримують з фракції гасу з температурою кипіння 160-310°C із подальшим сульфуванням сірчаним ангідридом).

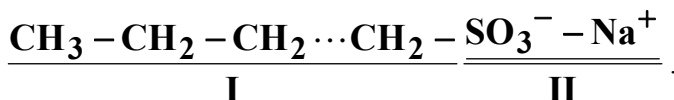
Серед змочувачів можна виділити окремо групу плівкоутворюючих фторвмісних поверхнево-активних речовин, які використовують в основному для гасіння пожеж класу **В**. Вони знижують поверхневий натяг водного розчину до величини, меншої, ніж у органічного розчинника, забезпечуючи умову плавучості плівки, що утворюється на органічній рідині. Прикладом таких речовин можуть бути піноутворювачі фірми *Minnesota Mining and Manufacturing Co* (3М) під назвою "легка вода" (у патенті на цей піноутворювач указаний ряд фторова-

них вуглеводневих сполук, хімічні формули яких $C_6F_{13}SO_2NH(CH_2)_3N(C_2H_5)_2$, $C_7F_{15}CONH(CH_2)_3N(CH_3)_3I$, $C_8F_{17}SO_2N(C_2H_5)CH_2COOK$ та ін.), піноутворювачі, що випускаються в Російській федерації, такі як Форетол (суміш фторованих і нефторованих ПАР із добавками) і ПОФ-9М, піноутворювач “ППЛВ-(Універсал)”, який розроблений в Україні.

Майже всі ПАР, що використовуються для цілей пожежогасіння, – рідини з різною в'язкістю, тільки сульфонол НП-1, змочувач НБ і сульфонати деяких марок – тверді речовини з різною мірою розчинності. Сульфонол НП-1 потрібно готувати лише у виді розчину робочої концентрації. Зі змочувача НБ і сульфоната можна отримати концентровані розчини, які потім можна підсмоктувати до води або переносними ежекторами, або змішувачами пожежних автомобілів. Емульгатор ОП-4, допоміжна речовина ОП-7, змочувач ДБ – в'язкі рідини. Їх заздалегідь розбавляють водою і потім підмішують до води. Інші речовини – рідини, що добре змішуються з водою. Вони легко підсмоктуються ежектуючим пристроєм.

Розчинені у воді молекули ПАР абсорбуються на поверхні води і концентруються з утворенням мономолекулярного шару, при цьому розташовуючись на межі розділу фаз вода-повітря певним чином.

Покажемо це на прикладі аніоноактивного змочувача. Аніоноактивний змочувач складається з парафінового ланцюга (I) і залишку (радикала) аніоноактивної групи (II):



Парафіновий ланцюжок, який, в залежності від числа атомів вуглецю, може мати різну довжину, – це гідрофобна частина, тобто не розчинна у воді. Негативно заряджений аніоноактивний радикал – гідрофіль. Катіон натрію частково дисоціює.

Молекули концентруються на поверхні води таким чином: частина молекули, яка відштовхується водою, розташовується над поверхнею води та утворює мономолекулярний шар;

інша частина, притягнута водою, забезпечує зниження її поверхневого натягу (див. рис. 3.8). Концентрація ПАР у поверхневому шарі значно більша, ніж в об'ємі. Молекули води своєю позитивною частиною хаотично підстроюються до негативної частини молекули змочувача. Цей процес називається *сольватацією*.

Парафінова частина молекули змочувача добре контактує з водонерозчинними органічними речовинами. Тому коли водний розчин попадає на поверхню важко змочуваної речовини (наприклад, гуми, кам'яновугільного пилу, вуглецю), гідрофобна частина молекул змочувачів притягується до цієї поверхні. Гідрофільна частина змочувачів направлена у воду, завдяки чому молекули змочувача стають ніби посередниками контакту між молекулами води та важко змочуваної речовини.

Кількість змочувача в розчині повинна бути такою, щоб його молекули надійно забезпечували утворення мономолекулярного шару на поверхні води. Більшість розчинів змочувачів при такій концентрації мають найбільш стабільну зміну фізичних властивостей.

Молекули змочувача в сильно розбавлених розчинах роз'єднані, але з підвищенням їх вмісту в розчині при певній концентрації, яка має назву "*критичної концентрації міцелотворення*" (*ККМ*), в системі з окремих молекул ПАР починають утворюватися міцели. Вони являють собою агрегати, в яких молекули злипаються вуглеводневими кінцями й звернені до води сильно полярними групами. Спочатку утворюються сферичні міцели Гартлея, які з подальшим збільшенням концентрації переходять у пластинчаті міцели Мак-Бена, що нагадують за будовою двомірний кристал. Аніони абсорбують недисоційовані молекули, при цьому утворюються міцели, що складаються з 20 000–30 000 молекул змочувача. Величина міцели визначається гідрофобною частиною молекул; молекули жирних кислот утворюють маленькі міцели, які недостатньо поверхнево активні.

Для більшості розчинів змочувачів при концентрації 0,5–2% досягається граничне значення поверхневого натягнення і

змочувальної здатності, які при подальшому збільшенні концентрації змінюються незначною мірою (див. рис. 3.9).

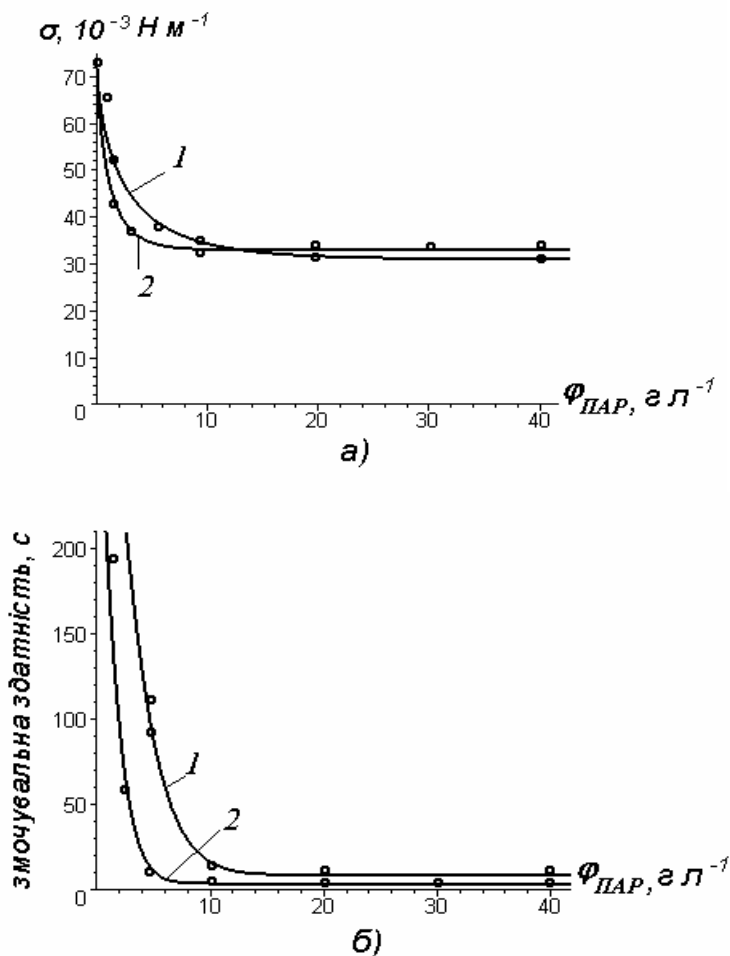


Рис. 3.9 – Залежність поверхневого натягу (а) і змочувальної здатності (б) від концентрації поверхнево-активних речовин (ПАР) у розчині

1 – водний розчин алкілсульфатів натрію фракції С₆–С₁₆; 2 – водний розчин бутилнафталінсульфонату натрію.

Концентрація деяких змочувачів може становити до 5%. Властивості водних розчинів деяких поверхнево-активних речовин приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Властивості водних розчинів поверхнево-активних речовин у залежності від їхньої концентрації

ПАР	Концентрація, %	Здатність до змочування, с	Поверхневий натяг, $10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$
сульфонол хлорний	0,25	45	33,1
	0,5	20	31,9
	1	10	31,7
	2	6	30,9
сульфонат	0,25	11	31,1
	0,5	6	29,5
	1	3,7	28,6
	2	3,5	28,1
змочувач НБ	0,25	600	47,2
	0,5	21,4	38,6
	1	2,4	34,6
	2	1,8	34,0
алкілсульфати (C ₁₀ –C ₁₆)	0,25	42	42,9
	0,5	9,1	33,7
	1	5	30,3
	2	4	29,9
рафінований алкіларілсульфонат (РАС)	0,5	600	42,7
	1	28,6	37,1
	2	6,2	35

Найбільш широко водні розчини змочувачів застосовуються для гасіння пожеж твердих горючих матеріалів. У таблиці 3.3. приведені результати порівняльної оцінки ефективності води без

добавки і з добавкою 0,2%-ного розчину сульфонату при гасінні модельного осередку пожежі класу 1А.

Таблиця 3.3 – Параметри пожежогасіння модельного осередку пожежі класу 1А водою і розчином сульфонату

Параметр пожежогасіння	Вода	
	без добавки	з добавкою
Час гасіння, с	206	90
Загальна витрата води, л	16	3,6
Питома витрата, л м ⁻²	25	5,6
Критична інтенсивність подачі, л м ⁻² с ⁻¹	0,12	0,06

З цих даних видно, що при введенні добавки сульфонату витрата води на гасіння знижується в чотири рази, а час гасіння – більше, ніж у два рази, при цьому згідно (3.16) значення K_1 дорівнює 2,3.

Результати гасіння пожеж у житлових будівлях і квартирах розчином змочувача сульфонола приведені в таблиці 3.4 і в додатку В.

У дослідях із гасіння ряду пожеж класу А₂ застосування змочувачів також приводить до істотного зниження критичної інтенсивності подачі вогнегасного розчину й часу гасіння. Наприклад, в роботі [56] було зазначено, що при гасінні 1 т текстилу витрата води з добавкою біля 3,5% ПО-6 знижується приблизно в 1,5-2 рази. Гасіння автомобільних шин із завантаженням 100 кг м⁻² із застосуванням змочувача ДБ (2%) здійснюється в 1,7 раза швидше. При гасінні каучуку (декілька штабелів розміром 4х4х2 м) 5% розчином алкіларилсульфонату горіння було ліквідовано за 2 хвилини, тоді як суцільним і розпилим струменями чистої води за тих же умов гасіння домогтися не вдалося.

Таблиця 3.4 – Основні параметри пожежогасіння деяких пожеж за допомогою водного розчину змочувача (сульфонола)

Об'єкт горіння і площа горіння	Витрата розчину змочувача, л	Час гасіння, хв	Питома витрата, л·м ⁻² .	Інтенсивність подачі розчину, л·м ⁻² ·с ⁻¹
Дерев'яний будинок, підготовлений до знесення. Площа горіння 180 м ²	2000	15	11,1	0,012
Пенька. Площа горіння 94 м ²	1600	15	17,0	0,09
Дерев'яна тара. Площа горіння 87 м ²	1000	12	11,5	0,018
Дерев'яне міжповерхове перекриття. Площа горіння 52 м ²	1000	10	19,2	0,031
Дерев'яна підлога, дошки. Площа горіння 70 м ²	1000	20	14,3	0,012

Найбільший ефект добавки змочувача дають при гасінні таких матеріалів, як бавовна, купи паперу, деревний пил, лісовий ґрунт. У таких випадках для практичного застосування рекомендуються 0,75% розчини змочувачів.

Досліди з гасіння полум'я горючих рідин водними розчинами змочувачів також показали їх більш високу ефективність, в порівнянні з чистою водою [57].

Результати дослідів по гасінню трансформаторного масла водними розчинами різних ПАР представлено на рис. 3.10. Пунктирною лінією позначено величину критичної інтенсивності подачі чистої води на гасіння модельного осередку класу **13В** (13 л бензину марки А–76 горить на площі 0,41 м²).

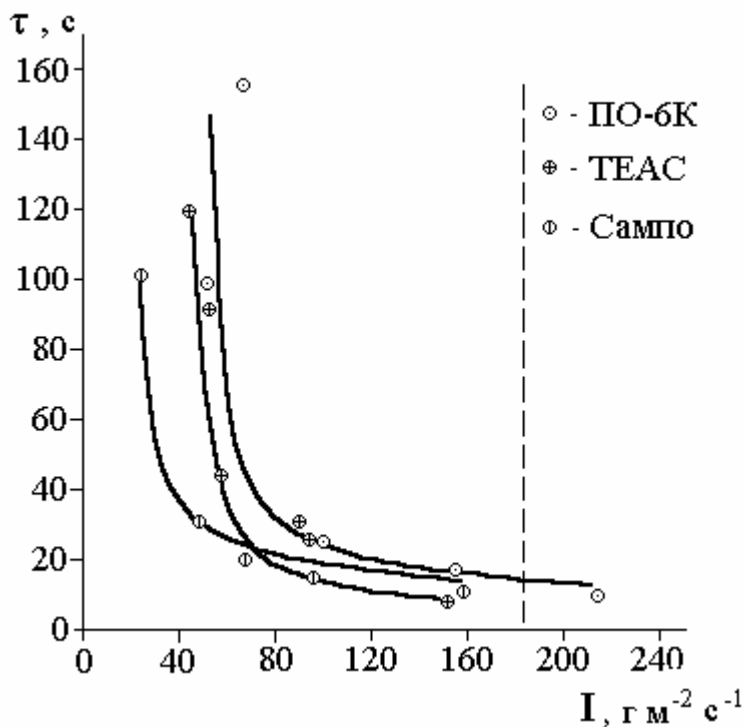


Рис. 3.10 – Залежність часу гасіння трансформаторного масла від інтенсивності подачі водного розчину

Найменшу критичну інтенсивність подачі має 2% розчин змочувача Сампо, при цьому коефіцієнт ефективності $K_1 \approx 7$ (для 2% розчину змочувача TEAC коефіцієнт $K_1 \approx 4$, для 4% розчину ПО-6К коефіцієнт $K_1 \approx 3$).

Однак, пояснення підвищення вогнегасної ефективності водного розчину при гасінні горючих рідин із залученням механізму дії добавки при гасінні твердих горючих речовин (тобто поліпшення змочувальної здатності води) неправомірно. Так, гасіння горючих рідин з низькими температурами спалаху відбувається завдяки охолодженню газової фази (зони горіння), а

гасіння горючих рідин із високими температурами спалаху – за допомогою охолодження поверхневого шару.

Ефективність гасіння в газовій фазі зумовлена підвищеною проникаючою здатністю потоку розпиленого розчину в зону горіння, оскільки наявність шару ПАР на поверхні краплі ускладнює випаровування води. Так, швидкість випаровування крапель розчину, що містить 0,1% олеату натрію, знижується на 20÷40% [58].

З іншого боку, процес дроблення краплі в газовому потоку і при ударі об поверхню розділу фаз, який характеризується критерієм Вебера We , визначається поверхневим натягненням рідини σ (див. (3.7)). Якщо критерій Вебера перевищує деяке критичне значення, відбувається дроблення краплі. Отже, зниження коефіцієнта поверхневого натягу при введенні добавок ПАР при однаковій величині крапель та їх швидкості в момент зіткнення приводить до більш інтенсивного дроблення крапель із зменшенням розмірів "осколків". При цьому питома поверхня теплообміну збільшується в 3-5 разів.

Крім того, краплі розчину, попадаючи на поверхню горючої рідини, можуть розтікатися по ній і створювати додатковий ізолюючий ефект за рахунок зниження інтенсивності випаровування горючої речовини через шар водного розчину. Найбільш ефективно з цієї точки зору проявили себе фторовмісні ПАР [59]. Так, добавки у воду фторованих поверхнево-активних речовин, таких як Сампо, Форетол, ПОФ-9 (у кількості 0,5%), при гасінні горючих рідин дрібнорозпиленими струменями скорочують час гасіння у три рази. Розчини фторованих ПАР мають властивість розтікатися тонким шаром по поверхні горючих вуглеводневих рідин, густина яких на 15-20% нижче за густину розчину, при цьому на поверхні рідини утворюється стійка плівка. Така плівка тривалий час ізолює дзеркало рідини від навколишнього простору, перешкоджаючи виходу її пари. Навіть механічне руйнування (зсув, видалення) частини цієї плівки шляхом інтенсивного перемішування лише ненадовго "оголює" дзеркало горючої рідини.

Після припинення механічного впливу плівка водного розчину знову швидко зтягується, покриваючи всю поверхню суцільним шаром. Для успішного гасіння плівкоутворюючими складами струмінь вогнегасної речовини необхідно подавати під невеликими кутами до горизонту, оскільки при цьому знижується динамічний вплив струменя на зрошувану поверхню, що сприяє утворенню стабільної плівки і перешкоджає її руйнуванню.

Таким чином, механізм дії добавок ПАР до води при гасінні полум'я горючих рідин полягає у зниженні інтенсивності випаровування горючої рідини, збільшенні проникаючої здатності розпиленого струменя в полум'я, зміні ступеня дисперсності крапель як у газовій фазі, так і в об'ємі горючої рідини ("внесок" цього ефекту у вогнегасну здатність розчину в газовій фазі в 3-7 раз нижче, ніж у рідкій фазі).

Аналізуючи результати гасіння різних за характером пожеж із використанням розчинів ПАР, можна зазначити, що у всіх випадках різко скорочується час гасіння, інтенсивність подачі вогнегасного засобу, зменшуються збитки від пожеж. Як правило при використанні змочувачів інтенсивність подачі водних розчинів коливається від 0,01 до 0,06 л·м⁻²·с⁻¹. Враховуючи високу змочувальну здатність розчинів ПАР, для їх подачі необхідно використовувати тільки прогумовані рукава.

Розчини ПАР можна використовувати також для захисту від займання твердих горючих матеріалів, особливо волокнистих, сипучих і пористих, обробляючи їх розпиленими струменями розчину.

Як недолік потрібно зазначити, що введення добавок іоногенних ПАР викликає корозію пожежного обладнання.

2.2 Підвищення вогнегасної ефективності води при використанні згущувачів

Як уже було сказано, крім великого поверхневого натягу, вода має незначну в'язкість, що негативно позначається на її

вогнегасній здатності. При гасінні лісових пожеж, пожеж у приміщеннях (на вертикальних або горизонтальних поверхнях) вода легко стікає, не затримуючись на поверхні, яка горить, і швидко випаровується, внаслідок чого вогнегасний ефект води буває невисоким.

В'язкість розчинів є характеристикою сил когезії, тобто сил взаємодії макромолекул у рідині. При підвищенні в'язкості підвищуються і сили адгезії – сили взаємодії між двома фазами. Внаслідок зростання сил когезії й адгезії швидкість стікання вогнегасної рідини з об'єкта зменшується, що повинно привести до збільшення часу контакту вогнегасного засобу з поверхнею горючої речовини і, отже, згідно (3.15), до підвищення вогнегасної здатності води.

Втрати води, пов'язані з розтіканням, можна зменшити підвищенням її в'язкості за допомогою введення згущуючих добавок. При розчиненні невеликої кількості полімерів в'язкість розчинів підвищується на 2-3 порядки, при цьому величина в'язкості залежить не тільки від природи полімеру, але й від його молекулярної маси. Ця залежність описується полуміричним рівнянням Марк-Куна-Хаувинка [60]:

$$[\eta] = K\mu^{\alpha}, \quad (3.17)$$

де μ – молекулярна маса полімеру;

K, α – константи, що визначаються природою полімеру;

$[\eta]$ – характеристична в'язкість розчинів полімерів.

У роботі [61] встановлено, що підвищення динамічної в'язкості водного розчину до $1,0 \div 1,5 \text{ Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$ дозволяє скоротити час гасіння приблизно в 5 разів.

Найкращими добавками в якості згущувачів є альгінат натрію, натрій карбоксиметилцелюлоза (Na-КМЦ), поліакрилова кислота (ПАК), поліоксиетилен (поліокс), карбамідоформальдегідна смола (КФС), метилцелюлоза, полісилікат

натрію, поліакриламід (ПАА), полівінілпіролідон (ПВП) і полівініловий спирт (ПВС).

Для оцінки вогнегасної ефективності розчинів "в'язкої" води використовували установку, показану на рис. 3.6. Зміна часу гасіння від в'язкості розчинів деяких добавок представлено на рис. 3.11.

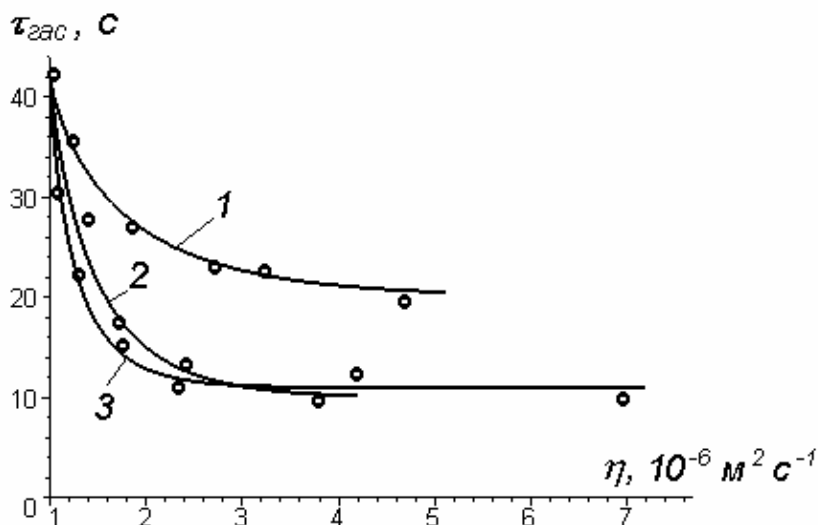


Рис. 3.11 - Залежність часу гасіння від в'язкості розчинів
1 – натрієва сіль поліакрилової кислоти; 2 – метилцелюлоза;
3 – натрій карбоксиметилцелюлоза

У роботі [62] досліджувалася залежність в'язкості та вогнегасної здатності водних розчинів деяких полімерів у залежності від їхньої концентрації. Вогнегасна ефективність розчинів оцінювалася за часом гасіння зразка компактного струменя з постійною інтенсивністю і за коефіцієнтом K_2 , відповідно до формули (3.16). Дані експериментальних досліджень зведені до табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Час гасіння модельного осередку 1А і коефіцієнт підвищення вогнегасної ефективності при розчиненні у воді згущувачів

Згущувач	Концентрація згущувача в розчині, %	В'язкість розчину η , $10^6 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	Час гасіння τ , с	Коефіцієнт підвищення вогнегасної ефективності $K_2 = \frac{\tau_{2,\text{вод}}}{\tau_{2,\text{розч}}}$
На-КМЦ	1,0	1,8	50	1,32
	2,0	5,7	46	1,43
	2,5	8,0	49	1,35
	4,5	45	59	1,12
	8,0	190	72	0,92
	10,0	270	103	0,64
Метилцелюлоза	0,125	1,7	35	1,89
	0,5	2,8	31	2,13
	0,75	3,4	35	1,89
	1,0	6,5	37	1,78
ПАК	2,0	2,0	45	1,47
	4,0	3,1	68	0,97
	7,0	4,8	81	0,81
Поліокс	0,125	2,4	69	0,96
	0,25	3,7	58	1,14
	0,5	13	93	0,71
Полісилікат	1,5	2,04	35	1,89
	7,5	6,8	55	1,2

Вогнегасна здатність води при розчиненні згущувачів зростає, причому ефективність гасіння доходить до певного значення, а потім убыває, – це свідчить про наявність оптимальної в'язкості для підвищення вогнегасної здатності води. Найбільший вогнегасний ефект досягається при збільшенні в'язкості всього лише до $(2-3) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Таке збільшення в'язкості сприяє прилипанню досить тонкого шару води до твердого матеріалу й утриманню цього шару на поверхні. Крім охо-

лоджуючої дії (зниження температури поверхневого шару речовини, що горить), плівка "в'язкої" води чинить додаткову ізолюючу й екрануючу дію. Погіршення вогнегасної ефективності розчину при подальшому підвищенні в'язкості пов'язано з тим, що велика частина розчину залишається у верхніх шарах горючого завантаження, тоді як нижні шари продовжують горіти.

Численні натурні досліди показали, що 0,05% розчин натрій карбоксиметилцелюлози забезпечує істотне скорочення витрати води на пожежогасіння. Якщо при гасінні звичайною водою її витрата становить $40 \div 400 \text{ л м}^{-2}$, то при використанні "в'язкої" води з 0,05% Na-КМЦ витрата зменшується в 5 – 8 разів (від 5 до $85 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2}$). Середній збиток від пожежі (у тому числі внаслідок впливу води на матеріали) знижується на 20%. Негативного впливу на роботу пожежної техніки й матеріали, що гасяться, а також повторних загорянь матеріалів при застосуванні розчину Na-КМЦ не спостерігалось.

Підвищену вогнегасну ефективність мають розчини таких полімерних добавок, які не тільки згущують, але здатні при підвищенні температури до гелеутворення або утворення на поверхні горючої речовини негорючого покриття, яке, в свою чергу, виконує ще й вогнезахисну функцію. При змішуванні з водою гелеутворюючі добавки набухають, поглинаючи при цьому значну кількість води, випаровування сповільнюється, в'язкість розчину зростає, що позитивним чином впливає на його вогнегасну здатність. Завдяки введенню подібних добавок, водний розчин добре прилипає до вертикальних поверхонь та утримується у вигляді плівки товщиною не менше за 10^{-3} м . Теплова енергія абсорбується водною плівкою, вода переходить у пару, яка видаляється через зовнішню поверхню плівки. Через 0,5 с після контакту розчину з поверхнею, що горить, відбувається гелеутворення. Однак в'язкість розчину повинна бути такою, щоб забезпечити можливість його транспортування до осередку пожежі по трубопроводах і шлангах.

Вогнегасна ефективність розчинів гелеутворюючих добавок залежить від в'язкості, структури й міцності гелю, що утворюється, які в свою чергу визначаються властивостями гелеутворювача та його концентрацією, характером поверхні горючої речовини й розміром осередку горіння. В середньому застосування розчинів гелеутворюючих добавок підвищує вогнегасну ефективність води в 1,5-2 рази.

Найбільш широко для гасіння в якості гелеутворювачів використовуються полісилікат натрію, поліакриламід і метилцелюлоза. Так, при гасінні розчинами полісилікату, крім підвищення в'язкості, відбувається утворення негорючого покриття SiO_2 на поверхні речовин, що горять.

Підвищена вогнегасна здатність розчинів метилцелюлози обумовлена впливом двох чинників. По-перше, будова метилцелюлози найбільш близько повторює будову клітковини деревини, тому сили адгезії й когезії повинні бути максимально близькі, що сприяє утриманню розчину на дерев'яних конструкціях, які горять. По-друге, при підвищенні температури відбувається гелеутворення розчину метилцелюлози, при цьому з більш гарячої поверхні розчин стікає повільніше, ніж із холодної. Треба зазначити, що при повторному запалюванні покриття, яке утворилося в процесі гасіння, перешкоджає запаленню оброблених горючих речовин.

Для підвищення вогнегасної ефективності до гелеутворюючих складів додають солі, наприклад, хлорид натрію, карбонат амонію, бікарбонат калію [6]. Так товщина гелевого покриття, що утворюється на вертикальній поверхні при гасінні розчином полісилікату натрію та бікарбонату калію, може досягати $2,5 \cdot 10^{-3}$ м у залежності від температури горіння.

Натурні досліди з гасіння лісових пожеж водою з добавками таких згущувачів, як діамонійфосфат $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ і амонійфосфат $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ [63, 64] показали, що завдяки цим добавкам вода прилипає до рослин і віднімає більше тепла, ніж звичайна вода. Як недолік такого гасіння можна відмітити погану здатність до розпилення вогнегасного засобу.

Якщо зіставити вогнегасні та вогнезахисні властивості досліджених полімерів, то можна сказати, що полімери, які мають високі вогнезахисні властивості, мають також більш високу вогнегасну здатність.

При гасінні пожеж значної площі потрібна підвищена витрата води і можливість подачі її на великі відстані. При цьому актуальною стає задача подачі великої кількості води без зміни діаметра напірних труб та рукавів і робочого тиску в гідравлічних системах. Для вирішення цієї задачі на стінки трубопроводів наносять спеціальні покриття, що зменшують коефіцієнт гідравлічного опору й турбулентність потоку в трубах. Ця задача може бути також вирішена за рахунок введення у воду спеціальних гідродинамічно активних полімерних композицій [65, 66]. В якості згущувачів використовуються деякі високомолекулярні сполуки, що являють собою зшиті поліелектроліти, наприклад, поліетиленоксид, рідкосшиті сополімери акрилових кислот і поліфункціональних зшиваючих агентів, поліакрилат натрію [67, 68].

Особливий інтерес з точки зору пожежної охорони ці сполуки являють собою з декількох причин.

По-перше, малі їх концентрації (порядку 0,5-1%) підвищують в'язкість води в сотні й навіть у тисячі разів. Так, коефіцієнт динамічної в'язкості водного розчину, який містить 2% поліакрилату натрію, при 20°C становить приблизно 3000 МПа·с. Причиною високої згущуючої здатності таких полімерів є специфічна особливість їх будови. Основним компонентом є полікислоти, які у воді не розчинні, але при введенні в полярні рідини відбувається сильне набухання цих сполук, полімер набухає до повної своєї абсорбційної здатності й поглинає при цьому до 100 величин власної ваги води. Це приводить до виключно високого ефекту згущення.

По-друге, в'язкість цих розчинів значно менше знижується під дією високих температур, що особливо важливо в умовах гасіння пожежі твердих горючих матеріалів. Так при підвищенні температури розчину до 70–80°C в'язкість знизиться

усього на 10% від первинної в'язкості при 20°C, в той же час в'язкість розчину Na-КМЦ при такому підвищенні температури знижується приблизно в 3 – 4 рази.

По-третє, розчини згущувачів подібного роду мають змінну в'язкість, в залежності від величини градієнта швидкості. Так, при русенні розчинів по трубах зі швидкістю 5–10 м·с⁻¹ їх в'язкість буде на 1–2 порядки нижче, ніж у вільному спокійному стані на поверхні твердих горючих матеріалів, де значення в'язкості повинно бути максимально можливим.

Зменшення опору при русенні води в трубопроводах при додаванні малих концентрацій високомолекулярних полімерів відбувається за рахунок того, що молекули полімеру, які сильно розбухають у воді, мають ниткоподібну будову і під дією потоку рідини витягуються вздовж потоку (*ефект Томаса*). Макромолекули, у свою чергу, орієнтують молекули води вздовж стінок труб, завдяки чому знижується інтенсивність турбулентних пульсацій у пристінному шарі, зменшується турбулентне тертя, знижуються гідравлічні втрати в трубопроводах, що веде до збільшення витрат рідини через них. Вода з добавками подібних речовин отримала назву "*слизька*" вода. Сформовані в насадках струмені відрізняються підвищеними компактністю й далекобійністю. Так, при добавці 1 г окислу поліетилену до 1 м³ води опір у промислових трубопроводах знижується на 50 – 80%, а в'язкість змінюється настільки, що довжина струменя збільшується від 36 до 54 м. При концентраціях поліакриламід у водних розчинах порядку сотих часток відсотка (від 0,005 до 0,015%) можна знизити гідравлічний опір більш ніж у три рази.

Зниження втрат тиску в пожежних рукавах і трубопроводах і збільшення дальності польоту струменя при збереженні заданого початкового тиску – актуальна проблема, рішення якої дозволить знизити вагу і підвищити ефективність пожежно-технічного озброєння, спростити його обслуговування. Застосування полімерних добавок дозволяє подавати до місця

пожежі більшу кількість води, скорочуючи час гасіння, а, отже, зменшуючи збитки, що заподіюються вогнем. Тому перспективи застосування цих згущувачів для гасіння найбільш складних пожеж твердих горючих матеріалів типу деревини, гуми, синтетичного й натурального каучуку дуже великі.

Однак, незважаючи на очевидні переваги, застосування мікродобавок поліетиленоксиду (ПЕО), поліакрилату натрію (Na-ПА) або поліакриламідів (ПАА) стримується складністю приготування з них однорідних розчинів необхідних концентрацій. Спроби використати ці полімери у вигляді порошків, що випускаються промисловістю, або заздалегідь приготовлених розчинів виявилися малоефективними. У зв'язку з цим інтенсивно ведуться роботи зі створення швидкорозчинних полімерних композицій, розробки технологічного обладнання для подачі, розчинення і дозованого введення гідродинамічно активних речовин у трубопроводи [69]. У пожежній техніці можна застосовувати рідкі, пастоподібні і тверді водорозчинні полімерні композиції (РВПК, ПВПК, ТВПК). Для стаціонарних систем пожежогасіння краще використовувати РВПК і ПВПК, а для мобільних — ТВПК. Для дозованого введення в трубопровід РВПК і ПВПК необхідно використовувати спеціальний пристрій. Застосування ТВПК не вимагає спеціального обладнання, оскільки приготування розчину відбувається при розмиванні потоком води твердої композиції, заздалегідь нанесеної на армуючу вставку, яка встановлюється в проточну касету. Установлено, що застосування однієї проточної касети з ТВПК із поліетиленоксиду з молекулярною масою $4,8 \cdot 10^6$ а. о. призводить до збільшення витрати вогнегасної рідини по рукавній лінії майже на 40% і збільшенню дальності струменя на 30%, при цьому втрати тиску в рукавній лінії знизилися на 17%.

Потрібно зазначити, що всі органічні синтетичні полімерні згущувачі мають досить високу вартість. Існують розробки, в яких у якості згущувача пропонуються відносно дешеві колоїдні сорти глини: атапульгіт, каолін, бентоніт [70, 71]. Від

виду і кількості цих компонентів, а також способу подачі вогнегасного складу залежить кінцева в'язкість суспензії.

При гасінні складів лісопиломатеріалів ефективними є водні розчини бішофіту та бентоніту. Вони у два рази перевищують за своєю ефективністю воду. Середні значення інтенсивності подачі вогнегасних засобів становлять: 8% розчин бішофіту – $0,062 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, 15% розчин бентоніту – $0,055 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Одним з істотних недоліків бентонітових розчинів є те, що порошок глини випадає в осадок.

В якості стабілізаторів в'язкості до розчинів згущувачів додають 5 -10% хлориду кадмію або сульфату марганцю [6].

2.3 Підвищення вогнегасної ефективності води при використанні низькомолекулярних сполук

Підвищити вогнегасну ефективність води можна при введенні різних низькомолекулярних добавок. Усі низькомолекулярні добавки умовно можна поділити на дві великі групи: органічні водонерозчинні речовини, які в суміші з водою утворюють емульсії, та неорганічні (солі, кислоти та ін.).

В якості органічних домішок використовують пропеленти – низькокиплячі рідини, температура кипіння яких менша, ніж температура кипіння води при атмосферному тиску. При потраплянні в зону горіння емульсії таких органічних речовин у воді відбувається перегрів добавки, що приводить до вибухового пароутворення пропеленту та дроблення краплі водної емульсії. Це сприяє більш інтенсивному випаровуванню "осколків" краплі вогнегасного засобу, а, отже, інтенсивному охолодженню парогазової фази й зриву полум'я. Іншими словами, ефект емульгування впливає на гасіння в газовій фазі.

Якість виготовлення емульсії впливає на її вогнегасну ефективність. Найбільшу ефективність мають емульсії, виготовлені ультразвуковим методом. Для таких емульсій є характерними рівномірність та монодисперсність включень

(крапель пропеленту у воді) та зменшення їх розмірів. Крім того, для підвищення ступеню дисперсності добавки у водному розчині і більш рівному її розподілу по об'єму емульсії, а, отже, покращення розпилювання вогнегасного засобу, застосовують додаткове введення емульгатора (до 2%), в якості якого використовують піноутворювач.

Так при гасінні гептану водноброметиловою емульсією [72] спостерігалось зниження часу гасіння і, згідно (3.16), збільшення коефіцієнта вогнегасної ефективності K_1 .

Збільшення концентрації брометилу (з 2 до 10%) забезпечує більш високу ефективність гасіння, спричиняє істотне зниження мінімального значення часу гасіння з 25 до 3 с, знижує критичну інтенсивність подачі, при цьому підвищує коефіцієнт ефективності K_1 з 1,2 до 2,3. Виявлена перевага емульсій є результатом двох ефектів – інтенсивне охолодження зони горіння за рахунок збільшення дисперсності вогнегасного засобу та інгібування парогазової фази парами брометилу. Таким чином, якщо для емульсії із вмістом брометилу 2% підвищення ефективності гасіння емульсією є наслідком ефекту дроблення крапель водного розчину, то для емульсії із вмістом 10% брометилу виявляється й починає домінувати інгібуючий ефект.

Неорганічні добавки за домінуючим впливом на підвищення вогнегасної ефективності водних розчинів умовно можна поділити на антипірени та солі, які інгібують полум'яну фазу горіння.

При гасінні деревини ефективним є застосування водних розчинів антипіренів. Найбільш широко в якості антипіренів використовується хлорид магнію $MgCl_2$, фосфорна кислота H_3PO_4 , та її солі – діамонійфосфат $(NH_4)_2HPO_4$ і амонійфосфат $NH_4H_2PO_4$.

При гасінні водними розчинами антипіренів важливим є їх здатність при нагріванні вступати в хімічну реакцію з целюлозовмісними матеріалами або утворювати на поверхні горючої речовини захисні плівки. При цьому спостерігається велике зростання коефіцієнта вогнегасної здатності K_2 (зменшується

час повного гасіння), в порівнянні з коефіцієнтом K_1 (припинення полум'яного горіння). Час гасіння полум'яної фази й час повного гасіння виявляються приблизно рівними. Така зміна коефіцієнтів, а також закінчення гасіння деревини одночасно із згасанням полум'я свідчить про важливий внесок у гасіння деревини процесів, пов'язаних із зміною реакції піролізу. Поліпшення гасіння деревини пов'язано з гідролітичним розкладанням целюлозовмісних матеріалів, при якому підвищується вихід карбонізованого залишку, води та знижується кількість горючих газів піролізу.

При зміні концентрації нелеткої кислоти H_3PO_4 в розчині від 1,5 до 15% спостерігається зменшення часу гасіння, причому коефіцієнт K_2 (повне гасіння) вище, ніж коефіцієнт K_1 (гасіння полум'яної фази). При застосуванні 10% концентрації H_3PO_4 час повного гасіння співпадає з часом гасіння полум'я (див. табл. 3.6).

Аналогічно фосфорній кислоті діють її солі, що виділяють кислоту при гідролізі. При гасінні деревини розчинами фосфату амонію час повного гасіння й гасіння полум'я співпадають (див. табл. 3.6). Це пов'язано з синергетичним внеском у дію фосфоровмісних речовин атомів азоту через утворення при термоокислювальному розкладанні речовин, які є більш ефективними каталізаторами термічної дегідратації целюлози (при цьому зменшується теплота піролізу деревини та каталізується процес коксування).

При гасінні розчинами $MgCl_2$ (концентрація змінювалася від 2,5 до 20%) зменшується час гасіння полум'яної фази й час повного гасіння. Коефіцієнт підвищення вогнегасної здатності K_1 менше коефіцієнта для повного гасіння K_2 (див. табл. 3.6), що вказує на основний внесок в гасіння ефекту хімічної взаємодії з деревиною продуктів гідролізу хлориду магнію. У той же час не треба повністю виключати внесок у гасіння ефекту інгібування солями в полум'яній фазі. Так час гасіння полум'яної фази розчином H_3PO_4 більше, ніж у хлориду магнію, що

підтверджує додатковий внесок в гасіння інгібіруючої дії $MgCl_2$.

Таблиця 3.6 – Час гасіння модельного осередку **1А** і коефіцієнт підвищення вогнегасної ефективності водних розчинів хлориду магнію, ортофосфорної кислоти та фосфату амонію

Речовина	Концентрація добавки в розчині, %	Час гасіння τ , с		Коефіцієнт підвищення вогнегасної ефективності	
		гасіння полум'я	повне гасіння	K_1	K_2
вода	–	185	270	–	–
$MgCl_2$	2,5	165	235	1,12	1,15
	5,0	150	200	1,23	1,35
	10	140	190	1,32	1,42
	15	134	134	1,38	2,01
	20	87	87	2,13	3,1
H_3PO_4	1,5	175	245	1,06	1,10
	5	175	240	1,06	1,13
	10	165	165	1,12	1,64
	15	165	165	1,12	1,64
$NH_4H_2PO_4$	5	170	170	1,09	1,59
	10	155	155	1,19	1,74
	15	105	105	1,76	2,57
	20	90	90	2,06	3,0

Дифузійне горіння газів, що виділяються з деревини при піролізі, може бути припинено за рахунок гальмування реакції горіння за допомогою введених у воду хімічно активних інгібіторів. У якості інгібіторів можуть виступати галогеніди лужних металів, азотовмісні речовини (аміни, сечовина) та їх солі.

На прикладі галогенів лужних металів можна в "чистому" вигляді спостерігати інгібіруючу дію солі, оскільки в даному випадку відсутня її хімічна взаємодія з деревиною.

<u>РОЗДІЛ 2. Вплив хімічних добавок на вогнегасну ефективність води</u>	132
<u>2.1 Підвищення вогнегасної ефективності води при використанні змочувачів</u>	136
<u>2.2 Підвищення вогнегасної ефективності води при використанні згущувачів</u>	148
<u>2.3 Підвищення вогнегасної ефективності води при використанні низькомолекулярних сполук</u>	157

Добавки хлориду натрію в концентрації від 5 до 25% до води зменшують час гасіння деревини неоднаково для кожної стадії гасіння. Для полум'яної стадії коефіцієнт вогнегасної ефективності K_1 майже для всіх концентрацій хлориду натрію більше, ніж коефіцієнт повного гасіння K_2 (див. табл. 3.7). Це пов'язано зі здатністю галогенів лужних металів гасити полум'яну фазу горіння і мало впливати на фазу тління.

Таблиця 3.7 – Параметри гасіння модельного осередку 1А водою з добавками хлориду натрію

Речовина	Концентрація добавки в розчині, %	Час гасіння τ , с		Коефіцієнт підвищення вогнегасної ефективності	
		гасіння полум'я	повне гасіння	K_1	K_2
вода	—	185	270	—	—
NaCl	5,0	165	265	1,12	1,02
	10	125	210	1,48	1,29
	15	125	197	1,48	1,37
	20	115	180	1,61	1,5
	25	101	150	1,83	1,8

Це видно так само зі збільшення часу гасіння вугілля для 5% хлориду натрію, коли при близькому часі повного гасіння

для розчину і води зменшується час гасіння полум'я. При гасінні розчином солі більшої концентрації висота полум'я швидко зменшується, що вказує на інгібування горіння хлоридом натрію, який виділився з води при проходженні краплями полум'яної фази. Подальше інгібування проходить за рахунок солей, що випарувалися з поверхні деревини.

При гасінні пожежі нафтопродуктів у резервуарі діаметром 1 м водним розчином 5% карбонату натрію або бікарбонату калію гасіння досягалось за 8 – 10 с, в той час як при подачі чистої води успішного гасіння не спостерігалось.

Таким чином, підвищення вогнегасної ефективності води за рахунок добавок солей пояснюється тим, що при проходженні крапель через зону горіння починається випаровування розчинів солей, в полум'я виділяється вільна сіль. Під її дією відбувається інгібування радикалів, що відповідають за підтримку процесу горіння, ланцюгова реакція обривається, горіння припиняється.

2.4 Добавки проти замерзання

До недоліків води, що обмежують область і умови її застосування як вогнегасного засобу, відноситься порівняно висока температура замерзання. Для пониження температури замерзання застосовують спеціальні добавки – антифризи. Як добавки частіше за все використовуються неорганічні солі (поташ K_2CO_3 , хлористий магній $MgCl_2$, хлористий кальцій $CaCl_2$) або органічні речовини, наприклад спирти, похідні гліцерину CH_2OHCH_2OH .

Зниження температури замерзання води залежить від кількості введеної речовини. Евтектичну точку (саму низьку температуру замерзання) водногліцеринові розчини мають при вмісті 60% спирту. При більш високому вмісті спирту температура замерзання знову підвищується.

При добавці гліколей потрібно враховувати, що через їх горючість неможливо застосовувати розчини з концентрацією більше за 30%. У табл. 3.8 приведені результати дослідів по га-

сінню пожеж штабелю деревини морозостійким розчином, що містить спирт.

Таблиця 3.8 – Залежність ефективності гасіння від вмісту гліцерину в морозостійкому розчині

Вміст спирту, %	Температура замерзання розчину, °C	Час гасіння, с
0	0	15
10	– 4	25
20	– 9	35
30	– 16	55
40	– 25	Не гасить
60	– 49	Не гасить

Зниження температури замерзання при добавці солей відбувається таким чином. При додаванні невеликої кількості якої-небудь нелеткої речовини знижується концентрація молекул розчинника в суміші, отже, зменшується число молекул розчинника, що переходить у газоподібний стан із поверхні рідини в одиницю часу. Тиск насиченої пари над розчином завжди менше, ніж над чистим розчинником. Чим більше концентрація розчину, тобто чим менше молекул розчинника міститься в одиниці об'єму, тим менший тиск насиченої пари. Таким чином, за рахунок розчинення солі число молекул води у поверхні рідини стає меншим, завдяки чому зменшується пружність пари.

На малюнку 3.7 представлена фазова діаграма води, яка доповнена кривою $O'C'$, що характеризує тиск пари води над розчином нелеткої речовини. Крива пружності пари розчину розташована нижче кривої пружності пари чистої води.

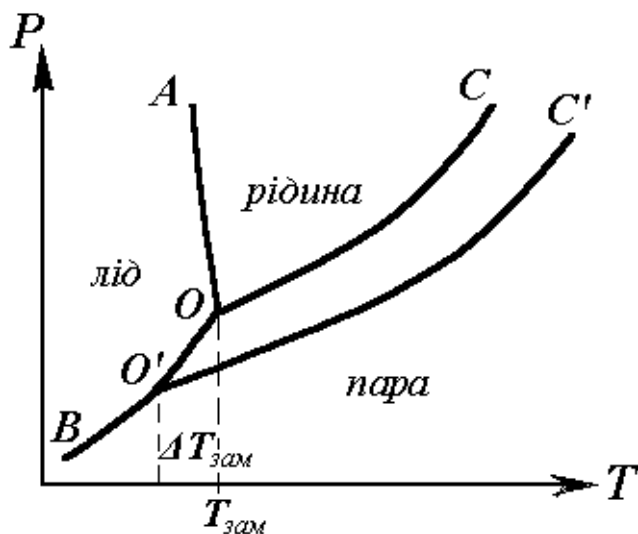


Рис. 3.7 – Зниження температури замерзання води при розчиненні в ній нелеткої солі

З графіка видно, що пружність пари води зменшується, що приводить до зниження температури замерзання та підвищенню температури кипіння. Величина зниження точки замерзання й підвищення точки кипіння пропорційна числу молей розчиненої недисоціюємої у воді речовини (закон Рауля).

Якщо розчинити 1 моль недисоціюємої солі в 1 кг води, температура замерзання води знизиться на $1,86^{\circ}\text{C}$. Для зниження температури замерзання на 30°C знадобиться, отже, $30:1,86 = 16$ молів недисоціюємої солі. Для дисоціюємих солей (поташу, хлористого магнію і т. п.) цей розрахунок непридатний. Необхідна кількість солі в цих випадках визначається емпірично.

Однак мінеральні солі підвищують корозійну здатність води, тому в ручних вогнегасниках хлористий магній і хлористий кальцій як морозостійкі добавки не використовують.

Таким чином, антифризи, що використовуються як добавки у воду проти замерзання, впливають великим чином на підвищення ефекту гасіння.

2.5 Використання композицій різних добавок

Великий вогнегасний ефект може бути досягнутий при використанні композицій різних добавок. Розчини композицій мають властивості, що відрізняють від властивостей розчинів індивідуальних речовин. Так, розчини композицій полімерів із змочувачем мають одночасно високу в'язкість, досить високу змочувальну здатність і низький поверхневий натяг.

Було проведено ряд робіт, в яких досліджувалися вогнегасні властивості композицій різних добавок, що включають високомолекулярні сполуки (згущувачі), змочувач і антипірен.

Для підвищення вогнегасної ефективності в гелеутворюючі склади вводять вогнегасні солі (наприклад, хлорид натрію, карбонат амоній, бікарбонат лужного металу, кислий фосфат лужного металу або їх суміші). Багато які склади містять також поверхнево-активні речовини.

У склад для пониження точки замерзання додається 0,5–3% суміші, що складається з 60–80% ізопропілового спирту і 15–20% етиленгліколю, або 1% хлориду натрію й калію.

Для підвищення вогнегасних і вогнезахисних властивостей води в ряді робіт пропонувалося вводити згущуючі добавки, в тому числі високомолекулярні сполуки, а також низькомолекулярні добавки.

Вогнегасні властивості розчинів композицій визначали за часом гасіння штабеля деревини компактным струменем із постійною інтенсивністю.

У якості згущувачів використали натрієву сіль карбоксиметилцелюлози та поліакрилову кислоту, як змочувач - піноутворювач ПО-6К, у якості антипірену – однозаміщений фосфат амоній ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$).

Добавка змочувача до розчину карбоксиметилцелюлози підвищує його вогнегасну здатність у порівнянні з водою в 1,6

рази. Додання до розчинів сполук антипірену, що викликає гідролітичне розкладання деревини, збільшує вогнегасну здатність води в 2,4 рази. Потрійна ж композиція підвищує вогнегасну здатність в 3,5 рази.

При використанні композицій, які містять у якості згущувача поліакрилову кислоту (ПАК) та антипірен, додання змочувача не впливає на їх вогнегасну здатність. До деякого підвищення вогнегасної здатності розчинів ПАК проводить добавка сечовини, що грає роль інгібітору горіння.

Особливий інтерес представляють вогнезахисні властивості розчинів досліджених композицій. Подвійні композиції "полімер – антипірен" або "полімер – змочувач" по вогнезахисним властивостям мало відрізняються від розчинів полімерів, тоді як при використанні потрійної композиції "антипірен – згущувач – змочувач" зразки втрачають здібність до запалення. Пов'язане це з тим, що при обробці деревини потрійною композицією антипірен внаслідок високої в'язкості розчину довше контактує з деревиною, а змочувач сприяє більш швидкому й повному проникненню антипірену в деревину. Обидва чинники, діючи спільно, підвищують ефективність вогнезахисної дії розчину.

Для захисту від корозії пожежного устаткування звичайно застосовують неорганічні сполуки (кислі фосфати, карбонати, силікати лужних металів, окислювачі типу хромату натрію або калію, нітриту натрію), які утворюють на металевій поверхні захисний шар, або органічні сполуки (аліфатичні аміни й інші речовини), здатні абсорбувати кисень, розчинений у воді. Найбільш ефективним інгібітором корозії є хромат натрію, але він є токсичним, тому в більшості випадків використовують полімерні покриття.

Таким чином, значне підвищення ефективності використання води при гасінні пожеж може буде досягнуто в результаті комплексного дослідження технічних та теоретичних проблем. До них слід віднести розробку пристроїв, які розпилюють і забезпечують рівномірний розподіл води по площі

горіння при заданому ступеню дисперсності, визначення оптимальної дисперсності води для кожної характерної групи речовин і матеріалів, вибір відповідного типу домішки до води (змочувач, згущувач, інгібітор, антипірен або їх композиція), визначення оптимальних концентрацій цих домішок і способу їх введення в струмінь розпиленої рідини, розробка тактичних заходів оптимального застосування струменю розпиленої води, визначення нормативних показників для проектування систем пожежогасіння водою та водними розчинами.

Контрольні питання

1. Від яких факторів залежить вогнегасна ефективність води? Назвіть основні методи підвищення вогнегасної ефективності води.
2. Розкрити механізм розпаду рідинних плівок та струменів. Які існують способи та пристрої розпилення рідини?
3. Розкрити вплив розміру крапель на вогнегасну ефективність води.
4. Розкрити механізм підвищення вогнегасної ефективності води при використанні змочувачів.
5. Розкрити механізм підвищення вогнегасної ефективності води при використанні згущувачів.
6. Розкрити механізм підвищення вогнегасної ефективності води при використанні пропелентів.
7. Розкрити механізм підвищення вогнегасної ефективності води при використанні антипіренів.
8. Розкрити механізм підвищення вогнегасної ефективності води при використанні композиції різних добавок.

ГЛАВА 4. ЗАСТОСУВАННЯ ВОДИ ДЛЯ СТВОРЕННЯ УМОВ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ

Як вже було сказано, воду використовують не тільки для гасіння пожеж, але й в установках, призначених для створення умов пожежної безпеки. Феноменальні властивості води (значна теплоємність і висока теплота випаровування) забезпечують не тільки ефективне гасіння об'єктів, що горять, але також й ефективний захист (за рахунок охолодження) об'єктів, розташованих поблизу осередку горіння, що дозволяє запобігти руйнуванню, вибуху й загорянню останніх.

Основними напрямками такого використання води є:

- обмеження теплового випромінювання полум'я пожежі, зниження температури нагрітих газів, захист пожежонебезпечного технологічного устаткування, а також створення безпечних умов при проведенні аварійно-рятувальних робіт. При цьому використовують водяні, парові й аеродисперсні завіси, захисна дія яких базується на поглинанні і розсіюванні енергії теплового випромінювання полум'я пожежі.

- зрошування несучих будівельних конструкцій пожежонебезпечних технологічних установок за допомогою краплинних водяних струменів, які поглинають тепло, що сприймається конструкцією під час пожежі. Це дозволяє зберегти пожежну безпеку установки в умовах пожежі.

Розглянемо ці питання докладніше.

Розділ 1. Застосування водяних завіс для обмеження теплового випромінювання та зниження температури нагрітих газів

Одним із способів захисту пожежонебезпечного обладнання, горючих матеріалів, будівельних конструкцій від теплового випромінювання осередку пожежі, а також для створення безпечних умов для особового складу та пожежної техніки при проведенні аварійно-рятувальних робіт на пожежах є встановлення захисних екранів (завіс). За принципом дії вони поділяються на *відбивні* й *поглинальні*. Відповідно до назви, ослаблення потоку теплового випромінювання здійснюється першими – за рахунок відбиття, а другими – за рахунок поглинання або розсіювання теплового потоку. У пожежній практиці вода використовується для створення поглинальних екранів.

Ефективність водяних завіс значною мірою залежить від витрати води, якості розпилення води на краплі й умов теплообміну. Витрати води для створення водяних завіс, що запобігають небезпеці теплового випромінювання полум'я або знижують температуру нагрітих газів, розраховують у залежності від ряду факторів, що характеризують тепловий вплив пожежі, закономірності поширення тепла (конвекцією, випромінюванням або теплопровідністю) і вимоги, що обумовлюють пожежну безпеку об'єкта, що захищається, наприклад, допустима інтенсивність теплового випромінювання, температура газів тощо. Так, в закритих об'ємах виробничих приміщень основними параметрами, що характеризують вплив пожежі, є тепло й дим, що виділяються при пожежі. Для відкритих технологічних установок найбільш небезпечним є теплове випромінювання полум'я і потік іскор.

Захисні екрани можуть реалізовуватися або у виді суцільних водяних плівок, що стікають по поверхні сітки, або у виді завіс із крапель розпиленої води.

1.1 Суцільні водяні екрани

Інтенсивність теплового випромінювання при проходженні нескінченно малого шару повітряно-водяного середовища зменшується і залежить від фізичних властивостей захисного середовища.

У диференціальній формі це може бути записано таким чином:

$$dI = -\xi I dx,$$

де ξ – коефіцієнт ослаблення теплового випромінювання, який залежить від фізичних властивостей середовища.

Знак мінус у виразі вказує на зменшення інтенсивності при віддаленні від джерела випромінювання. Після розділення перемінних і інтегрування цього рівняння в межах від $x = 0$ до $x = r$ та від $I_x = I_0$ до $I_x = I$ знаходимо величину інтенсивності теплового випромінювання через шар повітряно-водяного середовища:

$$I = I_0 e^{-\xi r},$$

де I_0, I – інтенсивності теплового випромінювання відповідно полум'я і в точці, що розглядається, Вт/м²;

r – відстань від осі полум'я до точки.

Значення коефіцієнта ξ для різних захисних середовищ визначається експериментально.

У разі наявності двох поглинаючих середовищ (повітря, повітряно-водяна або водо-пінна завіси) зміну інтенсивності теплового випромінювання визначають за формулою:

$$\ln \frac{I_0}{I} = \xi_0 (r_0 - r) + \xi r,$$

де ξ_0, ξ - коефіцієнти поглинання теплового випромінювання відповідно повітрям і завісою;

r_0, r – товщина шару відповідно повітря й завіси, м.

Експерименти з ослаблення радіаційного випромінювання тонкими водяними плівками показали, що тепловий потік у деяких випадках зменшується в 30 разів [73].

Одним із фізичних параметрів, що визначають взаємодію тіл із випромінюванням, є довжина хвилі випромінювання. Для оцінки характерної величини цього параметра можна скористатися законом Вина, що задає залежність положення максимуму спектральної густини випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла від температури:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{T}, \quad (4.1)$$

де $\lambda_{\max}$ – довжина хвилі випромінювання, що відповідає максимуму спектральної густини, м;

T – абсолютна температура рівноважного випромінювання, К.

У пожежній практиці джерела теплового випромінювання, від якого необхідно захищатися, мають температуру в діапазоні від 1200 до 1800 К. Таким температурам відповідають довжини хвиль випромінювання λ у діапазоні $(1,6 \div 2,4) \cdot 10^{-6}$ м.

При оцінці оптичних властивостей плівкового екрана можна вважати, що він являє собою плоскопаралельну пластину товщиною δ , що складається із суцільної води (рис. 4.1).

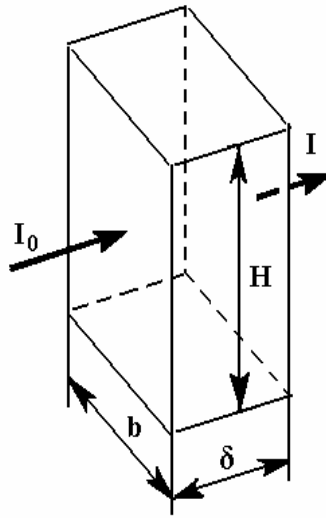


Рис. 4.1 – Схематичне зображення екрана:

b – ширина екрана; **δ** – товщина екрана; **H** – висота екрана; **I₀** і **I** – густина потоку теплового випромінювання до і після екрана відповідно

Будемо припускати, що тепловий потік падає перпендикулярно до площини такої пластини. У такому випадку захисний ефект екрана характеризується коефіцієнтом пропущення випромінювання **D** крізь подібну пластину. Коефіцієнт пропущення являє собою відношення густини потоку випромінювання, що пройшло крізь екран, до густини потоку падаючого випромінювання. Як показано в оптиці [74], у разі фіксованих значень товщини пластини і довжини хвилі випромінювання коефіцієнт пропущення дорівнює:

$$D = \left| \frac{4n \exp(i\Delta)}{(n+1)^2 - (n-1)^2 \cdot \exp(2i\Delta)} \right|^2, \quad (4.2)$$

де i – мніма одиниця;

n – комплексний показник переломлення води за даної довжини хвилі випромінювання λ , тобто

$$n = n' + i \cdot n'', \quad (4.3)$$

де n' і n'' – відповідно, дійсна й мніма частини комплексної величини n .

Потрібно відзначити, що в розглянутому інтервалі довжин хвиль виконується співвідношення:

$$n' \gg n'', \quad (4.4)$$

причому з точністю до кілька відсотків можна прийняти $n' = 1,33$.

Комплексний параметр Δ являє собою фазове зрушення, що виникає в електромагнітній хвилі в результаті проходження крізь плівку. Воно дорівнює:

$$\Delta = 2\pi n \frac{\delta}{\lambda}. \quad (4.5)$$

Суцільні водяні плівки, які створюють для захисту від випромінювання, мають товщину δ не меншу за міліметр. Це означає, що в практиці реалізується межа оптично товстих плівок, тобто виконується умова:

$$\lambda \ll \delta.$$

Ця обставина дозволяє спростити розгляд проблеми. Отже, дійсна частина параметра Δ , що звичайно зветься фазою $\Delta' = \text{Re}(\Delta)$, значно перевищує одиницю. При цьому незначна зміна товщини плівки (на величину $\sim \lambda$) призводить до

значних змін фази й разом із нею осцилюючої компоненти коефіцієнта пропусення (4.2). Через те що реальна плівка нерівномірна за товщиною, на практиці відбувається усереднення коефіцієнта пропусення D по осциляціях, зв'язаних із змінами перемінної Δ' . У результаті спостерігається ефективний коефіцієнт пропусення, який дорівнює:

$$D_{\text{ef}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} D d\Delta' = \frac{16n'^2 \cdot \exp(-2\Delta'')}{(n'+1)^4 - (n'-1)^4 \cdot \exp(-4\Delta'')}, \quad (4.6)$$

де Δ'' – мнима частина параметра Δ .

Величина Δ'' визначає ослаблення променистого потоку внаслідок поглинання електромагнітної хвилі водою плівки і дорівнює мнимій частині параметра Δ :

$$\Delta'' = \text{Im}(\Delta) = 2\pi n'' \frac{\delta}{\lambda}. \quad (4.7)$$

Аналіз формули (4.6) показує, що ефективний коефіцієнт пропусення є монотонно убутною функцією Δ'' , що із зростанням цього параметра прямує до нуля експоненціально. Максимальне значення D_{ef} досягається при $\Delta'' = 0$ і дорівнює:

$$D_{\text{max}} = \frac{2n'}{n'^2 + 1} \approx 0,96. \quad (4.8)$$

Для прояснення залежності коефіцієнта пропусення від товщини екрана введемо ефективну довжину загасання:

$$l_{\text{ef}} = \frac{\lambda}{4\pi n''}. \quad (4.9)$$

Використовуючи позначення (4.9), можна у випадку водяного екрана з точністю кілька відсотків привести формулу (4.6) до виду:

$$D_{\text{ef}} = D_{\text{max}} \cdot \exp\left(-\frac{\delta}{l_{\text{ef}}}\right). \quad (4.10)$$

Таким чином, при проходженні відстані l_{ef} у суцільній завісі променистий потік зменшується в $e = 2,7$ рази.

Величина l_{ef} є немонотонною функцією λ , що зв'язано з нетривіальним поведінням мнимої частини коефіцієнта поглинання. У залежності від довжини хвилі випромінювання в діапазоні λ від $1 \cdot 10^{-6}$ м до $10 \cdot 10^{-6}$ м параметр l_{ef} може приймати значення від 0,008 м до декількох метрів. Це, відповідно до формули (4.10), означає, що для істотного ослаблення випромінювання необхідно створювати суцільні водяні екрани з такими ж товщинами. Таке рішення в загальному випадку через значні витрати води є недоцільним.

Більш перспективним може виявитися орієнтація не на поглинальні, а на розсіювальні властивості екранів. У випадку плівок це означає створення не одного порівняно товстого екрана, а безлічі екранів із меншою сумарною товщиною. У цьому випадку (якщо не докласти спеціальних зусиль) вони будуть діяти як ряд неузгоджених розсіювачів і повний коефіцієнт пропущення системи $D_{\text{заг}}$, що складається з N таких екранів, можна буде оцінити величиною:

$$D_{\text{заг}} = D_{\text{max}}^N. \quad (4.11)$$

Незважаючи на порівняно малу відмінність D_{max} від одиниці (див. (4.8)), такий шлях може виявитися більш ефективним, ніж створення суцільного екрана. Покажемо це, оцінивши довжину загасання в системі з багатьох плівок. По-

значимо $\delta_{\text{сер}}$ і $l_{\text{сер}}$ середню товщину однієї плівки і середню відстань між сусідніми плівками відповідно. У цьому випадку на довжині x потік буде перетинати

$$N(x) = \frac{x}{l_{\text{сер}} + \delta_{\text{сер}}}$$

плівок, що, відповідно до формули (4.11), призводить до залежності коефіцієнта проходження від пройденого шляху:

$$D(x) = D_{\text{max}}^{N(x)} = \exp\left(\frac{x \ln(D_{\text{max}})}{l_{\text{сер}} + \delta_{\text{сер}}}\right).$$

Остання формула означає, що в такій системі довжина загасання дорівнює:

$$l_{\text{ef}} = \frac{l_{\text{сер}} + \delta_{\text{сер}}}{\ln(D_{\text{max}})} \approx \frac{l_{\text{сер}} + \delta_{\text{сер}}}{1 - D_{\text{max}}} . \quad (4.12)$$

З урахуванням співвідношення (4.8) оцінка величини l_{ef} , згідно з (4.12), при $(l_{\text{сер}} + \delta_{\text{сер}}) = 0,01$ м дає значення:

$$l_{\text{ef}} \approx \frac{0,01}{1 - 0,96} = 0,25 \text{ м} .$$

Це немала величина, але, в порівнянні із суцільним екраном, вона вимагає для свого створення меншої кількості води в $(l_{\text{сер}} + \delta_{\text{сер}}) / \delta_{\text{сер}}$ разів, що у разі досить малих значень середньої товщини плівок може виявитися більш доцільним.

Розвитком ідеї використання розсіювальних властивостей водяних екранів стала заміна системи плівок на систему

струмів і далі – на систему крапель. Подібне дроблення елементарних розсіювачів може виявитися більш перспективним, у зв'язку із супроводжуваними такими змінами збільшенням розсіювання в розрахунку на одиницю маси води, що подається на створення екрану. На цьому шляху зменшується витрата води, однак, виникають проблеми, пов'язані з постановкою таких екранів.

1.2 Краплинні екрани

Характерні розміри краплі, яких удасться досягти при розпиленні, перевищують кілька десятків мікронів. Таким чином, завжди можна вважати, що у випадку краплинного екрана виконується співвідношення:

$$\lambda \ll r_k, \quad (4.13)$$

де r_k – радіус краплі.

Розпилення означає, що краплі займають відносно малу частку простору. При цьому виконуються умови:

$$\rho \ll \rho_0, \quad r_k \ll l_{\text{хар}}, \quad (4.14)$$

де ρ – густина розпорошеної води, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$

ρ_0 – густина суцільної води, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

$l_{\text{хар}}$ – середня відстань між краплями води.

Спільне застосування умов (4.13) і (4.14) дозволяє розглядати розпорошену воду як систему незалежних розсіювачів. У цьому випадку питомий потік випромінювання, що пройшов крізь шар зависи, виражається формулою:

$$I(\delta) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{\delta}{l}\right), \quad (4.15)$$

де $I(\delta)$ – значення питомого теплового потоку після проходження завіси товщиною δ , Вт·м⁻²;

I_0 – значення питомого теплового потоку перед завісою при $x = 0$, Вт·м⁻²;

δ – товщина краплинного екрана, м;

l – довжина загасання, м.

Величина l визначає інтенсивність ослаблення випромінювання і знаходиться зі співвідношення:

$$l = \frac{1}{n_q \cdot \sigma}, \quad (4.16)$$

де n_q – число крапель у розрахунку на 1 м³ завіси, м⁻³;

σ – середній переріз екстинкції одиночної краплі, м².

Переріз екстинкції можна представити у виді суми двох доданків:

$$\sigma = \sigma_{\text{роз}} + \sigma_{\text{пог}}, \quad (4.17)$$

де $\sigma_{\text{роз}}$ – переріз розсіювання, враховує процес розсіювання випромінювання краплею;

$\sigma_{\text{пог}}$ – переріз поглинання, враховує поглинання випромінювання краплею.

Переріз розсіювання є немонотонною функцією параметра

$$\Delta' = 4\pi (n' - 1) \frac{r_k}{\lambda}, \quad (4.18)$$

співпадаючого з розбіжністю фази електромагнітної хвилі при проходженні діаметра частки ($2r_k$) у повітрі й у воді.

Переріз поглинання є зростаючою функцією від параметра $2\pi n'' r_k / \lambda$, аналогічного величині (4.7). При $2\pi n'' r_k / \lambda \gg 1$ (що у випадку води через малі значення величини n'' не здійснюється) переріз поглинання асимптотично наближується до свого максимального значення:

$$\sigma_{\text{пог}}^{\text{max}} = \pi r_k^2. \quad (4.19)$$

Як і $\sigma_{\text{роз}}$, переріз екстинкції є немонотонною функцією Δ' . У випадку краплинних завіс, згідно (4.13), параметр Δ' є великою величиною, при цьому навіть відносно малі варіації розмірів крапель приводять до того, що на практиці спостерігається усереднене за осциляціями значення перерізу екстинкції, яке дорівнює:

$$\sigma = 2 \pi r_k^2. \quad (4.20)$$

Оцінюючи густину числа часток формулою

$$n_{\text{ч}} = \frac{\rho}{m_{\text{ч}}}, \quad (4.21)$$

у якій величина

$$m_{\text{ч}} = \frac{4}{3} \pi r_k^3 \rho_0 \quad (4.22)$$

являє собою характерну масу краплі, можна, врахувавши формулу (4.20), привести співвідношення (4.16) до виду:

$$l = \frac{2}{3} \frac{\rho_0}{\rho} r_k. \quad (4.23)$$

Дана формула демонструє, що при створенні завіс із фіксованою густиною води ρ максимальний захисний ефект буде спостерігатися у разі мінімального (у рамках нерівності (4.13)) розміру крапель. Так, за характерного розміру краплі $r_k \approx 10^{-4}$ м і густини розпорошеної води $\rho \approx 10 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ довжина загасання не залежить від довжини хвилі випромінювання і дорівнює $l \approx 7 \cdot 10^{-3}$ м.

Знаючи довжину загасання, можна, обернувши формулу (4.15), розрахувати товщину завіси, що ослабляє променистий потік у будь-яке задане число разів K ($K = I_0/I$):

$$\delta = l \ln K. \quad (4.24)$$

Оцінимо витрату води, яку необхідно забезпечити для підтримки екрана заданих розмірів (рис. 4.1). Маса води в такому екрані виражається формулою:

$$M = \delta \cdot b \cdot H \cdot \rho. \quad (4.25)$$

Основою подальшого розрахунку є вимога балансу кількості води, яка уходить з екрана і надходить до нього за певний час. Для написання такої умови необхідно знати характерний час перебування краплі в екрані. Співвідношення (4.14) дозволяє з'ясовувати цю величину, вирішуючи динамічну задачу про рух одиночної краплі через область екрана. При цьому будемо нехтувати зміною розмірів краплі, викликану випаровуванням.

Через те що основним рухом, який приводить до вибування води з екрана, є осідання, питання зводиться до падіння одиночної сфери у в'язкому (повітряному) середовищі. Відповідне рівняння має вид:

$$m_{\text{ч}} \frac{dw}{d\tau} = f(w) + m_{\text{ч}} \cdot g, \quad (4.26)$$

де w – компонента швидкості частки в напрямку вектора прискорення вільного падіння g ;

$f(w)$ – сила гальмування, що діє з боку нерухомого середовища на сферичну частку:

$$f(w) = -6\pi\mu_{\text{пов}} r_{\text{к}} w, \quad (4.27)$$

де $\mu_{\text{пов}}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря (при 20°C $\mu_{\text{пов}} = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$).

Якщо в якості початкової умови взяти нерухомість частки в завісі (що відповідає $w(\tau) = 0$ при $\tau = 0$), то рішення рівняння (4.26) має вид:

$$w(\tau) = w_y \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_y}\right) \right], \quad (4.28)$$

де w_y – швидкість сталого руху;

τ_y – характерний час установлення стаціонарного режиму руху, який з урахуванням співвідношення (4.22) дорівнює:

$$\tau_y = \frac{m_{\text{ч}}}{6\pi\mu_{\text{пов}} r_{\text{к}}} = \frac{2}{9} \frac{\rho_0}{\mu_{\text{пов}}} r_{\text{к}}^2 = 1,2 \cdot 10^7 r_{\text{к}}^2, \text{ с.} \quad (4.29)$$

Час установлення стаціонарного режиму руху істотно залежить від розміру часток. Так, згідно (4.29), при $r_{\text{к}} \approx 10^{-4} \text{ м}$

$\tau_y = 0,12$ с, тоді як при $r_k \approx 10^{-3}$ м він становить в 100 разів більшу величину $\tau_y = 12$ с.

Швидкість сталого руху w_y тісно пов'язана з характерним часом τ_y :

$$w_y = g \cdot \tau_y = 1,2 \cdot 10^8 \text{ r}_k^2, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (4.30)$$

Якщо $r_k \approx 10^{-4}$ м, то $w_y = 1,2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. У разі зміни на порядок розміру краплини швидкість її сталого руху змінюється на два порядки.

Відстань, що пройде крапля за час τ , виражається залежністю:

$$z(\tau) = \int_0^{\tau} w(\tau') d\tau' = w_y \cdot \left\{ \tau - \tau_y \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_y}\right) \right] \right\}. \quad (4.31)$$

Звичайно висота екрана H не перевищує декількох метрів, отже, в залежності від радіуса крапель і з урахуванням (4.28) і (4.31), можна виділити два граничних варіанти проходження краплями області завіси:

- 1) рух із постійною сталою швидкістю $w(\tau) = w_y$;
- 2) вільне падіння з лінійним зростанням швидкості $w(\tau) = g \cdot \tau$.

Для визначення того, який варіант реалізується, необхідно порівняти характерний час установаження стаціонарного режиму руху τ_y із часом перетинання екрана у вільному падінні, який, у свою чергу, визначається як:

$$\tau_{в\dot{л}} = \sqrt{\frac{2H}{g}} \approx 0,45 \cdot \sqrt{H}, \text{ с}. \quad (4.32)$$

Перший варіант реалізується за умови $\tau_y \ll \tau_{\text{вкл}}$, другий – при $\tau_y \geq \tau_{\text{вкл}}$. Використовуючи формули (4.29), (4.32), останню умову можна записати через радіус крапель: перший варіант реалізується за умови $r_k \ll r_{\text{кр}}$, другий – при $r_k \geq r_{\text{кр}}$, де $r_{\text{кр}}$ – критичний радіус краплі, який можна визначити як:

$$r_{\text{кр}} = \frac{3}{2^{0,25}} \left(\frac{\mu_{\text{пов}}}{\rho_0} \right)^{0,5} \left(\frac{H}{g} \right)^{0,25} \approx 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot H^{0,25}, \text{ м.} \quad (4.33)$$

Для екрана висотою $H = 2,5$ м $\tau_{\text{вкл}} \approx 0,7$ с, а критичний радіус краплі становить $r_{\text{кр}} = 2,4 \cdot 10^{-4}$ м.

Витрата води, необхідна для підтримки завіси, істотно залежить від варіанта руху крапель. У першому випадку відносно малих крапель ($r_k \ll r_{\text{кр}}$) час осідання оцінюється формулою:

$$\tau = \frac{H}{w_y}. \quad (4.34)$$

При цьому витрата води, необхідна для підтримки одного метра фронту завіси, не залежить від висоти завіси і, відповідно до формул (4.23)-(4.25), (4.29), (4.30), дорівнює:

$$\begin{aligned} G_b &= \frac{M}{\tau b} = \delta \rho w_y = l \cdot \ln K \cdot \rho \cdot g \cdot \tau_y = \\ &= \frac{4}{27} \cdot \ln K \cdot \frac{g \rho_0^2}{\mu_{\text{пов}}} \cdot r_k^3 \approx \\ &\approx 8,1 \cdot 10^{10} \ln K \cdot r_k^3, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \end{aligned} \quad (4.35)$$

$$G_b \approx 8,1 \cdot 10^{10} \ln K \cdot r_k^3, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Для часток радіусом 10^{-4} м при ослабленні теплового потоку в **e** рази (**K** = 2,7) формула (4.35) дає $G_b = 8,2 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

У другому випадку відносно великих крапель ($r_k \geq r_{kp}$) час осідання τ практично збігається з часом вільного падіння $\tau_{в\text{іл}}$ (4.32). Відповідна питома витрата, як випливає з формул (4.23) – (4.25), (4.32), має величину:

$$G_b = \frac{M}{\tau b} = \delta \rho \frac{H}{\sqrt{\frac{2H}{g}}} = l \cdot \ln K \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{gH}{2}} =$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{3} \ln K \cdot \rho_0 \sqrt{gH} \cdot r_k \approx 1,5 \cdot 10^3 \ln K \cdot \sqrt{H} \cdot r_k, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (4.36)$$

Для часток радіусом 10^{-3} м при ослабленні теплового потоку в **e** рази для екрана висотою **H** = 2,5 м формула (4.36) дає $G_b = 2,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Формули (4.35), (4.36) є базовими при розрахунках краплинних екранів. Відповідно до них ефективність використання води в завісах зростає зі зменшенням розмірів крапель. Основними причинами цього є прямо пропорційна залежність довжини загасання **l** від радіусів крапель (див. (4.23)) і зворотна залежність часу осідання крапель від їхніх радіусів. Ефект особливо помітний у випадку досить малих крапель ($r_k \ll r_{kp}$), режим руху яких переходить від вільного падіння до рівномірного осідання. Таким чином, відповідно до отриманих результатів, основною задачею є максимально можливе розпорошення води. На жаль, зменшення розмірів капель збільшує труднощі їхньої доставки в місце постановки екрана. Ця властивість

є наслідком стабілізації руху крапель за час τ_y (4.29). Вона приводить до необхідності ставити пристрої, що розпорошують, поблизу області завіси.

1.3 Використання полідисперсних водяних завіс для зниження температури нагрітих газів

Полідисперсні водяні завіси можуть використовуватися для екранування конвекційного теплового потоку, який утворюється за рахунок руху нагрітих повітряних мас під час пожежі в огороженні. Зниження температури нагрітих газів відбувається за рахунок передачі тепла рухомому крапельному потоку водяної завіси, що має нижчу температуру.

Потік нагрітих газів при проходженні через шар водяної завіси охолоджується від $T_{Г0}$ до $T_{Г1}$, при цьому краплі води нагріваються від $T_{К0}$ до $T_{К1}$. Кількість тепла, що забирає вода від розжарених газів, і кількість води, що випарувалася, описується системою диференціальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} G_{\text{в}} c_{\text{рв}} dT_{\text{к}} &= \alpha (T_{\text{к}} - T_{\text{г}}) dV - H_{\text{вип}} dG_{\text{вип}} \\ G_{\text{г}} c_{\text{рг}} dT_{\text{г}} &= -\alpha (T_{\text{г}} - T_{\text{к}}) dV \\ \beta (P_{\text{пк}} - P_{\text{пг}}) dV &= 2,6 G_{\text{вип}} d \frac{P_{\text{пг}}}{P_{\text{заг}} - P_{\text{пг}}} \end{aligned} \right\} \quad (4.37)$$

де $G_{\text{в}}$ – витрата води, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$;

$G_{\text{г}}$ – витрата сухих нагрітих газів, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$;

$G_{\text{вип}}$ – кількість води, що випарувалася, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$;

$c_{\text{рв}}$ і $c_{\text{рг}}$ – теплоємність води і газів відповідно, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$;

$T_{\text{г}}$ і $T_{\text{к}}$ – температура газів і води відповідно, К;

α – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$;

β – коефіцієнт масовіддачі, $\text{кг} \cdot \text{Па}^{-1} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$;

V – об'єм зависі, м^3 ;

$H_{\text{вип}}$ – теплота пароутворення, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

$P_{\text{пк}}$ і $P_{\text{пг}}$ – парціальний тиск пари води у поверхні краплі і в газовому потоці відповідно, Па ;

$P_{\text{заг}}$ – загальний атмосферний тиск, Па .

Перше рівняння відображає баланс тепла елементарного об'єму води на елементарній ділянці шляху з урахуванням тепла, що йде на випаровування, друге – елементарного об'єму газу на елементарній ділянці шляху і третє – описує процес масопереносу внаслідок випаровування води.

Вирішуючи цю систему рівнянь, отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{к}} &= c_1 h_1 e^{y_1 \gamma} + c_2 h_2 e^{y_2 \gamma} + c_3 \\ T_{\text{г}} &= c_1 e^{y_1 \gamma} + c_2 e^{y_2 \gamma} + c_3 \\ P_{\text{пг}} &= P_{\text{пк}} + c_1 \frac{y_1}{H_{\text{вип}}} (h_1 - \Delta) e^{y_1 \gamma} + \\ &\quad + c_2 \frac{y_2}{H_{\text{вип}}} (h_2 - \Delta) e^{y_2 \gamma} \end{aligned} \right\} \quad (4.38)$$

де y_1, y_2 – коріння характеристичного рівняння;

$$h_1 = 1 + y_1/A;$$

$$h_2 = 1 + y_2/A;$$

$$\gamma = V \frac{\beta}{G_B};$$

$$A = \frac{\alpha}{\beta} \frac{G_B}{c_{p\Gamma} G_\Gamma};$$

$$\Delta = \frac{1}{A} \frac{\alpha}{\beta};$$

$c_1; c_2; c_3$ – постійні інтегрування, що дорівнюють:

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{A^2 (T_{K0} - T_{\Gamma 0}) (\Delta - h_2) - A H_{\text{вип}} (P_{\text{пк}} - P_0)}{y_1 (y_1 - y_2)} \\ c_2 &= \frac{A^2 (T_{K0} - T_{\Gamma 0}) (\Delta - h_1) - A H_{\text{вип}} (P_{\text{пк}} - P_0)}{y_2 (y_2 - y_1)} \\ c_3 &= T_\Gamma - c_1 c_2 \end{aligned} \right\} \quad (4.39)$$

де P_0 - парціальний тиск пари в газовому потоку за температури T_Γ .

Коефіцієнт тепловіддачі визначають за формулою:

$$\alpha = \frac{Q}{V \Delta t}, \quad (4.40)$$

де $Q = G_\Gamma c_{p\Gamma} (T_{\Gamma 0} - T_{\Gamma 1})$ – кількість тепла, що віддається газами за одиницю часу, кВт;

$$\Delta t = \frac{(T_{г0} - T_{к1}) - (T_{г1} - T_{к0})}{\ln \frac{T_{г0} - T_{к1}}{T_{г1} - T_{к0}}} - \text{температурний на-}$$

пір, К.

Отримані закономірності дають можливість визначати параметри водяних завіс і вибирати раціональні умови їх застосування при проектуванні систем пожежного захисту.

Для розрахунку густини зрошування водяних завіс при захисті отворів у протипожежних перешкодах спринклерно-дренчерними установками в роботі [75] запропонована емпірична формула:

$$\frac{T_1}{T_2} = 3 \left(\frac{\chi}{wd} \right)^{0,48},$$

де T_1, T_2 – температури повітря відповідно до і після завіси;

χ – густина зрошування, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$;

w – швидкість рушення нагрітих газів, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;

d – діаметр крапель (середній) водяної завіси, мм.

У разі $T_1 = 580 \text{ К}$, $T_2 = 300 \text{ К}$ та $d = 0,25 \text{ мм}$ необхідна густина зрошування становить $\chi = 0,3 \text{ л} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Розділ 2. Використання води для захисту будівельних конструкцій

Водозрошування краплинними струменями застосовують для захисту найбільш слабких у пожежному відношенні несучих будівельних конструкцій, наприклад, металевих ферм, перекриттів, колон тощо, пожежонебезпечних технологічних ус-

тановок і апаратів (резервуарів із нафтопродуктами і зрідженими горючими газами, ректифікаційних колон, реакторів, полімеризаторів, трансформаторів тощо). Це дозволяє зберегти їх пожежну безпеку в умовах пожежі.

Ефект водозрошування залежить від витрати води, якості її розпилення й умов теплообміну між потоком розпиленої води і зрошуваною ним поверхнею. Тому при розрахунку витрати води для зрошування потрібно враховувати чинники, що обумовлюють процес розвитку пожежі (наприклад, режим зміни температури середовища, де знаходиться об'єкт), конструктивні особливості об'єкта, що захищається, вимоги пожежної безпеки (допустима температура поверхні, тривалість нагріву тощо), параметри системи водозрошування (дисперсність водяних крапель, умови теплообміну між потоком розпиленої води і зрошуваною ним нагрітою поверхнею).

Основним параметром, що визначає конструкцію системи водозрошування, є інтенсивність подачі води для поглинання тепла, що сприймається будівельною конструкцією, устаткуванням або апаратом під час пожежі. Визначення інтенсивності водяного зрошення пов'язане з рішенням складної задачі теплоі масопереносу та нестаціонарної теплопровідності конструкцій у разі зовнішньої нелінійної теплопередачі. Рішення такої задачі в аналітичному вигляді представляє великі труднощі. Тому рівняння, що описують процеси поглинання тепла краплинними водяними струменями, наводяться в загальному виді, з метою виявлення основних чинників, що характеризують ефективність водозрошування, і вибору основних параметрів для оцінки інтенсивності водяного зрошення.

Умови теплообміну потоку розпиленої рідини й поверхні будівельної конструкції, що піддається нагріву під час пожежі, мають ряд специфічних особливостей. При виникненні пожежі основними джерелами теплового впливу на незахищені конструкції є конвекційні потоки високотемпературних продуктів горіння і променисті потоки від факела полум'я і розжарених газів. Основні якісні особливості струминного охолодження

розглянемо стосовно до системи, що складається з вертикальної поверхні теплообміну з високою температурою, паралельної їй поверхні з соплами, що подають розпилену рідину, і простору між ними, заповненого парогазовою сумішшю, крізь яку у напрямі до поверхні теплообміну рухається полідисперсний потік крапель (рис. 4.2).

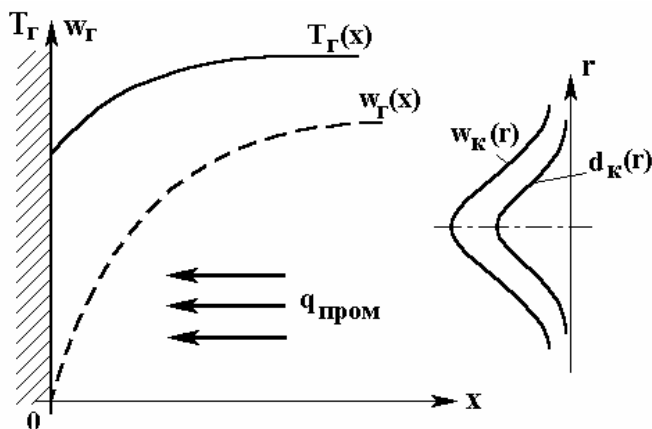


Рис. 4.2 – Схема охолодження поверхні струменями розпиленої рідини (пояснення в тексті)

Будемо вважати, що просторові поля температури $T_r(x)$ і швидкості $W_r(x)$ газового середовища, а також променистих потоків $q_{\text{проп}}$ в системі, що розглядається, задані. Температура поверхні будівельної конструкції $T_{\text{пов}}$ також відома величина. Тиск у системі P однорідний, постійний і дорівнює атмосферному. Припустимо, що потік розпиленої рідини, який подається на поверхню, є осесиметричним і характеризується деякою масовою витратою рідини g_m , густиною краплинного потоку j , а також функціями розподілу крапель за діаметрами $d_k(r)$ і швидкостями $W_k(r)$. На основі загальноприйнятих у теорії теплообміну допущень встановимо, що теплофізичні властивості

стінки, рідини й газу у разі постійного тиску є функціями тільки температури.

У загальному випадку система “розпилена рідина – газ – поверхня” може мати довільну конфігурацію й функції розподілу параметрів, однак будемо вважати, що об’єм системи значно більший, ніж об’єм потоку розпиленої води й пари, яка утворюється в процесі випаровування рідини під час руху крапель у високотемпературному газовому середовищі і при взаємодії з нагрітою стінкою.

Пара, що попадає за межі розпиленого струменя, евакуюється конвекційними потоками продуктів горіння, а в нерухомому газовому середовищі – дифундує в це середовище, істотно не впливаючи на властивості газу. Останнє припущення дозволяє нехтувати конденсацією пари на поверхні крапель води, що не досягли температури насичення, оскільки пара, що утворюється в об’ємі розпиленого струменя, транспортується в супутньому потоку аж до контакту зі стінкою. Таким чином, “свіжі” краплі рідини попадають всякий раз у сухе газове середовище, захоплюючи разом із собою парову оболонку, яка формується навколо крапель при випаровуванні. Тоді процес охолодження поверхні розпиленими струменями води можна умовно розділити на три стадії:

- випаровування крапель у процесі рушення через парогазову суміш;
- взаємодія крапель із поверхнею нагріву;
- евакуація рідини з поверхні, що охолоджується.

Методологія дослідження процесу охолодження поверхонь, як правило, включає два етапи: вивчення тепло- та масообміну окремо взятої краплі і полідисперсної сукупності крапель, тобто потоку розпиленої рідини.

Розглянемо розімкнену систему, що складається з вертикальної поверхні теплообміну з високою температурою $T_{\text{пов}}$, генератора крапель із початковою температурою $T_{\text{к}0}$ та нерухомого газового середовища з температурою не нижче за $T_s(P)$ і тиском P (рис. 4.3).

Потік водяних крапель, направлених із зрошувача на конструкцію, що захищається, проходячи через шар газового середовища, нагрівається. Нагрів краплі обумовлюється тепло-віддачею конвекцією й випромінюванням, джерелом якого служить нагріта поверхня, а також високотемпературні продукти горіння, які одночасно і випромінюють, і поглинають.

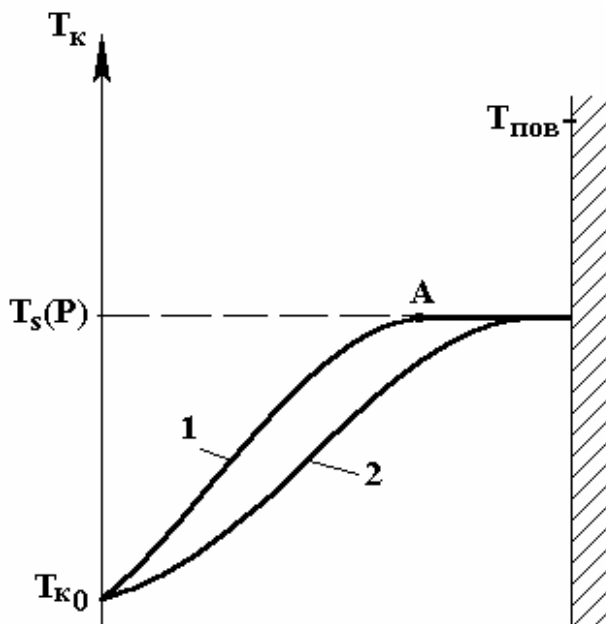


Рис. 4.3 Розподіл температур рідкої фази в процесі охолодження високотемпературної поверхні краплями рідини (ефект конденсації виключений)
1 – дрібні краплі; 2 – великі краплі

З наближенням до нагрітої поверхні конвекційний потік і потік випромінювання на краплю зростають. Очевидно, що нагрів дрібних крапель відбувається з більшою швидкістю, ніж великих. Крутизна температурних кривих для дрібних крапель

2.4 Додатки проти замерзання.....	162
2.5 Використання композицій різних добавок.....	164
Контрольні питання.....	167
Глава 4. Застосування води для створення умов пожежної безпеки.....	168
РОЗДІЛ 1. Застосування водяних завіс для обмеження теплового випромінювання та зниження температури нагрітих газів.....	169
1.1 Суцільні водяні екрани.....	170
1.2 Краплинні екрани.....	177
1.3 Використання полідисперсних водяних завіс для зниження температури нагрітих газів.....	185
РОЗДІЛ 2. Використання води для захисту будівельних конструкцій.....	188

обумовлена не тільки високою швидкістю теплової релаксації, але і низькою швидкістю рушення, внаслідок прискореного гальмування, в порівнянні з крупними краплями, для яких обидва чинники діють у зворотному напрямку.

Окремі краплі води невеликого діаметра, внаслідок швидкого їх випаровування, не встигають долетіти до зрошуваної поверхні; інші (більш великі) – попадають на поверхню зрошування нагрітими до певної температури. Таким чином, на поверхню зрошування попадає лише частина води, яка за час рушення в об'ємі полум'я буде нагріта до певної температури.

Якісну картину процесу охолодження доцільно розглянути для окремої краплі, не спотворюючи при цьому фізичної суті макроскопічної взаємодії потоку крапель із поверхнями, що охолоджуються. Основними елементарними актами є рушення та тепломасообмін окремо взятої краплі.

Теоретичні основи першого етапу випаровування краплі в процесі рушення через розжарені продукти горіння розглянуті

в главі 2, розділі 2.1. Як уже було сказано, випаровування краплі в процесі рушення настає в той момент, коли температура її поверхні зростає настільки, що тиск насиченої пари поблизу поверхні краплі стає більше тиску пари в парогазовій суміші. Градієнт тиску пари зумовлює відповідний потік випаровування.

Можна виділити два механізми, які лімітують процес випаровування. На початковій стадії рушення краплі у високотемпературному сухому газовому середовищі процес випаровування лімітується дифузією молекул пари від поверхні краплі серед молекул газу. У міру насичення газової фази парою, а також поступового її охолодження, процесом, що лімітує, стає тепловіддача від парогазової суміші до краплі. Тепловий баланс краплі при рушенні до поверхні, що охолоджується, характеризується двостадійністю. Якщо середня температура краплі нижче за температуру насичення $T_s(P)$, то тепловий потік, що підводиться ззовні до поверхні краплі, розділяється на дві частини: одна з них відводиться в середину краплі, забезпечуючи продовження процесу її теплової релаксації, а частина, що залишилася, витрачається на випаровування. Після закінчення теплової релаксації при $T_k = T_s(P)$ (правіше за точку А на рис. 4.3) вся теплота, що підводиться до краплі конвекцією та радіаційним потоком, витрачається тільки на її випаровування, а сама крапля служить лише джерелом маси для парогазової суміші.

Детальний розгляд нагріву краплі вимагає рішення не тільки зовнішньої, але і внутрішньої задачі теплообміну, оскільки за певних умов крапля може бути термічно масивним тілом. Тому нарівні з балансом теплових потоків на поверхні розділу фаз необхідно врахувати закономірності їх розподілу в об'ємі самої краплі.

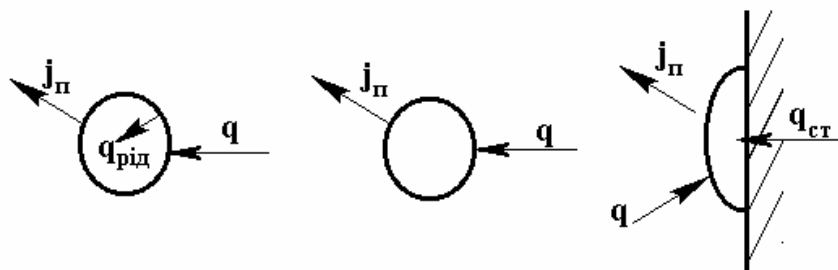


Рис. 4.4 – Схема теплової взаємодії на поверхні розділу фаз для різних варіантів протікання процесу тепломасообміну краплі з навколишнім середовищем

q – теплота, що підводиться до краплі конвекцією та радіаційним потоком;

$q_{\text{рід}}$ – теплота, що відводиться всередину краплі на нагрівання рідини до температури $T_s(P)$;

$q_{\text{ст}}$ – теплота, що підводиться до краплі через розігріту стінку;

$j_{\text{п}}$ – питомий потік пари з поверхні краплі.

Для великих крапель, які довго зберігають початкову швидкість, можливе переважання надходження теплоти над відведенням її в середину, що призводить до підвищення температури поверхні й інтенсифікації випаровування. У той же час ядро краплі може залишатися досить холодним, внаслідок чого в краплі індукується теплопровідність. Внаслідок несиметричного розподілу теплових потоків конвекцією й випромінюванням на поверхні краплі температурне поле поверхні також нерівномірне, що може спричинити появу конвекційних потоків у краплі.

Поведінка дисперсних систем характеризується не тільки тепломасообмінними, але і гідродинамічними ефектами, до числа яких відносяться коагуляція й розпад крапель рідини, а також ежекція навколишнього газоподібного середовища в розпилений струмінь. Коагуляція може бути визначена як випадковий процес зіткнення й злиття крапель, хоч зміна траєкторії

їх польоту має цілком визначений характер, обумовлений дією сил тяжіння, аеродинамічного опору і реактивної сили. У полідисперсній сукупності крапель із нерівномірним розподілом швидкості рушення й температури нагріву по фракціях відбувається гальмування й зміна температурного стану великих крапель при злитті з дрібними.

Таким чином, коагуляція приводить до зміни функцій розподілу швидкості, температури й діаметра крапель.

При досягненні деякої критичної швидкості $W_{кр}$ руху газу відносно крапель рідини, що може спостерігатися у разі зустрічної течії рідини й продуктів горіння, відбувається розпад крапель. Величина критичної швидкості зворотно пропорційна квадратному кореню з діаметра краплі:

$$W_{кр} \sim \frac{1}{\sqrt{d_0}}.$$

Краплинний потік впливає на гідродинаміку газового середовища, спричиняючи його супутнє рушення. Високошвидкісний конічний струмінь, який витікає із сопла розпилювача, захоплює навколишній газ, і утворює двофазний струмінь. В межах розпиленого струменя швидкості газу й крапель рідини рівні між собою. Очевидно, що ефект ежекції буде посилюватися із зростанням початкової швидкості витікання розпиленого струменя. Газоподібна фаза також бере участь у теплообміні зі зрошуваною поверхнею, тому інтегральний ефект охолодження складається з двох компонентів: густини теплового потоку, зумовленого впливом крапель рідини, і густини теплового потоку, що відводиться від стінки парогазовою сумішшю.

Взаємодія з поверхнею нагріву – головна стадія реалізації процесу струминного охолодження. Найбільш повно розроблена задача теплообміну сфероїдальної краплі, перший опис якої був зроблений І.Г. Лейденфростом. При дослідженні поведінки краплі рідини, яка знаходиться на розжареній поверхні,

встановлено, що час повного випаровування й стан самої краплі істотно залежать від температури й чистоти обробки поверхні, а також від властивостей рідини.

У разі відносно низьких температур поверхні, менших, ніж температура насичення рідини за заданого тиску $T_s(P)$, крапля рідини, потрапляючи на горизонтальну поверхню, розтікається тонким шаром і утримується на ній. При цьому відбувається передача тепла через основу краплі в середину рідини теплопровідністю й конвекцією, а також випаровування із зовнішньої поверхні краплі (стан А, рис. 4.5). Кипіння, тобто утворення пари у середині об'єму рідини, при цьому не спостерігається, інтенсивність теплообміну порівняно невисока, що обумовлює відносно тривалий час випаровування.

Зі збільшенням температури поверхні $T_{\text{пов}}$ більше, ніж температура насичення T_s за заданого тиску P ($T_s = 100^\circ\text{C}$ при тиску $P = 101,3$ кПа), виникає деякий перегрів рідини, тобто надлишок її температури над температурою насичення. Цей перегрів залежить від фізичних властивостей рідини, її чистоти, загального тиску, а також властивостей твердої поверхні. Так, для води за атмосферного тиску перегрів в об'ємі складає $0,2\text{--}0,4^\circ\text{C}$. Чим чистіша рідина, тим більш високим буде початковий перегрів, необхідний для виникнення кипіння.

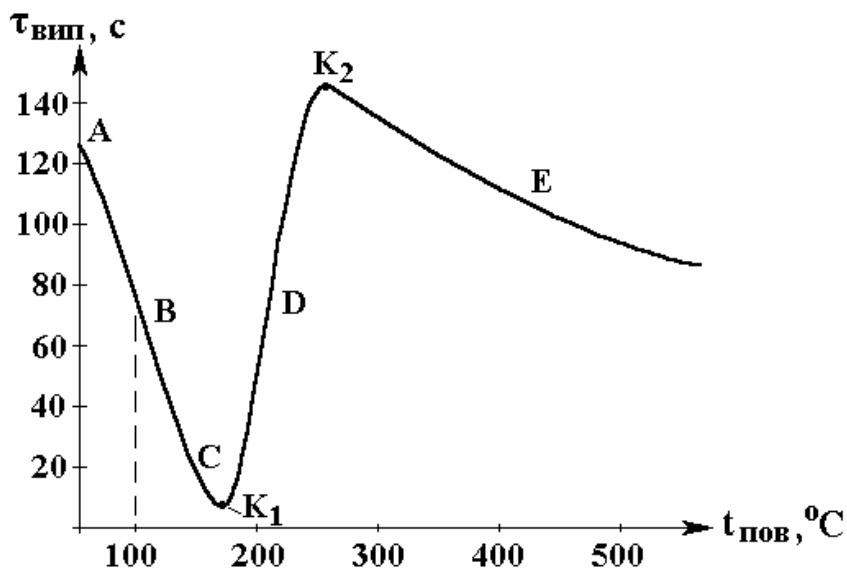


Рис. 4.5 Залежність часу повного випаровування краплі води об'ємом $4,6 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$ від температури розжареної поверхні
A – E – стан краплі;
K₁, K₂ – перша та друга криза кипіння

Початковий перегрів знижується в тому випадку, якщо тверда поверхня має адсорбований газ, мікрошорсткість, а також неоднорідності й включення, що знижують молекулярне зчеплення рідини з поверхнею. В окремих точках поверхні, так званих центрах пароутворення, при підведенні тепла, майже відразу після досягнення рідиною температури насичення, спостерігається утворення бульбашок. Отже, при попаданні краплі на розжарену поверхню, вона розтікається, і в шарах рідини, які контактують із поверхнею і мають однакову з нею температуру, починається процес кипіння. При цьому кипіння носить спокійний бульбашковий характер (стан **B** рис. 4.5). Зі збільшенням температури поверхні збільшується тепловий потік до краплі й поступово скорочується час її випаровування.

Парові бульбашки хаотично відриваються від поверхні. Відрив бульбашок значною мірою залежить від здатності рідини до змочування. Якщо рідина змочує поверхню нагрівання, то бульбашки мають незначну площу контакту з поверхнею і легко від неї відриваються. Якщо ж рідина не змочує поверхню нагрівання, то площа контакту бульбашки з поверхнею збільшується і відрив ускладнюється (рис. 4.6).

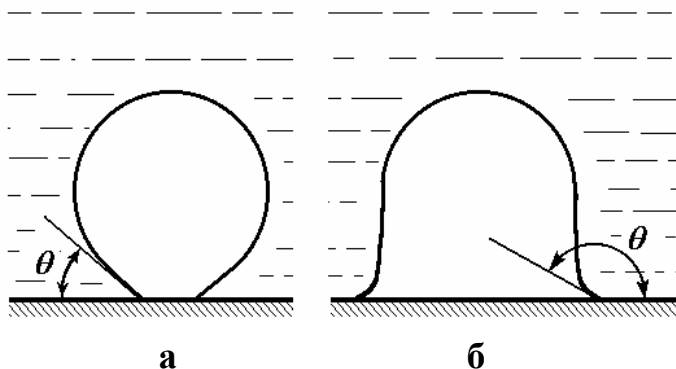


Рис. 4.6 – Форма бульбашки пари при контакті з поверхнею у випадку змочування (а) і незмочування (б)

Тепло, що йде від поверхні нагрівання, передається рідині, йде на випарювання рідини в бульбашки пари. Безпосередньо ж від поверхні до пари передача тепла здійснюється шляхом конвекції під час росту бульбашок до відриву. Однак, унаслідок низької теплопровідності пари передача тепла в цей період незначна.

За мірою подальшого збільшення температури поверхні нагрівання $T_{\text{пов}}$ зростає кількість діючих центрів пароутворення, процес кипіння стає більш інтенсивним, встановлюється режим *розвиненого бульбашкового кипіння* (стан С рис. 4.5).

Активізація фазового переходу спричиняє різке зростання густини теплового потоку, що відводиться від поверхні, і відповідно зниження часу випаровування краплі. Але скорочення

часу випаровування припиняється при досягненні певної критичної температури.

У разі більш високих температур інтенсивність пароутворення збільшується, внаслідок чого площа безпосереднього контакту рідини й розжареної стінки істотно зменшується. Наступає так званий *режим перехідного кипіння* (стан **D** рис. 4.5).

Екстремум, який лежить між режимом бульбашкового і перехідного кипіння і відповідає мінімуму на кривій $\tau_{\text{вип}} - T_{\text{пов}}$ (точка **K₁**), отримав назву *першої кризи кипіння*. Для води перша криза кипіння спостерігається за температури порядку 165 – 170°C.

При перехідному режимі рідина, потрапляючи на розжарену поверхню, вже не розтікається, а збирається у сферичну краплю, – настає так званий сфероїдальний стан рідини. На поверхні нагрівання утворюється нестійка плівка пари, що хаотично пульсує й руйнується. Плівковий режим хаотично чергується з режимом бульбашкового кипіння. За мірою зростання ΔT_s на поверхні теплопередачі утворюються усе більш великі порожнечі (області парової плівки). Доступ рідини до поверхні поступово ускладнюється. В окремих місцях поверхні виникають “сухі” плями, їхня кількість і розміри збільшуються; такі ділянки мов би виключаються з теплообміну. У разі подальшого збільшення температури стінки повністю закінчується формування сфероїдального стану краплі; між поверхнею й краплею в процесі взаємодії утворюється досить стійкий паровий прошарок, причому безпосереднього контакту може й не відбуватися (крапля ніби парить над поверхнею, безпосередньо не стикаючись із нею). Пояснюється це тим, що, внаслідок інтенсивного випаровування, сила тиску пари рідини в зазорі між краплею й стінкою врівноважує силу важкості, що діє на краплю. Феномен повного відриву краплі від поверхні отримав назву *явища Лейденфроста*, а температура, за якої відбувається

це явище, називається *температурою Лейденфроста* і позначається $T_{\text{л}}$.

Парова плівка навколо краплі різко скорочує притоку тепла до останньої, відбувається ослаблення теплообміну й збільшення часу випаровування. Зростання часу випаровування краплі продовжується до досягнення температури $T_{\text{л}}$. Максимум на кривій $\tau_{\text{вип}} = f(T_{\text{пов}})$, що доводиться на $T_{\text{л}}$, прийнято називати *другою кризою кипіння* (точка K_2 рис. 4.5). Температура Лейденфроста залежить від виду рідини й шорсткості поверхні: для води на полірованій неочищеній поверхні $T_{\text{л}} = 540\text{K}$, для грубо обробленої поверхні $T_{\text{л}} = 480\text{K}$, причому час життя краплі у разі плівкового кипіння у другому випадку вдвічі менше, ніж у першому.

У разі температур, більших за температуру Лейденфроста, кипіння проходить у *режимі плівкового кипіння* (стан E рис. 4.5). При цьому тепло підводиться до краплі теплопровідністю через паровий прошарок, випромінюванням і конвекцією. Подальше підвищення температури поверхні супроводжується поступовим зростанням теплового потоку до краплі й, отже, поступовим скороченням часу випаровування.

Ефективність струминного охолодження визначається інтенсивністю процесу випаровування краплі й залежить від величини перегріву рідини щодо температури насичення T_s . Параметрами, що характеризують теплообмін у разі струминного охолодження, є густина теплового потоку, що відводиться від стінки, та коефіцієнт тепловіддачі, які залежать від температури поверхні нагрівання $T_{\text{пов}}$ і відповідного температурного напору $\Delta T_s = T_{\text{пов}} - T_s$. Коефіцієнт тепловіддачі визначається як:

$$\alpha = \frac{q}{\Delta T_s}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}.$$

На рис. 4.7 наведена типова залежність α і q від ΔT_s для кипіння води при тиску 10^5 Па.

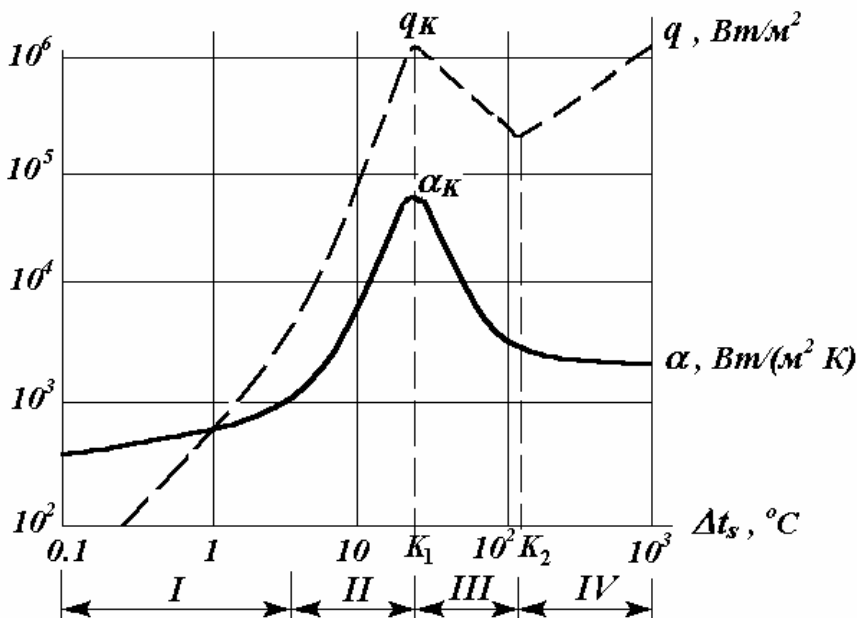


Рис. 4.7 - Залежність коефіцієнта тепловіддачі і густини теплового потоку від температурного напору при кипінні води при тиску 10^5 Па

У разі малих значень ΔT_s в області спокійного бульбашкового кипіння (ділянка I) інтенсивність тепловіддачі цілком визначається умовами звичайного конвекційного теплообміну без помітного впливу кипіння. Для води такий режим здійснюється за умови $1^\circ\text{C} < \Delta T_s < 5^\circ\text{C}$, $q(\Delta T_s = 5) = 6 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$.

Зі збільшенням ΔT_s в області розвиненого бульбашкового кипіння (ділянка II, для води $5^\circ\text{C} < \Delta T_s < 25^\circ\text{C}$) збільшується

число бульбашок пари, підсилюється перемішування рідини біля поверхні, і тому інтенсивність тепловіддачі різко зростає. У точці K_1 інтенсивність тепловіддачі досягає максимуму. Відповідній густині теплового потоку, коефіцієнт тепловіддачі і температурний напір називаються критичними (для води при тиску 101,3 кПа $\alpha_{кр1} = 58 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$, $q_{кр1} = 1,45 \cdot 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, $\Delta T_s \text{ кр } 1 = 25^\circ\text{C}$).

Область перехідного кипіння (ділянка III) для води у разі атмосферного тиску реалізується за умови перегріву $25^\circ\text{C} < \Delta T_s < 125^\circ\text{C}$. Коефіцієнт тепловіддачі в цій області різко падає зі збільшенням температурного напору. У точці K_2 інтенсивність тепловіддачі має мінімум, причому $q_{кр2} < q_{кр1}$, а відповідний коефіцієнт тепловіддачі майже перестає змінюватися.

У разі подальшого підвищення ΔT_s в області плівкового кипіння (ділянка IV) діючих центрів пароутворення стає так багато, що бульбашки зливаються між собою й на поверхні утворюється суцільна парова плівка. Через великий термічний опір парової плівки коефіцієнт тепловіддачі в цій області малий і майже не залежить від температурного напору.

У разі ударної взаємодії краплі з поверхнею, крім температури, істотну роль грає швидкість підльоту й розміри краплі. Краплі невеликого розміру, які мають невисоку швидкість, за умови помірної температури поверхні осідають на ній у вигляді полусфер, оскільки дія сили тяжіння невелика в порівнянні з дією сили поверхневого натягнення. У разі більш високої швидкості відбувається деформація краплі, що змочує стінку.

Великі краплі після розплющення знову згортаються в кулю й покидають поверхню теплообміну, втративши частину рідини на випаровування. Нарешті, за певних умов відбувається дроблення крапель на більш дрібні частки.

У разі досить високої температури поверхні між нею й краплею в процесі взаємодії утворюється паровий прошарок,

причому безпосереднього контакту може й не відбуватися. Крапля деформується під впливом сил інерції, а сили поверхневого натягнення й в'язкого тертя перешкоджають деформації. У залежності від швидкості підльоту, крапля може відскочити без дроблення або частково чи повністю роздрібнитися в умовах взаємодії з поверхнею, що не змочується.

Уперше гідродинамічні закономірності взаємодії крапель, які падають на високотемпературну стінку, були сформульовані Вахтерсом у 1966 році. Він установив, що характер поведінки краплі при взаємодії з поверхнею залежить від числа Вебера **We**. У разі невисоких значень **We** дія сил поверхневого натягнення є домінуючою. Дроблення краплі при ударі відбувається у випадку, якщо число Вебера більше критичної величини, рівної 80. Характерно, що повне дроблення краплі при взаємодії з поверхнею, що не змочується, настає при числі Вебера, майже вдвічі більшому, ніж при змочуванні. Це, ймовірно, пояснюється характером контакту (із твердою стінкою або пружним прошарком пари).

Макроскопічна взаємодія розпиленого струменя рідини з нагрітою поверхнею має деякі відмінності, пов'язані з нерівномірним розподілом швидкостей і діаметрів крапель у потоку, що за інших рівних умов виражається в неоднорідному характері контакту різних крапель (прилипання, відскік, дроблення). У залежності від густини краплинного потоку (інтенсивності зрошування поверхні) можлива взаємодія окремих крапель з поверхнею або злиття крапель в суцільну плівку рідини (режим із затопленням). Гідродинаміка течії плівки рідини визначається кутом атаки струменя й дією сили гравітації.

Якісний аналіз дозволив виявити загальні закономірності, характерні для процесу охолодження поверхні розпиленою рідиною:

1. Характер і інтенсивність теплообміну залежать від температури й стану поверхні, інтенсивності зрошування, діаметра й швидкості крапель, кута атаки, величини й напрямку прискорення в гравітаційному полі, теплофізичних властивостей

речовин, параметрів стану газу й температури охолоджуючої рідини.

2. Процес взаємодії розпиленої рідини може протікати у двох режимах:

- відбувається взаємодія окремих крапель із поверхнею; при цьому краплі можуть охолоджувати газове середовище навколо розжареної поверхні внаслідок повного випаровування в польоті або краплі випаровуються на поверхні;

- краплі зливаються в суцільну плівку рідини; при цьому можуть спостерігатися різні режими тепловіддачі (конвекційний теплообмін, бульбашкове кипіння, перехідний режим, плівкове кипіння).

В якості додаткових чинників, які впливають на процес охолодження, потрібно відмітити обурюючу дію струменя на плівку рідини або можливість прориву парової плівки окремими краплями.

Евакуація рідини з поверхні теплообміну відіграє істотну роль при зрошуванні краплинним потоком, оскільки краплі, що зазнали взаємодії з поверхнею, знаходяться в тому ж просторі, що і свіжі.

На стадії евакуації краплі із системи тепловий баланс для краплі принципово не відрізняється від такого ж на стадії випаровування після теплової релаксації. В області плівкового кипіння частка води, що випарувалася, не перевищує 25%, тобто велика частина рідини відбивається від стінки. Після зіткнення з поверхнею краплі нагріваються, причому підвищення температури може досягати $20 - 25^{\circ}\text{C}$, в залежності від умов взаємодії. Унаслідок коагуляції відбитих крапель і тих, що рухаються до поверхні теплообміну, частина рідини може брати участь у повторному охолодженні, сприяючи підвищенню ефективності процесу. Як правило, при зрошуванні поверхонь розпиленою водою формується плівка рідини, що забезпечує її евакуацію, гідродинаміка течії якої зумовлена густиною краплинного потоку, розмірами й розташуванням поверхні в просторі, кутом атаки струменя. Характерно, що у разі складної об'ємно-

просторової конфігурації металоконструкцій, що захищаються, рідина може перетікати з одних елементів на інші у вигляді плівки, цівками або краплями (ефект “дощу”). Таким чином, режим евакуації води зі зрошуваної поверхні впливає на процес охолодження загалом, додатково ускладнюючи його формалізований опис і вносячи істотну стохастичну складову.

Таким чином, при зрошуванні вертикальних стінок резервуара розпиленою водою найбільш сильне паротворення буде в інтервалі температур стінки від 100°C до 160°C і при температурах понад 250°C . За умови сфероїдального стану крапель, охолодження ускладнено, оскільки краплі води в цьому випадку не змочують поверхні стінок.

Приведений вище якісний аналіз процесу охолодження нагрітих поверхонь струменями розпиленої рідини свідчить про його багатогранність, комплексність і складність фізичної природи.

Контрольні питання

1. Розкрийте основні напрямки застосування води для створення умов пожежної безпеки.
2. Які основні процеси визначають ефективність використання води у водяних завісах, що застосовують для захисту від теплового випромінювання?
3. Як залежить коефіцієнт послаблення потоку теплового випромінювання від товщини суцільного плоского водяного екрана?
4. Як залежить коефіцієнт послаблення потоку теплового випромінювання від товщини системи з декількох плоских водяних екранів?
5. Як залежить довжина загасання потоку теплового випромінювання від дисперсності крапельного водяного екрана?
6. Як залежить витрата води на постановку крапельного водяного екрана від дисперсності крапельного потоку?

7. Розкрити сутність використання води для захисту будівельних конструкцій.

8. Загальні закономірності взаємодії розпиленого струменя рідини з нагрітою поверхнею. Які існують режими кипіння води?

9. Пояснити механізм зміни режиму кипіння води. Розкрити сутність явища Лейденфроста.

Додаток А. Випаровування водяних крапель у газово-му середовищі

У даному додатку буде розглянуто випаровування водяних крапель, що знаходяться у гарячому газовому середовищі. Буде визначено поведження у часі температури крапель та швидкості їх випаровування.

Через те, що розміри крапель значно менші за характерну відстань між ними, задачу про випаровування певної кількості крапель можна звести до задачі про випаровування окремих крапель. Розглянемо таку краплю.

Основними процесами, що обумовлюють динаміку випаровування води з поверхні краплі, є дифузія випареної водяної пари від поверхні краплі у зовнішнє середовище та зворотній рух тепла, що підтримує випаровування із краплі без суттєвої зміни температури останньої. Таким чином рівняннями, які описують процес, є рівняння тепломасопереносу у парогазовому шарі, що оточує краплю.

Задачу будемо розглядати як таку, що має сферичну симетрію. Як незалежну просторову змінну "**r**" візьмемо відстань від центру краплі. У розглянутому діапазоні тисків концентрації пари $\phi_n(\mathbf{r})$ (моль·м⁻³) й іншого (крім пари) газового середовища $\phi_r(\mathbf{r})$ (моль·м⁻³) у просторі з достатньою точністю задовольняють рівнянню стану ідеального газу:

$$P_n(\mathbf{r}) = \phi_n(\mathbf{r}) \cdot R \cdot T(\mathbf{r}); \quad P_r(\mathbf{r}) = \phi_r(\mathbf{r}) \cdot R \cdot T(\mathbf{r}), \quad (\text{A.1})$$

де $R = 8,314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ - універсальна газова стала;

$P_n(\mathbf{r})$ і $P_r(\mathbf{r})$ – відповідно парціальні тиски пари і газового середовища в точці з координатою "**r**", Па;

$T(\mathbf{r})$ - абсолютна температура парогазової суміші в точці з координатою "**r**", К.

Відзначимо, що повний тиск суміші **P** у всьому об'ємі залишається незмінним, тобто виконується співвідношення:

$$P_{\Pi}(r) + P_r(r) = P = \text{const.} \quad (\text{A.2})$$

У такій ситуації систему рівнянь тепломасопереносу у парогазовій суміші можна представити у виді:

$$\mathbf{j}_{\Pi}(r) = -D \frac{d\varphi_{\Pi}}{dr} + w(r) \varphi_{\Pi}, \quad (\text{A.3})$$

$$\mathbf{j}_r(r) = -D \frac{d\varphi_r}{dr} + w(r) \varphi_r, \quad (\text{A.4})$$

$$q(r) = -\lambda \frac{dt}{dr} + \mathbf{j}_{\Pi} H_{\Pi}(t) + \mathbf{j}_r H_r(t), \quad (\text{A.5})$$

де $\mathbf{j}_{\Pi}$, $\mathbf{j}_r$ - густини потоку водяної пари і вихідного газового середовища відповідно, моль·м⁻²·с⁻¹;

q - густина теплового потоку через парогазову суміш, Вт·м⁻²;

$D(t)$ - коефіцієнт дифузії пари у газовому середовищі, м²·с⁻¹;

λ - коефіцієнт теплопровідності суміші, Вт·м⁻¹·К⁻¹;

$H_{\Pi}(t)$, $H_r(t)$ - питома ентальпія пари та газу відповідно, Дж·моль⁻¹;

$w(r)$ – загальна швидкість руху потоку суміші, м·с⁻¹.

Рішення системи (A.1)-(A.5) вимагає задання значень тиску водяної пари та температури середовища на границях досліджуваної області. Визначимо ці границі. Скористаємось тим, що в процесі випаровування над поверхнею краплі утворюється два приповерхневих шари – дифузійний та температурний (дивись рис. A1).

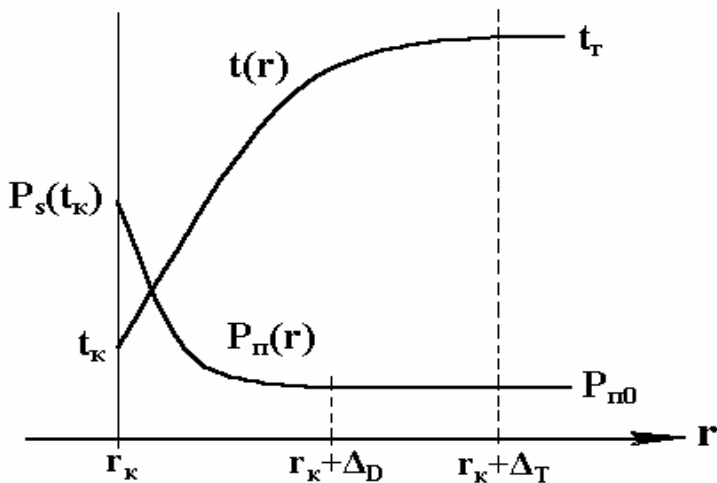


Рис. А1 - Схема залежності температури газового середовища та парціального тиску водяної пари від відстані від центру краплі

Дифузійний шар (товщиною Δ_D) має надлишок водяної пари, парціальний тиск якої безпосередньо біля поверхні краплі дорівнює:

$$P_{\pi}(r_{\kappa}) = P_s(t_{\kappa}), \quad (\text{A.6})$$

де t_{κ} – температура каплі, $^{\circ}\text{C}$;

$P_s(t)$ - відома залежність тиску насиченої пари від температури t , $^{\circ}\text{C}$.

На зовнішній границі дифузійного шару тиск водяної пари дорівнює об'ємному значенню $P_{\pi 0}$:

$$P_{\pi}(r_{\kappa} + \Delta_D) = P_{\pi 0}. \quad (\text{A.7})$$

Температурний шар (товщиною Δ_T) з одного боку обмежено поверхнею краплі. Поблизу цієї поверхні температура середовища дорівнює температурі краплі:

$$t(\mathbf{r}_K) = t_K. \quad (\text{A.8})$$

На зовнішній границі температурного шару температура середовища дорівнює об'ємному значенню t_r :

$$t(\mathbf{r}_K + \Delta_T) = t_r. \quad (\text{A.9})$$

Перейдемо до рішення системи (A.1)-(A.9), маючи на меті визначення характеристик парогазового середовища безпосередньо у поверхні краплі (тобто при $\mathbf{r} = \mathbf{r}_K$). Скористаємося тим, що питомий потік газового середовища у приповерхневому шарі дорівнює нулю:

$$\mathbf{j}_r(\mathbf{r}) = 0. \quad (\text{A.10})$$

Тоді можна за допомогою співвідношень (A.1) позбавитися концентрацій в описі і, нехтуючи малими ефектами типу термодифузії, надати рівнянням (A.3)-(A.4) вид:

$$\mathbf{j}_n(\mathbf{r}) = -\frac{D}{RT} \frac{dP_n}{dr} + w(r) \frac{P_n}{RT}, \quad (\text{A.11})$$

$$0 = -\frac{D}{RT} \frac{dP_r}{dr} + w(r) \frac{P_r}{RT}. \quad (\text{A.12})$$

Розглядаючи останню пару рівнянь сумісно з умовою незмінності загального тиску (A.6), можна виключити з розгляду парціальний тиск $P_r(\mathbf{r})$ і загальну швидкість парогазового

середовища $\mathbf{w}(\mathbf{r})$. Результуюче рівняння, що зв'язує густину потоку водяної пари з її парціальним тиском, має вид:

$$\mathbf{j}_n(\mathbf{r}) = -\frac{D}{RT} \cdot \frac{P}{P - P_n} \cdot \frac{dP_n}{dr}. \quad (\text{A.13})$$

Для подальшого рішення виразимо питомий потік пари через повний потік $\mathbf{J}_n$:

$$\mathbf{j}_n(\mathbf{r}) = \frac{\mathbf{J}_n}{4\pi r^2}. \quad (\text{A.14})$$

Тоді рівняння (A.13) набуває вид:

$$\frac{\mathbf{J}_n}{4\pi} \cdot \frac{RT}{PD(T)} \cdot \frac{dr}{r^2} = -\frac{dP_n}{P - P_n}. \quad (\text{A.15})$$

Ми розглядаємо квазістаціонарний режим, у якому припускається незалежність величини потоку пари $\mathbf{J}_n$ від координати $\mathbf{r}$ у межах приповерхневого дифузійного шару. З урахуванням цієї обставини результат інтегрування рівняння (A.15) у межах дифузійного шару (по $\mathbf{r}$ від $\mathbf{r}_k$ до $\mathbf{r}_k + \Delta_D$ і по $\mathbf{P}_n$ (згідно з (A.6) і (A.7)) від $\mathbf{P}_s(\mathbf{t}_k)$ до $\mathbf{P}_{n0}$) дає співвідношення:

$$\mathbf{J}_n = 4\pi \frac{\mathbf{r}_k(\mathbf{r}_k + \Delta_D)}{\Delta_D} \cdot \frac{\overline{DP}}{\overline{TR}} \cdot \ln\left(\frac{P - P_{n0}}{P - P_s(\mathbf{t}_k)}\right), \quad (\text{A.16})$$

де $\overline{T}$ - характерне (більш-менш довільне) значення абсолютної температури середовища у дифузійному шарі;

$\bar{D}$ – усереднене значення коефіцієнта дифузії, яке визначається за формулою:

$$\bar{D} = \frac{\bar{T}}{\frac{r_k(r_k + \Delta_D)}{\Delta_D} \int_{r_k}^{r_k + \Delta_D} \frac{T(r)}{D(t(r)) r^2} dr}.$$

У чисельних розрахунках із використанням усередненого значення коефіцієнта дифузії треба застосовувати метод послідовних наближень.

У подальшому зручно ввести зведену товщину дифузійного шару:

$$\delta_D \equiv \frac{r_k \Delta_D}{r_k + \Delta_D}. \quad (A.17)$$

Це дозволяє записати вираз (A.16) у формі:

$$j_k = \frac{\bar{D}}{\delta_D} \cdot \frac{P}{\bar{T} R} \cdot \ln \left(\frac{P - P_{п0}}{P - P_s(t_k)} \right), \quad (A.18)$$

де j_k - питомий потік водяної пари на поверхні краплі, моль·м⁻²·с⁻¹:

$$j_k \equiv j_p(r_k) = \frac{J_p}{4\pi r_k^2}. \quad (A.19)$$

Перейдемо до інтегрування рівняння теплового потоку (A.5).

Через сферичну симетрію питомий тепловий потік $\mathbf{q}(\mathbf{r})$ зв'язаний із повним тепловим потоком тепла Q співвідношенням:

$$\mathbf{q}(\mathbf{r}) = \frac{Q}{4\pi r^2}. \quad (\text{A.20})$$

Величина теплового потоку Q , аналогічно величині потоку пари J_{Π} , вважається незалежною від координати $\mathbf{r}$ у межах приповерхневого температурного шару.

Враховуючи співвідношення (A.10), (A.14), (A.20), формулі (A.5) можна надати вид:

$$\frac{Q}{4\pi r^2} = -\lambda \frac{dt}{dr} + \frac{J_{\Pi}}{4\pi r^2} H_{\Pi}(t)$$

або

$$\frac{dt}{J_{\Pi} H_{\Pi}(t) - Q} = \frac{1}{4\pi\lambda} \cdot \frac{dr}{r^2}. \quad (\text{A.21})$$

Інтегруємо рівняння (A.21) у межах температурного приповерхневого шару (по $\mathbf{r}$ від $\mathbf{r}_K$ до $\mathbf{r}_K + \Delta_T$ і по $\mathbf{t}$ (згідно з (A.8) і (A.9)) від $\mathbf{t}_K$ до $\mathbf{t}_T$). При цьому скористаємося лінійним розкладом питомої ентальпії пари за температурою:

$$H_{\Pi}(t) = H_{\Pi}(t_K) + c_{p\Pi} (t - t_K),$$

де $c_{p\Pi}$ - питома молярна ізобарна теплоємність пари, Дж·моль⁻¹·К⁻¹.

В результаті отримаємо співвідношення:

$$\frac{1}{J_{\Pi} c_{p\Pi}} \cdot \ln \left(\frac{J_{\Pi} H_{\Pi}(t_{\Gamma}) - Q}{J_{\Pi} H_{\Pi}(t_{\kappa}) - Q} \right) = \frac{1}{4\pi \bar{\lambda}} \cdot \frac{\Delta T}{r_{\kappa} (r_{\kappa} + \Delta T)}, \quad (\text{A.22})$$

де $\bar{\lambda}$ - середнє за температурним шаром значення тепло-
провідності парогазового середовища.

У подальшому зручно ввести зведену товщину темпера-
турного шару:

$$\delta_T \equiv \frac{r_{\kappa} \Delta T}{r_{\kappa} + \Delta T}. \quad (\text{A.23})$$

Це дозволяє надати рівнянню (A.22) форму:

$$j_{\kappa} = \frac{\bar{\lambda}}{\delta_T} \cdot \frac{1}{c_{p\Pi}} \cdot \ln \left(\frac{J_{\Pi} H_{\Pi}(t_{\Gamma}) - Q}{J_{\Pi} H_{\Pi}(t_{\kappa}) - Q} \right). \quad (\text{A.24})$$

Іншим корисним варіантом співвідношення (A.24) є яв-
ний вираз теплового потоку Q через потік пари:

$$Q = J_{\Pi} \cdot \left[-\frac{H_{\Pi}(t_{\Gamma}) - H_{\Pi}(t_{\kappa})}{\exp(B) - 1} + H_{\Pi}(t_{\kappa}) \right], \quad (\text{A.25})$$

де використано безрозмірний параметр:

$$B \equiv \frac{\delta_T}{\bar{\lambda}} \cdot c_{p\Pi} \cdot j_{\kappa}. \quad (\text{A.26})$$

Рівняння (A.18) і (A.25) зв'язують між собою параметри Q , J_{Π} та t_K , що характеризують протікання процесу випаровування біля поверхні краплі. Для визначення останніх напишемо співвідношення, що відображає баланс енергії при випаровуванні безпосередньо краплі, і далі скористаємося неперервністю потоків речовини (J_{Π}) та енергії (Q) на поверхні краплі.

У відповідності до першого закону термодинаміки тепловий потік крізь поверхню краплі забезпечується за рахунок зміни ентальпії краплі, тобто

$$Q = -\frac{d[H_B(t_K) \cdot m_K]}{\mu_B \cdot d\tau} = -\frac{\partial H_B(t_K)}{\partial t_K} \cdot \frac{dt_K}{d\tau} \cdot \frac{m_K}{\mu_B} - H_B(t_K) \cdot \frac{1}{\mu_B} \frac{dm_K}{d\tau},$$

або

$$Q = -c_{pB}(t_K) \cdot \frac{dt_K}{d\tau} \cdot \frac{m_K}{\mu_B} + H_B(t_K) \cdot J_{\Pi}, \quad (A.27)$$

де $H_B(t_K)$ - питома молярна ентальпія води за температури краплі, Дж·моль⁻¹;

c_{pB} - питома молярна ізобарна теплоємність води, Дж·моль⁻¹·К⁻¹;

m_K - маса краплі, кг;

$\mu_B = 18 \cdot 10^{-3}$ кг·моль⁻¹ - молярна маса води.

При записі (A.27) ми скористалися загальним термодинамічним співвідношенням:

$$c_{pB}(t) = \frac{\partial H_B(t)}{\partial t}$$

та тим, що зміна маси краплі відбувається тільки за рахунок потоку пари від краплі, тобто

$$J_{\Pi} = -\frac{1}{\mu_{\text{В}}} \frac{dm_{\text{К}}}{d\tau}. \quad (\text{A.28})$$

Підставивши вираз (A.27) у формулу (A.25), можна отримати рівняння, що описує зміну температури краплі:

$$m_{\text{К}} \frac{c_{\text{рВ}}(t_{\text{К}})}{\mu_{\text{В}}} \cdot \frac{dt_{\text{К}}}{d\tau} = J_{\Pi} \cdot \left[\frac{\Delta H_{\Pi}}{\exp(B) - 1} - \Delta H_{\text{вип}}(t_{\text{К}}) \right], \quad (\text{A.29})$$

де ΔH_{Π} - зміна молярної ентальпії пари при проходженні температурного шару, яка дорівнює:

$$\Delta H_{\Pi} \equiv H_{\Pi}(t_{\text{Г}}) - H_{\Pi}(t_{\text{К}}) = c_{\text{рп}} (t_{\text{Г}} - t_{\text{К}}), \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}, \quad (\text{A.30})$$

$\Delta H_{\text{вип}}(t_{\text{К}})$ - молярна теплота випаровування води, взята за температури краплі:

$$\Delta H_{\text{вип}}(t_{\text{К}}) \equiv H_{\text{В}}(t_{\text{К}}) - H_{\Pi}(t_{\text{К}}), \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}.$$

Рівняння (A.18), (A.29) (з урахуванням співвідношень (A.19), (A.26) та (A.28)), за умови завдання початкової маси і температури краплі, однозначно описують процес випаровування краплі. При цьому вважається, що

$$m_{\text{К}} = \frac{4\pi}{3} \cdot r_{\text{К}}^3 \cdot \rho_{\text{В}}, \quad (\text{A.31})$$

де $\rho_{\text{В}}$ - густина води, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Єдиними дійсно не визначеними величинами є товщини приповерхневих дифузійного й температурного шарів - δ_D та δ_T . Ці розміри тісно зв'язані з характером обтікання краплі парогазовою сумішшю. Для їх визначення необхідно або, використовуючи апарат теорії подібності, залучати експериментальні дані, або вирішувати систему нелінійних рівнянь тепломасопереносу (крім рівнянь (A.1)-(A.5) ще рівняння Нав'є-Стокса) у бінарній суміші "пара – газове середовище". Будемо вважати, що така задача виконана. В такому разі товщини дифузійного і температурного шарів виражаються через характерний розмір задачі (яким є діаметр краплі - $2r_K$) і дифузійне Nu_D та температурне Nu_T числа подібності, які ще носять назви чисел Шмідта (Sc) та Нуссельта (Nu), відповідно:

$$\delta_D = \frac{2r_K}{Nu_D}, \quad \delta_T = \frac{2r_K}{Nu_T}. \quad (A.32)$$

Стосовно чисел подібності Шмідта та Нуссельта корисно відмітити дві обставини. По-перше, часто через подібність явищ дифузії речовини й енергії дифузійне і температурне числа подібності співпадають, тобто $Nu_D = Nu_T$. По-друге, за малих (у порівнянні з одиницею) критеріїв Рейнольдса задачі руху краплі у газовому середовищі можна вважати, що $Nu_D = Nu_T \approx 2$.

Для подальшого аналізу процесу випаровування крапель дещо трансформуємо рівняння (A.18) та (A.29). Скористаємося тим, що згідно з співвідношеннями (A.19), (A.28) та (A.31) густина молярного потоку пари дорівнює:

$$j_K = -\frac{\rho_B}{\mu_B} \frac{dr_K}{d\tau}. \quad (A.33)$$

Підставивши останній вираз у (A.18), використовуючи зв'язок (A.32), отримаємо рівняння, що дозволяє визначати швидкість зміни площі поверхні краплі ($s = 4\pi r_k^2$):

$$\frac{ds}{d\tau} = -G(t_k), \quad (A.34)$$

де
$$G(t_k) \equiv 4\pi \cdot Nu_D \cdot \bar{D} \cdot \frac{\mu_v}{\rho_v} \cdot \frac{P}{TR} \cdot \ln\left(\frac{P - P_{n0}}{P - P_s(t_k)}\right). \quad (A.35)$$

У свою чергу рівнянню (A.29) можна надати вид:

$$s \cdot \frac{dt_k}{d\tau} = F(t_k), \quad (A.36)$$

де
$$F(t_k) = \frac{3}{2} \cdot \frac{G(t_k)}{c_{pv}} \cdot \left[\frac{c_{pn} \cdot (t_g - t_k)}{\exp(B) - 1} - \Delta H_{\text{вип}}(t_k) \right]. \quad (A.37)$$

Відмітимо, що параметр B (дивись (A.26)) також можна зв'язати зі швидкістю зміни площі поверхні краплі:

$$\begin{aligned} B(t_k) &= \frac{Nu_D}{Nu_T} \cdot \bar{D} \cdot \frac{c_{pn}}{\bar{\lambda}} \cdot \frac{P}{TR} \cdot \ln\left(\frac{P - P_{n0}}{P - P_s(t_k)}\right) = \\ &= \frac{G(t_k)}{4\pi Nu_T} \cdot \frac{c_{pn} \cdot \rho_v}{\bar{\lambda} \cdot \mu_v}. \end{aligned} \quad (A.38)$$

З формул (A.35), (A.37), (A.38) випливає, що у величинах G , F та B відсутня явна залежність від розміру краплі (від

нього слабше ніж лінійно залежать числа подібності Nu_D та Nu_T). Ця обставина спрощує аналіз рівнянь (А.34), (А.36).

Спираючись на систему (А.34), (А.36), з'ясуємо характерні особливості стаціонарного режиму випаровування краплі, а також оцінимо час виходу на цей режим.

Стаціонарний режим випаровування відрізняється незмінністю температури краплі у часі. Це (у відповідності до рівняння (А.36)) означає, що температура стаціонарного режиму $t_k = t_k^{cr}$ є рішенням рівняння:

$$F(t_k) = 0. \quad (A.39)$$

Величина швидкості зменшення площі поверхні краплі у цьому режимі (згідно з (А.34)) дорівнює $G(t_k^{cr})$.

Для визначення характерного часу виходу на стаціонарний режим розкладемо праві частини рівнянь (А.34), (А.36) по t_k поблизу стаціонарного значення температури і залишимо в цьому розкладі перші ненульові доданки. Відповідна лінеаризована система буде мати вид:

$$\frac{ds}{d\tau} = -G(t_k^{cr}), \quad (A.40)$$

$$s \frac{dt_k}{d\tau} = -\beta \cdot (t_k - t_k^{cr}),$$

де

$$\beta \equiv - \left. \frac{\partial F}{\partial t_k} \right|_{t_k=t_k^{cr}}. \quad (A.41)$$

Нехтування залежністю правих частин системи (А.40) від розмірів краплі дозволяє отримати відповідні часові залежності:

$$s(\tau) = s(0) - G(t_k^{ct}) \cdot \tau ,$$

$$\frac{t_k(\tau) - t_k^{ct}}{t_k(0) - t_k^{ct}} = \exp \left[\frac{\beta}{G(t_k^{ct})} \cdot \ln \left(1 - \frac{G(t_k^{ct})}{s(0)} \cdot \tau \right) \right] , \quad (A.42)$$

де $t_k(0)$ і $s(0)$ – початкові значення температури й площі поверхні краплі.

Рішення виду (А.42) означає, що характерний час наближення до стаціонарного режиму дорівнює:

$$\tau_0 = \frac{s(0)}{\beta} . \quad (A.43)$$

На завершення отримаємо наближені формули для розрахунку величин t_k і τ_0 . Так, із рівняння (А.39) випливає, що значення параметра B у стаціонарному режимі дорівнює:

$$B^{ct} = \ln \left(1 + \frac{c_{pn} \cdot (t_g - t_k^{ct})}{\Delta H_{\text{вип}}^{ct}} \right) , \quad (A.44)$$

де $\Delta H_{\text{вип}}^{ct} \equiv \Delta H_{\text{вип}}(t_k^{ct})$.

З іншого боку, згідно з визначенням (А.26), $B^{ct} \equiv B(t_k^{ct})$. Сумісне використання (А.26) (у формі (А.38)) разом із формулою (А.44) дає рівняння для визначення стаціонарної температури випаровування:

$$\ln\left(\frac{P - P_{n0}}{P - P_s(t_k^{ct})}\right) = \frac{Nu_T}{Nu_D} \cdot \frac{\bar{\lambda}}{c_{pn} \bar{D}} \cdot \frac{\bar{T}R}{P} \cdot \ln\left(1 + \frac{c_{pn} \cdot (t_r - t_k^{ct})}{\Delta H_{вип}^{ct}}\right). \quad (A.45)$$

Якщо ввести величину

$$A \equiv \frac{Nu_T}{Nu_D} \cdot \frac{\bar{\lambda}}{c_{pn} \bar{D}} \cdot \frac{\bar{T}R}{P} \cdot \ln\left(1 + \frac{c_{pn} \cdot (t_r - t_k^{ct})}{\Delta H_{вип}^{ct}}\right), \quad (A.46)$$

то рівнянню (A.45) можна надати вид:

$$P_s(t_k^{ct}) = (P - P_{n0}) \cdot (1 - \exp(-A)) + P_{n0},$$

або інакше

$$t_k^{ct} = t_s[(P - P_{n0}) \cdot (1 - \exp(-A)) + P_{n0}], \quad (A.47)$$

де $t_s(P_n)$ - температура насичення пари при заданому значенні парціального тиску P_n парової складової парогазової суміші (ця температура ще називається точкою роси), °C.

У разі малих значень параметра A ($A \ll 1$) рівняння (A.47) набуває дещо простішого виду:

$$t_k^{ct} = t_s(P \cdot A + P_{n0}). \quad (A.48)$$

Рівняння (A.47) (або (A.48)) можна вирішити методом послідовних наближень, беручи в якості нульового наближення температури краплі, наприклад, середнє з можливих значень $t_s(P_n)$ в інтервалі P_n від 0 до $P \approx 10^5$ Па, тобто вважати, що $t_k^{ct(0)} \approx 50^\circ\text{C}$. В такому випадку формула для визначення нульового наближення параметра A (A.46) має вид:

$$A^{(0)} = \frac{0,80}{\sqrt{1 + \frac{t_r + 50}{546}}} \cdot \ln \left(1 + 0,93 \cdot \frac{t_r - 50}{1000} \right). \quad (A.49)$$

При записі (A.49) приймалося, що середні параметри парогазового середовища у приповерхневому шарі краплі дорівнюють: коефіцієнт теплопровідності $\bar{\lambda} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, тиск $P = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$; ізобарна теплоємність пари $c_{pH} = 38 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, питома теплота пароутворення $\Delta H_{\text{вип}}^{\text{ст}} = 41 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1}$, температура

$$\bar{T} = \frac{T_r + T_k}{2} = 273 + \frac{t_r + t_k}{2}, \text{ К},$$

коефіцієнт дифузії

$$\bar{D} = 2,2 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{\bar{T}}{273} \right)^{1,5}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Формула (A.49) демонструє, що межі малих значень параметра A ($A \ll 1$) відповідає область відносно малих температур газового середовища:

$$\frac{t_r - t_k}{1000} \ll 1. \quad (A.50)$$

Температура краплі в першому наближенні оцінюється співвідношенням:

$$t_{\kappa}^{ct(1)} = t_s \left[(P - P_{n0}) \cdot (1 - \exp(-A^{(0)})) + P_{n0} \right], \quad (A.51)$$

яке у разі виконання умови (A.50) спрощується до

$$t_{\kappa}^{ct(1)} = t_s (P \cdot A^{(0)} + P_{n0}).$$

Величину швидкості зменшення площі поверхні краплі у стаціонарному цьому режимі зручно оцінювати, беручи за основу вираз:

$$G(t_{\kappa}^{ct}) = 4\pi Nu_T \cdot \frac{\bar{\lambda} \mu_B}{c_{p\pi} \rho_B} \cdot \ln \left(1 + \frac{c_{p\pi} \cdot (t_{\Gamma} - t_{\kappa}^{ct})}{\Delta H_{\text{вип}}^{ct}} \right), \quad (A.52)$$

який можна отримати з формул (A.38) і (A.44).

Чисельна оцінка величини (A.52) з параметрами оцінки (A.49), за умови $Nu_T = 2$, має вид:

$$G(t_{\kappa}^{ct})^{(i)} = 3,6 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left(1 + 0,93 \cdot \frac{t_{\Gamma} - t_{\kappa}^{ct(i)}}{1000} \right), \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad (A.53)$$

який за умови (A.50) спрощується до

$$G(t_{\kappa}^{ct})^{(i)} = 3,3 \cdot 10^{-10} \cdot [t_{\Gamma} - t_{\kappa}^{ct(i)}], \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}. \quad (A.54)$$

Індекс "i" у формулах відображає наближення (так $t_{\kappa}^{ct(0)} \approx 50^\circ\text{C}$, а $t_{\kappa}^{ct(1)}$ розраховується за формулою

(A.51)).

Оцінка часу виходу на стаціонарний режим τ_0 виконується на основі формули (A.43), що вимагає визначення величини параметра β (A.41). В ході розрахунку останнього зручно використовувати умову (A.39). Таким чином:

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{3}{2} \cdot \frac{G(t_K)}{c_{pB}} \left\{ \frac{c_{pП}}{\exp(B) - 1} + \frac{\partial \Delta H_{\text{вип}}}{\partial t_K} \right\} \bigg|_{t_K = t_K^{\text{ст}}} + \\ &+ \frac{3}{2} \cdot \frac{G(t_K)}{c_{pB}} \left\{ \frac{c_{pП} \cdot (t_{\Gamma} - t_K)}{(\exp(B) - 1)^2} \exp(B) \frac{\partial B}{\partial t_K} \right\} \bigg|_{t_K = t_K^{\text{ст}}} = \\ &= \frac{3}{2} \cdot \frac{G(t_K)}{c_{pB}} \left\{ \frac{\Delta H_{\text{вип}}}{t_{\Gamma} - t_K} + c_{pП} - c_{pB} \right\} \bigg|_{t_K = t_K^{\text{ст}}} + \\ &+ \frac{3}{2} \cdot \frac{G(t_K)}{c_{pB}} \left\{ \Delta H_{\text{вип}} \left[1 + \frac{\Delta H_{\text{вип}}}{c_{pП} \cdot (t_{\Gamma} - t_K)} \right] \frac{\partial B}{\partial t_K} \right\} \bigg|_{t_K = t_K^{\text{ст}}} . \quad (\text{A.55}) \end{aligned}$$

Основна частина похідної $\partial B / \partial t_K$, згідно з співвідношенням (A.38), дорівнює:

$$\left. \frac{\partial B}{\partial t_K} \right|_{t_K=t_K^{CT}} = \frac{Nu_D}{Nu_T} \cdot \frac{\bar{D}}{\bar{\lambda}} \cdot \frac{P}{TR} \cdot \frac{\partial}{\partial t_K} \left[\ln \left(\frac{P - P_{n0}}{P - P_s(t_K)} \right) \right] \Big|_{t_K=t_K^{CT}} =$$

$$= \frac{\alpha' \cdot \frac{\partial P_s}{\partial t_K}}{P - P_s(t_K)} \Big|_{t_K=t_K^{CT}} \quad (A.56)$$

де $\alpha' \equiv \frac{Nu_D}{Nu_T} \cdot \frac{\bar{D}}{\bar{\lambda}} \cdot \frac{P}{TR} \Big|_{t_K=t_K^{CT}}.$

Додаток А. Випаровування водяних крапель у газо-
вому середовищі 207

Підставляючи у (A.56) чисельні значення величин, отримаємо залежність:

$$\alpha' = 1,23 \cdot \sqrt{\frac{\bar{T}}{273}},$$

яка дає змогу зробити оцінку:

$$\left. \frac{\partial B}{\partial t_K} \right|_{t_K=t_K^{CT}} = 1,23 \cdot \sqrt{\frac{\bar{T}}{273}} \cdot \frac{\frac{\partial P_s}{\partial t_K}}{P - P_s(t_K)} \Big|_{t_K=t_K^{CT}} > 1 \cdot 10^{-2}, K^{-1}.$$

Остання нерівність дозволяє стверджувати, що з точністю ~10% формула (А.55) має вид:

$$\beta = \frac{3}{2} \cdot \frac{G(t_K)}{c_{pB}} \Delta H_{\text{вип}} \left[1 + \frac{\Delta H_{\text{вип}}}{c_{pII} \cdot (t_{\Gamma} - t_K)} \right] \cdot \frac{\alpha' \cdot \frac{\partial P_s}{\partial t_K}}{P - P_s(t_K)} \bigg|_{t_K = t_K^{\text{CT}}}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$$

або у числах

$$\beta = 3,6 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{\bar{T}}{273}} \ln \left(1 + 0,93 \frac{t_{\Gamma} - t_K^{\text{CT}}}{1000} \right) \left(1 + \frac{1,1 \cdot 10^3}{t_{\Gamma} - t_K^{\text{CT}}} \right) \bigg|_{t_K = t_K^{\text{CT}}} \times$$

$$\times \frac{100 \frac{\partial P_s}{\partial t_K}}{P - P_s(t_K)} \bigg|_{t_K = t_K^{\text{CT}}}$$

У разі відносно малої температури газового середовища (див. (А.50)) останній вираз спрощується до:

$$\beta = 3,6 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{\bar{T}}{273}} \cdot \frac{100 \cdot \frac{\partial P_s}{\partial t_K}}{P - P_s(t_K)} \bigg|_{t_K = t_K^{\text{CT}}}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Додаток В

Об'єкт і площа його горіння	Витрата розчину змочувача НП-1, л	Час гасіння, хв.	Питома витрата, л·м ⁻²	Інтенсивність подачі розчину, л·сек ⁻¹ м ⁻¹
Бавовна в стосах (30 стосів), вага кипи 200 кг. Загальна площа горін- ня 30 м ²	2150	20	71,7	0,06
Вата в стосах (26 стосів). Загальна площа горіння 65 м ²	2150	18	65	0,06
Папір у рулонах, що зберігався у дощатій прибудові. Загальна площа горіння 62 м ²	2150	10,5	34	0,054
Склад папера. Площа горіння 55 м ² .	2150	10,5	39	0,062
Клоччя в тюках. Площа горіння 60 м ²	4970	30	82,8	0,046
Житловий будинок. Горіли решету- вання, крокви, підшивка, утеплювач на площі 60 м ²	2100	10,3	35,0	0,056
Житловий будинок. Горіли пере- криття третього і четвертого повер- хів із площею 46 м ² і перегородки на площі 26 м ²	2100	10,5	29,0	0,046
Житловий будинок. Горіли пере- криття третього поверху, перегород- ки третього і четвертого поверхів. Загальна площа горіння 50 м ²	2000	11	40	0,06
Житловий будинок (рубані стіни, перегородки, перекриття). Площа горіння 80 м ²	2090	15	26,1	0,021

Житловий будинок (перегородка і підлога). Площа горіння 9 м ²	130	4	14,4	0,06
Житловий будинок (перегородки і меблі). Площа горіння 50 м ² .	1980	15	39,6	0,44
Дерев'яні сараї. Площа горіння 40 м ²	2100	10,3	52,5	0,084
Дерев'яні сараї. Площа горіння 50 м ²	2150	10,5	43	0,068
Дерев'яні сараї. Площа горіння 100 м ²	2000	10	20	0,033
Горище дерев'яного будинку. Площа горіння 120 м ²	2000	5	11,7	0,039
Горище житлового будинку. Площа горіння 60 м ²	1860	12	1	0,043
Шафи з газетами, фототекою, сте- лаж із книгами, меблі. Площа го- ріння 20 м ²	1000	10	25	0,04
Меблі, перекриття житлової кімна- ти. Площа горіння 22 м ² .	840	4	38	0,158
Дощатий сарай. Площа горіння 30 м ² .	500	5	16,6	0,055
Дощатий сарай із дровами. Площа горіння 50 м ²	2090	12	41,76	0,058
Дощатий сарай (дрантя, мішки, па- пір). Площа горіння 30 м ²	415	10	13,8	0,023
Завод синтетичних ароматичних речовин. Горів метиловий ефір а-нафтолу на площі 20 м ²	1200	15	60	0,064

Додаток С. Розрахунок швидкості конденсації пари на вертикальній стіні

У даному додатку буде показано, як розраховується величина стаціонарного потоку пари в пароповітряній суміші при її конденсації на вертикальній стінці в умовах природної конвекції. З цією метою буде розглянута система рівнянь гідродинаміки і теплопереносу, що описують стаціонарне поведіння пароповітряної суміші. У геометрії рис. 2.10 дана система має вид:

$$\rho w_x \frac{\partial m_1}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial m_1}{\partial y} = D \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{\partial m_1}{\partial x} \right), \quad (C.1)$$

$$\rho w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} = \mu \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + g (\rho - \rho_0), \quad (C.2)$$

$$\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} = 0, \quad (C.3)$$

$$\rho c_p w_x \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c_p w_y \frac{\partial T}{\partial y} - \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0, \quad (C.4)$$

де ρ і ρ_0 - густина пароповітряної суміші, відповідно, у довільній точці і точці, віддаленої від стіни, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ (доданок із густинами у рівнянні (C.2) враховує зміну гідростатичного тиску);

w_x, w_y - відповідні компоненти швидкості руху суміші, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$;

m_1 - масова частка пари у пароповітряній суміші;

μ - коефіцієнт динамічної в'язкості суміші, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$;

g - прискорення вільного падіння ($g = 9,81 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$);

c_p – питома ізобарна теплоємність пароповітряної суміші, Дж·кг⁻¹·К⁻¹;

λ – коефіцієнт теплопровідності пароповітряної суміші, Вт·м⁻¹·К⁻¹.

В області тисків і температур, що мають місце при гасінні, пароповітряна суміш із достатнім ступенем точності задовольняє рівнянню стану ідеального газу:

$$\rho = \frac{P \mu}{R T}, \quad (C.5)$$

де μ – молекулярна маса суміші, кг·кмоль⁻¹

Молекулярна маса суміші зв'язана з масовим складом пароповітряної суміші:

$$\mu = \frac{1}{\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2}}, \quad (C.6)$$

де m_1 – масова частка водяної пари в суміші (вологому повітрі);

m_2 – масова частка сухого повітря в суміші ($m_2 = 1 - m_1$);

μ_1 і μ_2 - відповідно, молярні маси водяної пари й повітря ($\mu_1 = 18$ кг·кмоль⁻¹, $\mu_2 = 29$ кг·кмоль⁻¹).

Скористаємося незначним вмістом водяної пари в суміші, тобто

$$m_1 \ll 1. \quad (C.7)$$

У цьому наближенні формула (C.6) приймає вид:

$$\mu = \mu_2 \left(1 + m_1 \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \right). \quad (C.8)$$

Останнє співвідношення дозволяє, використовуючи рівняння стану (C.5), привести доданок із густинами у правій частині виразу (C.2) до виду:

$$g(\rho - \rho_0) = g\rho_0 \left(\frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} (m_{10} - m_1) + \frac{T_0 - T}{T_0} \right), \quad (C.9)$$

де m_{10} – масова частка пари в суміші;

T_0 – абсолютна температура суміші удалині від поверхонь конденсації.

При написанні формули (C.9) природно передбачається відносно мала зміна температури суміші при русі від поверхні конденсації всередину приміщення.

З урахуванням прийнятих допущень система (C.1) – (C.4) приймає вид:

$$w_x \frac{\partial m_1}{\partial x} + w_y \frac{\partial m_1}{\partial y} = D \frac{\partial^2 m_1}{\partial x^2}, \quad (C.10)$$

$$w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} = v \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + g \left[\frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} (m_{10} - m_1) + \frac{T_0 - T}{T_0} \right], \quad (C.11)$$

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0, \quad (C.12)$$

$$w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} = a_t \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (C.13)$$

де $\nu = \frac{\mu}{\rho_0}$ – коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;

$\alpha_t = \frac{\lambda}{\rho_0 \cdot c_p}$ – коефіцієнт теплопроводності суміші

у глибині x від поверхні конденсації, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Систему (С.10) – (С.12) необхідно доповнити граничними умовами. Так, граничними умовами в глибині суміші ($x = \infty$) є завдання значень шуканих перемінних:

$$m_1(\infty, y) = m_{10}, \quad T(\infty, y) = T_0, \quad w_y(\infty, y) = 0 \quad (\text{С.14})$$

і, можливо, величини потоків пари і тепла в напрямку стінки. Дані потоки у глибині від стінки мають чисто конвекційну природу і тому

$$j_x(\infty, y) = \rho_0 \cdot w_x(\infty, y) = j_{x0}, \quad (\text{С.15})$$

$$q_x(\infty, y) = c_p \cdot j_x(\infty, y). \quad (\text{С.16})$$

Більш складним є питання про граничні умови на границі парогазової суміші й конденсату (при написанні граничних умов для газової фази можна вважати, що границі газу з конденсатом відповідає вертикальна площина з $x = 0$). Для швидкості це звичайна умова прилипання, тобто вимога збігу компонентів швидкостей суміші й конденсату дотичних до поверхні розділу фаз:

$$w_y(0, y) = w_{y,k}(0, y). \quad (\text{С.17})$$

Тут і далі індекс "к" указує на приналежність до конденсату.

Наступною умовою є збереження потоку води через границю, що являє собою варіант співвідношення (2.67).

З урахуванням того, що поперечний компонент швидкості суміші нехтовно малий ($\mathbf{w}_x(0,y) \approx 0$), це співвідношення має вид:

$$-\rho_0 D \frac{\partial m_1}{\partial x} = j_{x,k}(0,y) , \quad (C.18)$$

де $j_{x,k}(0,y)$ – густина потоку конденсату на границі із сумішшю.

Також потрібно витримати неперервність температури – збіг температур суміші і конденсату на границі:

$$T(0, y) = T_k(0, y). \quad (C.19)$$

Наступною вимогою, яку ми не будемо виписувати в яв-ному виді, є збільшення густини потоку тепла на границі на величину тепловиділення, зв'язаного з конденсацією.

Замикає граничні умови обмеження на парціальний тиск пари:

$$m_1(0,y) \frac{\mu}{\mu_1} P = P_s(t(0,y)) . \quad (C.20)$$

Це обмеження відображає ту обставину, що пара води на поверхні конденсату є насиченою.

Як впливає з граничних умов, розгляд ситуації у суміші вимагає знання характеристик конденсату на границі із сумішшю. У такий спосіб необхідно спільно вирішувати задачі про тепломасообмін й у суміші, і у конденсаті, причому при розв'язанні задачі про конденсат необхідно залучати граничні умови на границі конденсату зі стінкою. Ми не будемо формулювати тут відому задачу Нуссельта про стікання конденсату по плоскій стінці (її рішення відображено формулою (2.64).)

Як уже було відзначено раніше, аналіз показує, що в основному наближенні можна розділити задачі про течію конденсату і суміші. При цьому при розгляді суміші можна припускати, що температура на границі конденсату із сумішшю збігається з температурою поверхні стінки, тобто умова (С.19) має вид:

$$T(0, y) = T_c(y). \quad (C.21)$$

Крім того, через те, що характерна швидкість суміші значно перевищує швидкість конденсату, то граничній умові (С.17) можна надати більш простого виду:

$$w_x(0, y) = w_y(0, y) = 0. \quad (C.22)$$

Для рішення системи (С.10) – (С.13) використовується наближення інтегрального шару. В основі його лежить наступна обставина. Тепломасообмін пароповітряної суміші з конденсатом супроводжується утворенням у пристінній області шарів: температурного (товщиною $\delta_T(y)$) і дифузійного (товщиною $\delta_D(y)$) (див. рис. С1). У межах цих шарів у напрямку поперек шару відбувається зміна параметрів суміші: температури (при $0 < x < \delta_T(y)$), а також швидкості, суміші й концентрації пари в ній (при $0 < x < \delta_D(y)$) від значень у глибині до значень на поверхні (у даному випадку на поверхні конденсату). За межами шарів параметри вважаються постійними й рівними своїм об'ємним значенням. Відношення товщини шарів залежить від величини критерію Льюїса суміші $Le = a_t/D$. Так, за умови $Le = 1$ вони збігалися б: $\delta_T(y) = \delta_D(y)$. У даній ситуації $Le \approx 0,6$ і тому, як буде показано далі, $\delta_T(y) \approx 0,8 \cdot \delta_D(y)$.

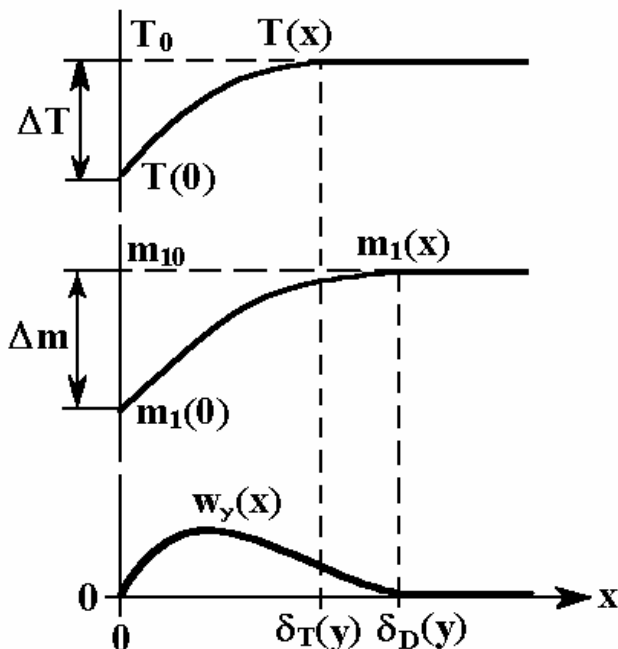


Рис. С1 - Залежності масової частки пари ($m_1(x)$), температури ($T(x)$) і вертикального компонента швидкості ($w_y(x)$) суміші від поперечної координати x при фіксованому значенні вертикальної координати y

Для опису процесів у шарі система диференціальних рівнянь (С.10) – (С.13) замінюється на їхні інтегральні аналоги - закони збереження відповідних фізичних величин у шарі в цілому. При такому підході граничні умови системи (С.10)-(С.13) враховуються автоматично в ході написання меж. Рішення відповідних рівнянь шукаються у виді поліномів від змінної " $x/\delta_D(y)$ " (або " $x/\delta_T(y)$ " для температури) із невизначеними коефіцієнтами, що є (так само, як і товщини шарів δ_D та δ_T) степеневими функціями подовжньої координати " y " з невизначеними значеннями показників степеня. Значення показників

знаходяться з вимоги виконання інтегральних законів збереження в шарі.

На першому кроці вирішення рівняння (С.12) записується в інтегральній формі з урахуванням граничної умови (С.22) ($w_x(0, y) = 0$):

$$w_x(x, y) = - \int_0^x \frac{\partial w_y(x', y)}{\partial y} dx', \quad (C.23)$$

що дозволяє надалі звільнитися в співвідношеннях від поперечного компонента швидкості суміші.

На наступному кроці з урахуванням формули (С.23) рівняння (С.10), (С.11), (С.13) інтегруються в межах шару зміни швидкостей (тобто від 0 до $\delta_D(y)$). При перетвореннях вважається, що на зовнішній границі шарів (тобто при $x = \delta_D(y)$ у разі швидкості і концентрації та при $x = \delta_T(y)$ у разі температури) величини параметрів дорівнюють своїм об'ємним значенням (С.14). У результаті виходить система рівнянь:

$$\begin{aligned} \int_0^{\delta_D} \frac{\partial w_y^2(x, y)}{\partial y} dx = v \frac{\partial w_y}{\partial x} \Big|_0^{\delta_D} + g \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \int_0^{\delta_D} (m_{10} - m_1) dx + \\ + \frac{g}{T_0} \int_0^{\delta_T} (T_0 - T) dx, \end{aligned} \quad (C.24)$$

$$\int_0^{\delta_D} \frac{\partial [(m_{10} - m_1) w_y]}{\partial y} dx = -D \frac{\partial m_1}{\partial x} \Big|_0^{\delta_D}, \quad (C.25)$$

$$\int_0^{\delta_T} \frac{\partial [(T_0 - T) w_y]}{\partial y} dx = -a_t \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_0^{\delta_T}. \quad (C.26)$$

Вирішення рівнянь (С.24) - (С.26) починається з припущення, що залежності частки пари й температури від поперечної координати "x" у відповідних (дифузійному й температурному) перехідних шарах є поліномами другого порядку. При цьому вважається, що на зовнішній границі дифузійного шару, тобто при $x = \delta_D(y)$, масова частка пари досягає об'ємного значення m_{10} і далі не змінюється:

$$m_1(x, y) = m_{10},$$

крім того, виконується вимога:

$$\frac{\partial m_1}{\partial x} = 0.$$

У такому разі у дифузійному шарі залежність масової частки пари від поперечної координати описується формулою:

$$m_1(x, y) = m_{10} - \Delta m \cdot \left[1 - \frac{x}{\delta_D(y)} \right]^2, \quad (C.27)$$

де $\Delta m = m_{10} - m_1(0, y)$ - зміна масової частки пари при переміщенні з об'єму до поверхні конденсації (див. рис. С1).

Аналогічно змінюється температура. На зовнішній границі температурного шару відбувається плавний перехід температури до її постійного об'ємного значення, тобто при $x = \delta_T(y)$ виконуються співвідношення:

$$T(x, y) = T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0.$$

У зв'язку з цим температурна залежність у шарі описується формулою:

$$T(x, y) = T_0 - \Delta T \cdot \left[1 - \frac{x}{\delta_T(y)} \right]^2, \quad (C.28)$$

де $\Delta T = T_0 - T(0, y)$ – зміна температури при переміщенні з об'єму до поверхні конденсату (рис. С1).

Температура і масова частка пари на границі з конденсатом зв'язані між собою співвідношенням (C.20). Як уже відзначалося, в основному наближенні виконується формула (C.21). Тому надалі, вважаючи температуру стінки (T_c) сталою, ми повинні в співвідношеннях (C.27), (C.28) припускати незмінність величин Δm і ΔT . Остання обставина дозволяє, помінявши порядок інтегрування по "x" і диференціювання по "y" і врахувавши умову $w_y(\delta_D(y), y) = 0$, привести систему рівнянь (C.24) – (C.26) до більш простого виду:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dy} \left[\int_0^{\delta_D} w_y^2(x, y) dx \right] &= v \frac{\partial w_y}{\partial x} \Big|_0^{\delta_D} + \frac{g}{3} \left[\frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \Delta m \delta_D(y) \right] + \\ &+ \frac{g}{3} \left[\frac{\Delta T}{T_0} \delta_T(y) \right], \end{aligned} \quad (C.29)$$

$$\frac{d}{dy} \left[\int_0^{\delta_D} w_y(x, y) \left(1 - \frac{x}{\delta_D(y)} \right)^2 dx \right] = 2 \frac{D}{\delta_D(y)}, \quad (C.30)$$

$$\frac{d}{dy} \left[\int_0^{\delta_T} w_y(x, y) \left(1 - \frac{x}{\delta_T(y)} \right)^2 dx \right] = 2 \frac{a_t}{\delta_T(y)}. \quad (C.31)$$

Залежність подовжнього компонента швидкості суміші ($\mathbf{w}_y(\mathbf{x}, y)$) від координат шукаємо у виді довільного кубічного полінома по y . Врахування умови (С.22) на границі з конденсатом і плавного занулення подовжньої швидкості на зовнішній границі шару (при $\mathbf{x} = \delta_D(y)$: $\mathbf{w}_y(\mathbf{x}, y) = \mathbf{0}$ і $\partial \mathbf{w}_y / \partial \mathbf{x} = \mathbf{0}$) надає цій залежності форму:

$$\mathbf{w}_y(\mathbf{x}, y) = \mathbf{u}(y) \cdot \frac{\mathbf{x}}{\delta_D(y)} \cdot \left[1 - \frac{\mathbf{x}}{\delta_D(y)} \right]^2. \quad (\text{C.32})$$

Невідома функція $\mathbf{u}(y)$ має сенс характерної швидкості течії суміші уздовж дифузійного перехідного шару. Ця функція, як і товщини перехідних шарів $\delta_D(y)$ і $\delta_T(y)$, шукається за допомогою підстановки співвідношення (С.32) у систему рівнянь (С.29) – (С.31). У результаті виходять співвідношення:

$$\frac{d}{dy} \left(\frac{u^2 \delta_D}{105} \right) = -v \frac{u}{\delta_D} + \frac{g}{3} \left[\frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \Delta m \delta_D + \frac{\Delta T}{T_0} \delta_T \right], \quad (\text{C.33})$$

$$\frac{d}{dy} \left(\frac{u \delta_D}{30} \right) = 2 \frac{D}{\delta_D}, \quad (\text{C.34})$$

$$\frac{d}{dy} \left\{ \frac{u \delta_T^2}{60 \delta_D} \left[5 - 4 \frac{\delta_T}{\delta_D} + \left(\frac{\delta_T}{\delta_D} \right)^2 \right] \right\} = 2 \frac{a_t}{\delta_T}. \quad (\text{C.35})$$

Вирішення системи (С.33) - (С.35) шукаємо у виді ступенів подовжньої координати y :

$$\mathbf{u}(y) = \mathbf{a}_1 y^{n_1}, \delta_D(y) = \mathbf{a}_2 y^{n_2}, \delta_T(y) = \mathbf{a}_3 y^{n_3}, \quad (\text{C.36})$$

з невизначеними коефіцієнтами $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$, $\mathbf{a}_3$ і ступенями $\mathbf{n}_1$, $\mathbf{n}_2$, $\mathbf{n}_3$. Підстановка (С.36) у (С.33) - (С.35) перетворює систему диференціальних рівнянь на алгебраїчну, причому відразу ж дозволяє визначити значення ступенів:

$$\mathbf{n}_1 = 1/2, \quad \mathbf{n}_2 = \mathbf{n}_3 = 1/4. \quad (\text{С.37})$$

Товщини температурного й дифузійного шарів виявляються подібними, а їхнє відношення $\mathbf{b} = \delta_{\text{T}}/\delta_{\text{D}} = \mathbf{a}_3/\mathbf{a}_2$ задовольняє рівнянню:

$$\mathbf{b}^3 \cdot (\mathbf{b}^2 - 4 \cdot \mathbf{b} + 5) = 2 \cdot \text{Le}, \quad (\text{С.38})$$

де $\text{Le} = \mathbf{a}_t / \mathbf{D}$ – критерій Льюїса.

Відповідно до рівняння (С.38) відношення товщин шарів ($\mathbf{b}$) являє собою монотонно зростаючу функцію параметра Le . При $\text{Le} = 1$ товщини температурного й дифузійного шарів збігаються ($\mathbf{b}(1) = 1$), при $\text{Le} = 0,59$ (що відповідає температурі пароповітряної суміші $t = 100^\circ\text{C}$) $\mathbf{b}(0,59) \approx 0,78$, при $\text{Le} = 0,57$ (що відповідає температурі суміші $t = 60^\circ\text{C}$) $\mathbf{b}(0,57) \approx 0,77$.

Коефіцієнти $\mathbf{a}_1$ і $\mathbf{a}_2$ задовольняють системі рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\mathbf{a}_1^2 \mathbf{a}_2}{84} &= -\nu \frac{\mathbf{a}_1}{\mathbf{a}_2} + \mathbf{f} \mathbf{a}_2, \\ \frac{\mathbf{a}_1^2 \mathbf{a}_2}{80} &= \frac{\mathbf{D}}{\mathbf{a}_2}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{С.39})$$

у якій уведені позначення:

$$\mathbf{f} = \frac{\mathbf{g}}{3} \cdot \left(\frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \Delta \mathbf{m} + \mathbf{b} \frac{\Delta \mathbf{T}}{\mathbf{T}_0} \right). \quad (\text{С.40})$$

Рішення системи має вид:

$$a_1 = \left(80 \frac{f}{\frac{20}{21} + \text{Pr}_D} \right)^{1/2}, \quad (\text{C.41})$$

$$a_2 = D^{1/2} \left(80 \frac{\frac{20}{21} + \text{Pr}_D}{f} \right)^{1/4}, \quad (\text{C.42})$$

де Pr_D – дифузійний критерій Прандтля ($\text{Pr}_D = \nu/D$) (інша його назва – число Шмідта Sc).

Вираз із визначення густини потоку водяної пари, що падає в конденсат, можна записати, використовуючи співвідношення (C.18) і (C.27):

$$j_x(0, y) = -2 \rho_0 D \cdot \frac{\Delta m}{\delta_D(y)}. \quad (\text{C.43})$$

Тоді середнє її значення на ділянці висотою L , відраховуючи від верхнього краю стіни, з урахуванням формул (C.36), (C.37), (C.43), представимо у виді:

$$j_{\text{сер}} = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L j_x(0, y) dy = -2 \rho_0 \cdot D \cdot \frac{\Delta m}{L} \cdot \int_0^L \frac{dy}{a_2 y^{1/4}},$$

що з урахуванням співвідношення (C.42) після інтегрування дає:

$$j_{\text{сер}} = -\text{Nu}_{\text{D.сер}} \cdot \rho_0 \cdot D \cdot \frac{\Delta m}{L}, \quad (\text{C.44})$$

де $\text{Nu}_{\text{D.сер}}$ – середнє значення дифузійного критерію Нуссельта (інша назва – число Шервуда **Sh**), який можна записати у виді:

$$\text{Nu}_{\text{D.сер}} = \frac{4}{3 \cdot 15^{1/4}} \left[\text{Ga} \text{Pr}_{\text{D}}^2 \frac{\frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1} \Delta m + b \frac{\Delta T}{T_0}}{\frac{20}{21} + \text{Pr}_{\text{D}}} \right]^{1/4}, \quad (\text{C.45})$$

де $\text{Ga} = \frac{g L^3}{\nu^2}$ – критерій Галілея.

Знак "-" у виразах типу (C.44) указує на те, що потік спрямовано у бік зменшення координати x , тобто до поверхні конденсації.

Формули (C.44), (C.45) можна привести до виду більш зручного для використання. По-перше, врахуємо, що в практиці пожежогасіння водяною парою звичайно проходить при атмосферному тиску, тому, використовуючи формулу (C.5), виключимо густину зі співвідношення (C.44). При цьому будемо вважати, що тиск збігається з нормальним $P_0 = 101,3$ кПа.

По-друге, вміст пари будемо виражати в об'ємних частках r_1 , використовуючи для цього відому перерозрахункову формулу суміші ідеальних газів:

$$\Delta m = \frac{\mu_1}{\mu} \Delta r \approx \frac{\mu_1}{\mu_2} \Delta r = \frac{18}{29} \Delta r,$$

де Δr – зміна об'ємної частки пари при русі суміші з глибини до поверхні конденсату, оцінюється співвідношенням:

$$\Delta r = r_{10} - \frac{P_s(t_c)}{P_0}. \quad (C.46)$$

По-третє, врахуємо плавну зміну коефіцієнта дифузії при зміні температури суміші. Для пари води в повітрі така наближена залежність має вид:

$$D \approx 3,31 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,8}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}. \quad (C.47)$$

По-четверте, скористаємося тим, що залежність параметрів b і Pr_D від температури слабка. Будемо вважати, що $b = 0,78$, а $Pr_D = 0,40$.

Підсумкова формула буде мати вид:

$$j_{сер} = -0,71 \cdot 10^{-2} \frac{\Delta r}{L^{0,25} T_0^{0,1}} \left(\Delta r + 2,1 \frac{\Delta T}{T_0} \right)^{0,25}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (C.48)$$

де $\Delta T = T_0 - T_c$ - різниця між температурою суміші в глибині об'єму й температурою поверхні стінки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмичев И.И., Волохов В.В. Тушение пожаров и работа пожарной охраны. – В кн.: Вопросы экономики в пожарной охране: Сб. тр. М.: ВНИИПО, 1978, вып.7, с. 89-96.
2. Минаев С.Н., Сон Э.Г. Анализ статистики пожаров. – В кн.: Вопросы экономики в пожарной охране: Сб. тр. М.: ВНИИПО, 1980, вып.8, с. 88-108.
3. Синюков В.В. Структура одноатомных жидкостей, воды и водных растворов электролитов. – М.: Наука, 1976.
4. Справочник химика, том II Основные свойства неорганических и органических соединений: – Л., Ленинградское отделение Госхимиздата, 1963.
5. Шрайбер Г., Прост П. Огнетушащие средства. М.: Стройиздат, 1975.– 262 с
6. Жидкостные средства пожаротушения (обзор зарубежных изобретений) М.: ВНИИПО МВД СССР, 1979. – 66 с.
7. Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е.В. Процессы горения: – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1983.
8. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980.
9. В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. Сушка дисперсных материалов.-М.: Химия, 1988. 352 с.
10. А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. Гидравлика и аэродинамика: Учеб. для вузов.- М.: Стройиздат, 1987, 414 с.
11. Полищук Д.И. Испарение капель воды при температурах среды, превышающих температуру кипения. // Ж.Т.Ф., т. XXIII, вып. 12, 1953. С.2151-2158.
12. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. – М.: АН СССР, 1961. – 206 с.
13. Кореневский А.Н., Безродный И.Ф. Тактические особенности тушения вскипающих углеводородов. – В кн.: Тактика и процессы пожаротушения.: Сб. тр. М.: ВНИИПО, 1989, с.100-106.

14. Борович А.М., Корневский А.Н., Шариков А.В. Выбор оптимальных параметров распыленной воды для тушения горючих водонерастворимых жидкостей. – В кн.: Пожаротушение на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности: Сб. тр. М.: ВНИИПО, 1991, с.58-63.

15. Аксенов В.П., Ройко В.М., Гришин В.В. Экспериментальное исследование тушения пламени горючих жидкостей распыленной водой. Материалы VI Всесоюзной науч.-практ. конф. Горение и проблемы тушения пожаров. – М.: ВНИИПО, 1979, – С. 240-246.

16. Петров И.И., Реутт В.Ч. Тушение пламени горючих жидкостей: – М.: Изд-во МКХ РСФСР, 1961.- 143 с.

17. И.М. Абдурагимов Огнетушащие средства и способы их применения. // Журн. Всесоюзного хим. об-ва им. Д.И. Менделеева, 1976. т. 21, №4.

18. Козлов В.Н. Пиролиз древесины: – М., Изд-во АН СССР, 1962.

19. Росляков В.И., Гришин В.В., Аксенов В.П. Экспериментальное исследование тушения пламени твердых горючих материалов. – В кн.: Горение и проблемы тушения пожаров: Тезисы VI Всесоюзной научн.-практич. Конф. М.:ВНИИПО, 1979, с.234-239.

20. Bryan I. and Smith D.N. The effect of chemicals in water solution of fire extinction.- I. Eng. Vol.159. Part I, p.457, Part II, p.497, 1945.

21. Stolp M. The extinction of small wood cribs fires in water. – 5-th Int. Fire Protection Seminar. Karlsruhe. September 1976, Vol.2, N 3, p.127-142.

22. Е.Н. Иванов. В сб.: Зарубежная пожарная техника. Вып. 9. М., Из-во лит. по стр-ву, 1966.

23. А.П. Емельянов. Пожарное дело, № 4, 23 (1975).

24. Абдурагимов И.М., Яворский Г.Я. О возможности повышения огнетушащей эффективности воды путем совершенствования способов ее подачи в зону горения при тушении пожаров. М.: ВИПТШ, вып.4; 1978, с.75-82.

25. И.М. Абдурагимов Критерий тушения пожаров охлаждающими огнетушащими средствами. // Журн. Всесоюзного хим. об-ва им. Д.И. Менделеева, 1982. т. 27, №1. с. 11-17.

26. А.Н. Баратов, Е.Н. Иванов, А.Я. Корольченко. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. - М.: Химия, 1987. - 272 с.

27. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. - М., Химия, 1987. - 434 с.

28. Корольченко А.Я., Шебеко Ю.Н., Иванов А.В., Дмитриева Т.М. Особенности химической кинетики горения и нижние концентрационные пределы распространения пламени // Кинетика и катализ. - 1981.- №4.- С.877-881.

29. Macek A. Flammability Limits: A Re-examination. - Combustion Sci. And Technol., 1979, v.21, N 1/2, p.43-48.

30. А.А. Лебедев, С.Н. Артюнов, А.Е. Сычев. Защита несущих металлоконструкций зданий и сооружений распыленной водой. Проблемы пожарной безопасности зданий и сооружений: Материалы X Всесоюзной науч.-практ.конф. - М.:ВНИИПО, 1990.-264 с.

31. М.С. Волынский. Необыкновенная жизнь обыкновенной капли: - М.: Знание, 1986 -144 с.

32. Шрайбер Г. М. Огнетушащие средства: Химико-физические процессы при горение и тушении. – М.: Стройиздат, 1975. – 240 с.

33. Smith D.P. Water mist Fire suppression on systems. // Fire Safety Eng. – 1995.– 2, № 2. – P. 100-15.

34. Безродный И.Ф., Пучков С.И., Филиппов В.Д. Расчеты траектории испаряющейся капли в среде с пространственно-неоднородными свойствами // Проблемы пожарной безопасности зданий и сооружений. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1990. – С. 184-185.

35. Абрамов Ю.А., Росоха В.Е., Шаповалова Е.А. Моделирование процессов в пожарных стволах. – Харьков: Фолио, 2001. – 195с.

36. Лебедев А.А., Пучков С.И., Надточий О.В., Кошмаров Ю.А. Теплофизические проблемы противопожарной защиты конструкций распыленной водой: Обзорная информация. – М.: ВНИИПО, 1991. – 90 с.

37. Пучков С.И., Лебедев А.А., Филиппов В.Д. О расчете параметров тушения пожаров горючих жидкостей распыленной водой // Теоретические и экспериментальные основы пожаротушения – М.: ВНИИПО, 1992. – С. 14-18.

38. Huoneistopalon sammuttamisen vesi -. // Palontorjuntatekniikka.– 1993.–23, #2.–S. 30-34.

39. В.И. Еремин, С.М. Дымов, С.Г. Цариченко, С.В. Корпачев. Оценка использования переносного средства импульсной подачи мелкораспыленной воды для тушения пожаров. // Пожаровзрывобезопасность. 1996. №2 с.23-24.

40. Ramsden N. Water mist – a status update. // Fire Prev. – 1996, №287. – P. 16-20

41. Quantensprung beim Wasser? // Brandschutz. – 1995. – 49, № 8. – S.534-537.

42. Lackbrände mit Wasser löschen. // Coating. – 1996. – 29, № 10. – S.393-394.

43. Rasbash D.I. The extinction of fires by water sprays. // Fire research abstracts and reviews, 1962, Vol.4, N1,2, p.28-53.

44. Mc Kay R.S. Fine water spray – halon replacement option. // Fire Sureyor.–1993.– №3. – P.10-15.

45. Smith D.P. Water mist Fire suppression on systems. // Fire Safety Eng. – 1995.– 2, № 2. – P. 100-15.

46. Pietrzak M., Ball A.I. Optimization of Mobility using and Fire Supression Performance of Fire Engines Physically Based Computer Simulations.– Fire brand, 1979, №1, p. 1–6.

47. Effektiver. // Bevölkerungsschutz. – 1995, № 4.– S. 24.

48. Bauer G. Wasser Ade? // Osterr. Feuerwehr. – 1997. – № 5. – S. 10-11.

49. Vaisala M. Hi-fog. //Palontorjuntatekniikka.– 1993.–23, №2.–S.20-22.

50. Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. Основы техники распыливания жидкостей. - М.: Химия, 1984.

51. Безродный И.Ф., Шариков А.В., Кузьмин В.Г. Тушение пожаров водой аэрозольного распыла // Проблемы пожарной безопасности зданий и сооружений. Материалы X Всесоюзной научно-практической конференции. М. 1990. – С. 160-162.

52. А.С. 792645 (СССР). Способ тушения пожаров и устройство для его осуществления / Бурштейн Е.Н., Щербина А.В., Черкашин И.И. // Открытия. Изобретения. – 1985. - №45. С. 290.

Патент 9426355 WO, МКИ 6 А62 С 35/02. Устройство для тушения перегретой водой./ O'connell Michael. Оpubл.: 06.05.94.

53. Садхал С., Плессет М. Влияние краевого угла и свойств материала твердой поверхности на капельную конденсацию и испарение капель. // Теплопередача, 1979, т.100, №1, с.57-65.

54. Казаков В.М., Демидов П.Г. Применение смачивателей для тушения пожаров. М., Стройиздат, 1964.

55. Казаков М.В. Применение поверхностно-активных веществ для тушения пожаров. М., Стройиздат, 1977.

56. Былинкин В.А., Шароварников А.Ф., Кузин Г.Е. Исследование процесса тушения резины водными растворами. // Пожарная техника и тушение пожаров: Сб. науч. Тр. М.: ВНИИПО, 1990, - С. 141-145.

57. Панин Е.Н., Гришин В.В., Росляков В.И., Аксенов В.П. Влияние добавок ПАВ на огнетушащую способность воды при тушении пламени горючих жидкостей. // Пожаротушение: Сб. науч. тр. М.: ВНИИПО, 1983, - С. 118-124.

58. Плетенева Н.А., Ребиндер П.А. Влияние поверхностно-активных веществ на испарение капель воды в сфероидальном состоянии. // Журнал физической химии. т. 20, 1946. С. 973-979.

59. Корольченко И.А., Кузьмин В.Г., Егоров А.Н., Зенков С.В. Применение добавок для повышения огнетушащей способности водоаэрозольных установок. // Пожаровзрывобезопасность. - 1998. №2. С. 64–70.

60. Тагер А.А. Физикохимия полимеров. М.: Химия, 1978. 370 с.

61. Казаков М.В., Моисеенко В.М., Одинец М.В. Влияние добавок высокомолекулярных соединений на огнезащитные свойства воды. – В кн.: Пожарная техника и тушение пожаров: Сб. тр. М.: ВНИИПО, 1981, с.112-116.

62. Моисеенко В.М., Дубков П.Ф. Влияние добавок высокомолекулярных соединений на огнетушащие и огнезащитные свойства воды. – В кн.: Теоретические и экспериментальные вопросы пожаротушения.: Сб. тр. М.: ВНИИПО, 1982, с.106-113.

63. Д.Г. Билкун, М.В. Казаков, В.В. Пешков, М.В. Пузако. Тушение древесины водой с низкомолекулярными добавками. // Теоретические и экспериментальные вопросы пожаротушения: Сб. науч.тр.– М.: ВНИИПО, 1982. – С. 99-105.

64. Курбатский Н.П., Красавина Н.Н. Тушение лесных пожаров химическими веществами. Л.: 1954. 31 с.

65. В. Н. Демишев, В.Ф. Наумов. В сб.: Синтетические полиэлектролиты и полимерные дисперсные системы. М., Изд. ВЗМИ, 1973, с. 20.

66. В. Н. Демишев, В. А. Баракова, Л. Г. Сидорова. Изв. вузов. Химия и хим. технол., **13**, 1665 (1970).

67. Г. Моравец. Макромолекулы в растворе. М., "Мир", 1967.

68. Service Bulletin B. F. Gondricli Chemical Company. New York, 1963,

69. А. Ступин, А.Симоненко, Н. Быковская. Применение гидродинамически активных полимерных композиций в пожаротушении // Бюллетень пожарной безопасности. – №2.

70. Н.П. Копылов, В.В. Горностаев, Н.П. Доброхотов. Горение и тушение пожаров на складах лесопиломатериалов: Обзорная информ. – М.: ГНИЦУИ, 1985. – 31 с.

71. Н.П. Копылов, Н.П. Доброхотов, В.А. Угорелов, Л.Г. Козулина. Оценка эффективности воды, растворов бишофита и бентонита при локализации пожаров на складах лесопиломатериалов. // Пожаротушение: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1983. – С. 161-166.

72. Е.Н. Панин, В.М. Ройко, В.А. Козлов. Огнетушащая способность эмульсии воды с низкокипящей водонерастворимой добавкой // Пожаротушение: Сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1983. – С. 112-117.

73. Е.А. Серебренников, Н.П. Копылов, Р.А. Яйлиян К вопросу о водопленочном защитном экране // с.263-266. Материалы XV науч.-практ. конф. Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков. – М.: ВНИИПО, 1999, – С. 240-246.

74. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. 720 с.

75. Иванов Е.Н. Расчет и проектирование систем пожарной защиты. М.: Химия, 1977. 376 с.

ЗМІСТ

<u>Вступ</u>	3
<u>ГЛАВА 1. Властивості води</u>	7
<u>Розділ 1. Фізичні властивості води</u>	7
<u>Розділ 2. Хімічні властивості води</u>	21
<u>Контрольні питання</u>	27
<u>ГЛАВА 2. Механізм припинення горіння водою.</u>	
<u>Вогнегасна ефективність води</u>	28
<u>Розділ 1. Фізико-хімічні основи припинення горіння</u>	28
<u>Розділ 2. Вогнегасний вплив води</u>	34
<u>2.1 Вода як охолоджуючий вогнегасний засіб</u>	35
<u>2.1.1 Гасіння методом охолодження зони горіння</u>	35
<u>2.1.2 Гасіння методом охолодження поверхні конденсованої речовини</u>	55
<u>2.2 Вода як флегматизуючий вогнегасний засіб</u>	84
<u>Контрольні питання</u>	98
<u>ГЛАВА 3. Підвищення вогнегасної ефективності води</u>	99
<u>Розділ 1. Рідинні розпилені струмені</u>	100
<u>1.1 Уявлення про механізм розпаду плівок і струменів</u>	103
<u>1.2 Вплив розміру крапель на вогнегасну ефективність води</u>	110
<u>1.3 Способи і пристрої розпилення рідин</u>	124
<u>Розділ 2. Вплив хімічних добавок на вогнегасну ефективність води</u>	132
<u>2.1 Підвищення вогнегасної ефективності води при використанні змочувачів</u>	136
<u>2.2 Підвищення вогнегасної ефективності води при використанні згущувачів</u>	148
<u>2.3 Підвищення вогнегасної ефективності води при використанні низькомолекулярних сполук</u>	157
<u>2.4 Добавки проти замерзання</u>	162

<u>2.5 Використання композицій різних добавок</u>	164
<u>Контрольні питання</u>	167
<u>ГЛАВА 4. Застосування води для створення умов пожежної безпеки</u>	168
<u>Розділ 1. Застосування водяних завіс для обмеження теплового випромінювання та зниження температури нагрітих газів</u>	169
<u>1.1 Суцільні водяні екрани</u>	170
<u>1.2 Краплинні екрани</u>	177
<u>1.3 Використання полідисперсних водяних завіс для зниження температури нагрітих газів</u>	185
<u>Розділ 2. Використання води для захисту будівельних конструкцій</u>	188
<u>Додаток А</u>	207
<u>Додаток В</u>	227
<u>Додаток С</u>	229
<u>Література</u>	245

Навчальне видання

Тарахно Олена Віталіївна
Шаршанов Андрій Янович

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ВОДИ В ПОЖЕЖНІЙ СПРАВІ

Навчальний посібник

Коректор *К.В.Хорошилова*
Комп'ютерна верстка *М.А.Ковревська*
Редактор *Т.О.Філіна*
Оформлення обкладинки *Ю.П.Ключка*

Підписано до друку 03.11.2004 р. Формат 60х84 1/16.
Папір 60 г/м². Друк ризограф. Ум.друк. арк. 15,75
Тираж 100 прим. Вид.№ 43/02. Зам.№

Розмножувально-копіювальний сектор
Академії цивільного захисту України
61023, м. Харків, вул. Чернишевського, 94

