



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ
З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Практикум

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ ГОРІННЯ ТА МЕХАНІЗМІВ ПОЖЕЖОГАСІННЯ



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Д. Г. Трегубов, В. М. Нуянзін, О. М. Даник, Я. М. Гончаренко

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ ГОРІННЯ ТА
МЕХАНІЗМІВ ПОЖЕЖОГАСІННЯ**

Практикум

Черкаси
2026

Авторський колектив:

Д. Г. Трегубов, д-р техн. наук, доц., доцент кафедри радіаційного і хімічного захисту,
Національний університет цивільного захисту України;

В. М. Нуянзін, канд. техн. наук, доц., начальник кафедри радіаційного і хімічного
захисту, Національний університет цивільного захисту України;

О. М. Даник, старший викладач кафедри радіаційного і хімічного захисту,
Національний університет цивільного захисту України;

Я. М. Гончаренко, канд. техн. наук, викладач кафедри радіаційного і хімічного захисту,
Національний університет цивільного захисту України.

*Рекомендовано до друку вченою радою
Національного університету цивільного захисту України
(протокол № 9 від 27 березня 2026 року)*

Рецензенти:

Кустов М. В., д-р техн. наук, проф., начальник науково-дослідної лабораторії
радіаційного, хімічного та біологічного захисту,
Національний університет цивільного захисту України;

Швиденко А. В., канд. техн. наук, доц., доцент кафедри інформаційних,
мультимедійних технологій та дизайну, Черкаський державний бізнес-коледж.

Трегубов Д. Г.

Т 69 Дослідження процесів розвитку горіння та механізмів пожежогасіння: практикум /
Д. Г. Трегубов, В. М. Нуянзін, О. М. Даник, Я. М. Гончаренко.— Черкаси: НУЦЗ
України, 2026. – 212 с.

Викладені основні положення теорії виникнення, розвитку та припинення горіння речовин і матеріалів, які необхідні для розуміння досліджуваних процесів, логіки виконання демонстраційних та лабораторних досліджень, формулювання висновків за результатами проведених експериментів. Надано методичні поради та схеми проведення лабораторних досліджень цих процесів, алгоритми виконання розрахункової та експериментальної частин лабораторних робіт. Наведені необхідні довідкові матеріали для виконання розрахункової частини лабораторних робіт. Для самоконтролю готовності до лабораторної роботи наприкінці кожної теми наведені контрольні запитання.

Видання призначено для практичного опанування дисциплінами «Теорія розвитку та припинення горіння», «Теорія горіння та вибуху», «Теорія процесів горіння, вибуху та пожежогасіння» для спеціальностей К8 «Пожежна безпека», К10 «Цивільний захист», J4 «Охорона праці», та G1 «Хімічні технології та інженерія».

УДК 614.841

ЗМІСТ

Вступ	4
Правила безпеки праці та порядок надання першої допомоги під час проведення робіт в лабораторії дослідження процесів горіння та пожежогасіння	5
Розділ 1. Основи процесів горіння та формування пожежної небезпеки речовин	11
1.1. Загальні відомості про процеси горіння	11
Дослідження різних видів полум'я	11
1.2. Матеріальний та енергетичний баланс процесу горіння	22
Дослідження матеріального балансу процесу горіння	22
Визначення складу продуктів горіння	28
Визначення температури дифузійного полум'я за допомогою оптичного пірметра	34
1.3. Горючі системи. Самоспалахування горючих систем	43
Визначення стандартної температури самоспалахування	43
1.4. Самозаймання речовин та матеріалів	54
Визначення схильності до хімічного самозаймання жирів, олій та промаслених матеріалів	54
1.5. Вимушене запалювання горючих систем	62
Визначення мінімальної енергії запалювання парів горючих рідин	62
1.6. Горіння газо-пароповітряних сумішей. Концентраційні межі поширення полум'я	66
Визначення нижньої концентраційної межі поширення полум'я парів рідин	66
Визначення ступеня небезпеки різних концентрації горючих парів та газів у повітрі	74
Визначення ступеня небезпеки фактичної концентрації парів горючої речовини за допомогою газоаналізатора	80
Дослідження швидкості поширення фронту полум'я	85
Визначення критичного зазору для запобігання поширення полум'я крізь вогнеперешкоджувач під час горіння газів	93
1.7. Горіння рідин	100
Визначення температурних меж поширення полум'я рідин	100
Визначення температури спалаху рідин у закритому тиглі	108
Визначення температури спалаху рідин у відкритому тиглі	114
Визначення швидкості вигорання рідин	117
1.8. Горіння твердих речовин та пилоповітряних сумішей	121
Визначення швидкості поширення полум'я по поверхні твердих горючих матеріалів	121
Визначення групи горючості твердих речовин і матеріалів	129
Визначення нижньої концентраційної межі аерозолі та встановлення ступеня пожежовибухонебезпеки пилу	135
Розділ 2. Фізико-хімічні основи розвитку пожеж та пожежогасіння	142
2.1. Пожежа її розвиток, параметри; тепломасообмін пожежі в огороженні	142
Дослідження тепло- та масообміну пожежі в огороженні	142
2.2. Теплова теорія, способи та засоби припинення горіння	150
Дослідження механізму припинення горіння охолодженням	153
Дослідження механізму припинення горіння ізолюванням	160
Дослідження механізму припинення горіння методом розбавлення	166
Дослідження процесу гасіння пожежі в огороженні негорючим газом	174
Дослідження механізму припинення горіння методом хімічного гальмування реакції	176
Дослідження ефективності гасіння полум'я вогнегасними порошками	182
Список використаних джерел	185
Додатки	186
Терміни та визначення	202
Предметний покажчик	209

ВСТУП

Практикум призначено для підготовки до виконання лабораторних робіт та проведення демонстраційних експериментів з дисциплін «Теорія розвитку та припинення горіння», «Теорія горіння та вибуху» та «Теорія процесів горіння, вибуху та пожежогасіння» укладений відповідно до освітньо-професійних програм за спеціальностями К8 «Пожежна безпека», К10 «Цивільний захист», J4 «Охорона праці», та G1 «Хімічні технології та інженерія» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

У практикумі систематизовано навчально-методичні матеріали для організації підготовки слухачів до лабораторних робіт, сформульовано мету, порядок проведення, наведено необхідні розрахункові методики, схеми приладів та таблиці з узагальнення результатів досліджень, необхідні довідкові дані для проведення супутніх розрахунків.

Основою освітніх компонент «Теорія розвитку та припинення горіння», «Теорія горіння та вибуху» та «Теорія процесів горіння, вибуху та пожежогасіння» є вивчення закономірностей процесів виникнення та розвитку горіння, умов, за яких горіння протікає у вигляді вибуху, методик експериментального та розрахункового визначення основних параметрів пожежовибухонебезпечності речовин та матеріалів, основних положень теорії припинення горіння, фізико-хімічних основ розвитку пожежі та механізму дії різних вогнегасних засобів. Знання та розуміння основних закономірностей виникнення, розвитку та припинення процесів горіння дозволяє фахівцям служби цивільного захисту ефективно вирішувати задачі профілактики та гасіння пожеж.

Наведений навчальний матеріал використовує та узагальнює теоретичні дослідження та практичний досвід підрозділів цивільного захисту щодо протипожежних заходів та гасіння пожеж, базується на теоретичних положеннях таких освітніх компонент як фізика, хімія, термодинаміка та теплопередача, небезпеки радіаційного, хімічного та біологічного походження.

Наведені у лабораторному практикумі методики дозволяють визначати параметри пожежної небезпеки речовин та матеріалів, умови розвитку та припинення горіння, дію різних вогнегасних засобів на процеси горіння. Результати таких досліджень необхідні практичним робітникам підрозділів цивільного захисту для забезпечення безпеки та захисту населення і територій, матеріальних і культурних цінностей та довкілля від негативних наслідків надзвичайних ситуацій.

ПРАВИЛА БЕЗПЕКИ ПРАЦІ ТА ПОРЯДОК НАДАННЯ ПЕРШОЇ ДОПОМОГИ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ В ЛАБОРАТОРІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ ТА ПОЖЕЖОГАСІННЯ

Загальні положення

1. Лабораторія процесів горіння і пожежогасіння призначена для виконання здобувачами вищої освіти лабораторних робіт, передбачених робочою програмою з дисциплін «Теорія розвитку та припинення горіння», «Теорія горіння та вибуху» та «Теорія процесів горіння, вибуху та пожежогасіння».

У лабораторії проводяться роботи, пов'язані із застосуванням хімічних речовин, які можуть бути шкідливими для організму людини, становити хімічну або пожежну небезпеку. Значна їх частина відноситься до горючих та легкозаймистих матеріалів. У вигляді пари та аерозолу вони можуть утворювати з киснем повітря вибухонебезпечні суміші, а за умов аварійного розливу здатні поширювати полум'я на великі площі.

У лабораторії використовуються електричні, електронагрівальні та електрозапалювальні прилади, необережне поводження з якими може призвести до травм унаслідок термічного або електричного ураження.

У лабораторії проводяться дослідження з наявністю відкритого вогню, що потребує особливої уваги та контролю.

2. Організація безпеки праці та пожежної безпеки покладається на начальника кафедри.

3. Виконання вимог і правил безпеки праці та пожежної безпеки під час проведення занять у навчальній лабораторії покладається на викладача, який проводить конкретне заняття.

4. До роботи в лабораторії допускаються особи, які пройшли інструктаж із правил поводження у лабораторії та вимог безпеки праці, про що робиться відповідний запис у спеціальному журналі. Під час проведення інструктажу викладач повинен перевірити знання здобувачів вищої освіти стосовно правил користування вогнегасниками всіх типів.

5. Особи, які пройшли інструктаж, несуть персональну відповідальність за додержання правил поводження в лабораторії, а також за виконання вимог і правил безпеки праці та пожежної безпеки.

Правила поведження в навчальній лабораторії

1. До виконання лабораторної роботи допускаються здобувачі вищої освіти, які засвоїли відповідний теоретичний матеріал, мету і порядок проведення поточної лабораторної роботи, знайомі із улаштуванням та призначенням лабораторного устаткування та пройшли первинний інструктаж із безпеки праці.

2. До виконання експериментальної частини роботи можна приступати тільки після дозволу викладача. При проведенні роботи слід точно додержуватись порядку її проведення. Із незрозумілих питань, що виникають під час роботи, необхідно звертатись по допомогу до викладача.

3. Проводячи експеримент, слід бути уважним, виконувати правила безпеки праці і вимагати їх виконання від інших. Недостатнє знання властивостей речовин та будови приладів, неохайність і порушення правил роботи можуть призвести до тяжких наслідків (порізи, сліпоту, ураження електричним струмом, термічні опіки).

4. Робочій стіл, на якому проводяться досліди, має бути чистим. На ньому не повинно бути зайвих предметів, речовин, приладів, посуду.

5. Роботи з процесами горіння, горючими, легкозаймистими, їдкими і токсичними речовинами обов'язково проводяться у витяжній шафі за умови працюючої вентиляції.

6. Досліди, в яких можливі виникнення іскор, бурхливий перебіг реакцій, потрібно проводити особливо уважно, обов'язково в захисних окулярах.

7. Для переливання або набору хімічних речовин слід користуватися конічною лійкою або піпеткою з грушою. **Забороняється** набирати рідину до піпетки ротом. Відбирати невеликі кількості твердих сипких речовин слід фарфоровими або скляними ложками. Зважувати рідини треба в бюксах з притертими кришками, тверді речовини – у фарфорових або скляних «човниках».

8. Працюючи з горючими та легкозаймистими речовинами, необхідно контролювати відсутність на робочому місці або поруч із ним відкритого вогню чи розжареної поверхні. Категорично заборонено користуватись відкритим полум'ям для нагрівання таких рідин. Нагрівання ЛЗР і ГР необхідно проводити в лотку достатньої ємності, висота борта якого дозволяє обмежити поширення полум'я у випадку аварійного розливу.

9. Не можна нахилитися над приладом з дослідження процесів горіння, колбою, пробіркою з хімічною речовиною.

10. При користуванні газовими пальниками не допускати «проскакування» полум'я всередину пальника; у разі такої події слід негайно перекрити подавання горючого газу в пальник.

11. При проведенні робіт на лабораторному устаткуванні, що знаходиться в зоні теплового впливу або має підвищену температуру необхідно бути обережними і не торкатись відповідних поверхонь. Нагрівальні електроприлади, розжарені або гарячі предмети до настання повного остигання слід розташовувати на теплоізоляційних підставках.

12. Після закінчення роботи необхідно вимкнути газ, всі електроприлади, електроенергію і воду, загасити всі джерела відкритого вогню (полум'я спиртівки гасити тільки ковпачком, полум'я у фарфорових чи металевих чашках – накриваючи їх кришками); прибрати робоче місце, прилади і обладнання, доповісти черговому або викладачеві.

13. У лабораторії **забороняється:** приймати їжу, пити воду, чай тощо; пробувати реактиви на смак, запах або дотик; брати реактиви руками; виливати в каналізацію розчини кислот і лугів, горючі речовини; вмикати і вимикати прилади, які не використовуються при виконанні поточної лабораторної роботи; проводити досліди, що не мають відношення до поточної лабораторної роботи; мити обладнання, підлогу, столи органічними розчинниками.

Ліквідація наслідків можливих аварій у лабораторії

1. Розсипаний твердий реактив прибирають за допомогою совка і висипати в спеціальну металеву тару, попередньо переконавшись, що вона порожня.

2. Розлитий рідкий реактив треба засипати піском і за допомогою совка перенести пісок з адсорбованою рідиною в металеву тару, попередньо переконавшись, що вона порожня.

3. При позаплановому загорянні речовин: вимкнути вентиляцію, зачинити вікна, вимкнути електронагрівальні прилади і загальний рубильник у лабораторії; віднести подалі від місця горіння посудини з легкозаймистими та горючими рідинами; доповісти про загоряння викладачу; у випадку поширення пожежі сповістити державну рятувальну службу за телефоном 101 та чергову частину навчального закладу; за можливості розпочати гасіння пожежі первинними засобами пожежогасіння: азбестова або груба вовняна ковдра; висушений та

просіяний пісок; пожежно-господарська вода; вогнегасники вуглекислотні; вогнегасники порошкові.

4. Цільове призначення вогнегасників та вогнегасних засобів:

– вуглекислотні вогнегасники призначені для гасіння будь-яких горючих речовин, за винятком лужних металів, а також матеріалів, горіння яких відбувається без доступу повітря; при користуванні вуглекислотним вогнегасником його треба зняти зі стіни, спрямувати розтруб на вогонь, тримаючи його захищеною від переохолодження рукою (рукавиця, рушник, ганчірка), зірвати пломбу, повернути важіль або відкрити вентиль;

– порошкові вогнегасники, залежно від марки порошку, призначені для гасіння горючих рідин, газів і твердих речовин, у тому числі лужних металів, а також для гасіння загорянь електроприладів під напругою до 600 V;

– азбестова або груба вовняна ковдра призначена для гасіння невеликих осередків загоряння речовин, горіння яких не може проходити без доступу повітря;

– воду можна застосовувати для гасіння полум'я при горінні речовин, що не реагують із водою (деревина та ін.), рідин, що змішуються з водою (спирт, ацетон), або рідин, що мають густину, більшу, ніж густина води;

– не можна гасити водою горіння лужних металів, металоорганічних сполук, бензину та інших легкокиплячих рідин, а також загоряння електромереж і електроустаткування під напругою.

Надання першої допомоги потерпілим

1. Про нещасний випадок потерпілий або очевидець повинні негайно доповісти викладачеві та медико-санітарну частину за внутрішнім телефоном 3-81, які мають надати першу допомогу і направити потерпілого до медичної частини, а за необхідності викликати лікаря в лабораторію.

2. Дії при опіках

2.1 Термічні опіки є наслідком дії на відкриті ділянки шкіри високої температури (полум'я, гарячих рідин, розпечених предметів тощо).

Дії при займанні одягу. У разі спалахування одягу, змоченого горючою рідиною, людину треба звалити на підлогу та щільно накрити азбестовою або грубою вовняною ковдрою, щоб збити полум'я, зняти тліючі залишки. Залишки одягу, прилиплі до тіла, не здирати, а обрізати ножицями.

Допомога. Швидко припинити контакт з гарячими речовинами. На обпечену поверхню шкіри накласти ватно-марлеву пов'язку, змочену етиловим спиртом, горілкою або 2-3% розчином марганцевокисного калію.

В разі значних опіків допомога повинна бути надана медичним персоналом, до прибуття якого на уражені місця треба накласти стерильну пов'язку, на кінцівки потрібно накласти транспортні шини. За незначних опіків змазують обпечену частину шкіри 2–3% розчином марганцевокисного калію та накладанням стерильної пов'язки (крім обличчя).

2.2 Хімічні опіки є наслідком дії на шкіру концентрованих неорганічних та органічних кислот, лугів, фосфору, інших речовин; можуть бути складовою термохімічних опіків.

Допомога. Якщо хімічною речовиною просочився одяг, його треба на місці події швидко зняти, розрізати чи розірвати. Речовини, що потрапили на шкіру змивають великою кількістю води. Після промивання водою бажано обмити обпечені частини розчинами: за опіку кислотами – 2–3 % розчином харчової соди або мильною водою; за опіку лугами – 1 % розчином оцтової, лимонної чи борної кислоти та знову водою; за опіку фосфором роблять примочки з 5% розчину марганцевокисного калію. Після цього накладають суху пов'язку.

При потраплянні хімічної речовини у дихальні шляхи (очі) необхідно спочатку промити великою кількістю води, далі – 3 % водним розчином борної кислоти і негайно звернутися до медичної санчастини.

При потраплянні на шкіру невідомого або відомого токсичного хімічного реактиву його слід обережно стерти ганчіркою, а потім обробити шкіру спиртом і промити водою.

3. Дії при отруєннях. Отруєння є наслідком дії отрути різного походження.

Допомога. До прибуття лікаря необхідно припинити контакт потерпілого з отруйною речовиною та видалити її з організму. Дії залежать від шляху потрапляння отрути.

3.1 Потрапляння отрута у шлунково-кишковий тракт (крім кислот чи лугів): потерпілому негайно кілька разів промивають шлунок до появи чистих промивних вод; для цього примушують випити 1,5–2,0 л води ледь підфарбованої марганцевокисним калієм або води з питною содою (1 чайна ложка на 1 склянку води), а потім викликають блювання подразненням кореня язика. Після дають суспензію активованого вугілля – 1 таблетка на 10 кг маси тіла. Кишечник очищають за допомогою сольового проносного – 20 г гіркої солі (Na_2SO_4) на 0,5 склянки води.

Потрапляння у шлунково-кишковий тракт кислот та лугів: видалити слину і слиз з рота потерпілого, дати 2-3 склянки води, щоб розбавити кислоту чи луг. Не можна промивати шлунок, щоб не викликати блювання і потрапляння отрути у дихальні шляхи. Не можна нейтралізувати кислоту у шлунку лугом і навпаки, оскільки утвориться велика кількість вуглекислого

газу, що розтягне шлунок, посилить біль та кровотечу. Якщо виникли ознаки задухи, проводять штучне дихання – способом «з рота в ніс».

3.2 Потрапляння отрути у дихальні шляхи (СО, інших газів або парів): потерпілому забезпечують приплив свіжого повітря (наприклад, вивести на свіже повітря, звільняють від одягу або розстібують гудзики, щоб уникнути здавлювання горла і грудей, ослабити пасок тощо); направляють потерпілого до медико-санітарної частини або викликають медперсонал. До прибуття медперсоналу забезпечують потерпілому спокій, кладуть на спину, не закидаючи голову; дають дихати кисень; зігрівають потерпілого, уклавши ковдрою, одягом (не щільно, щоб вільно дихав); за потреби роблять штучне дихання, але ця дія **протипоказана** у разі ураження подразнюючими газами (хлором, оксидом азоту та ін.).

4. Дії при електричних травмах. Електротравми є наслідком пошкодження організму за протікання крізь нього електричного струму або впливу електричної дуги. Місцеві електротравми – це чітко окреслені порушення цілісності окремих ділянок шкіри. Загальні електротравми: I ступеню – судомне скорочення м'язів без втрати свідомості; II ступеню – судомне скорочення м'язів із втратою свідомості та/або зупинкою дихання; III ступеню – втрата свідомості і порушення серцевої діяльності; IV ступеню – клінічна смерть.

Допомога. Звільнити потерпілого від дії електричного струму: вимкнути електричну напругу на обладнанні, до якого дотикається людина. Якщо це неможливо – відтягнути людину від джерела напруги або відкинути дрід, який торкається людини. Людина, яка надає допомогу, повинна дотримуватись правил безпеки. За напруги до 1000 В дрід можна відкинути сухою палкою або дошкою. Відтягти потерпілого від джерела напруги можна руками у діелектричних рукавицях або у сухій тканині; при цьому потрібно стати на дошку, одяг або іншу не струмопровідну підстилку. За напруги понад 1000 В для цього можна використовувати лише ізолюючу штангу або кліщі, одягнувши діелектричні рукавички та боти. Далі для потерпілого у разі зупинки дихання і серцебиття робити штучне дихання і непрямий масаж серця.

5. Дії при механічних травмах: потерпілого слід усадити (за необхідності покласти), шкіру навколо рани змастити йодом, накласти стерильну пов'язку і направити пораненого до медично-санітарної частини (із супроводжувачем).

У випадку кровотечі травмовану кінцівку необхідно підняти, притиснути пальцями кровоносну судину вище місця травми і перетягти кінцівку гумовим джгутом (хустиною, мотузкою, тощо) та негайно направити пораненого із супроводжувачем до медичної санчастини, оскільки довго перетягнута джгутом кінцівка може змертвіти.

РОЗДІЛ 1 ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ ТА ФОРМУВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ РЕЧОВИН

1.1 Загальні відомості про процеси горіння

Лабораторна робота ДОСЛІДЖЕННЯ РІЗНИХ ВИДІВ ПОЛУМ'Я

Теоретична частина роботи

Горіння – фізико-хімічний процес, основою якого є швидка реакція окиснення з інтенсивним виділенням продуктів горіння, енергії у вигляді тепла та світлового випромінювання. Процеси горіння класифікують за кількома ознаками.

За агрегатним станом компонентів горючої суміші в зоні горіння:

– гомогенне – компоненти горючої суміші знаходяться в зоні горіння в однаковому агрегатному стані (горіння газів, пари рідин, газоподібних продуктів розкладання твердих горючих матеріалів);

– гетерогенне – компоненти горючої суміші знаходяться в різних агрегатних станах (горіння карбонізованого залишку, металургійного коксу, нелетучих металів).

За способом утворення горючої суміші:

– кінетичне – горіння заздалегідь утвореної горючої суміші; швидкість такого горіння залежить від кінетики (швидкості) хімічної реакції;

– дифузійне – утворення горючої суміші та сам процес горіння відбуваються шляхом дифузії одного з компонентів в зону горіння.

За механізмом поширення горіння:

– дефлаграційне – поширення полум'я відбувається шляхом пошарового запалювання холодної горючої суміші за рахунок передачі тепла від зони горіння у підготовчу зону теплопровідністю і частково випромінюванням;

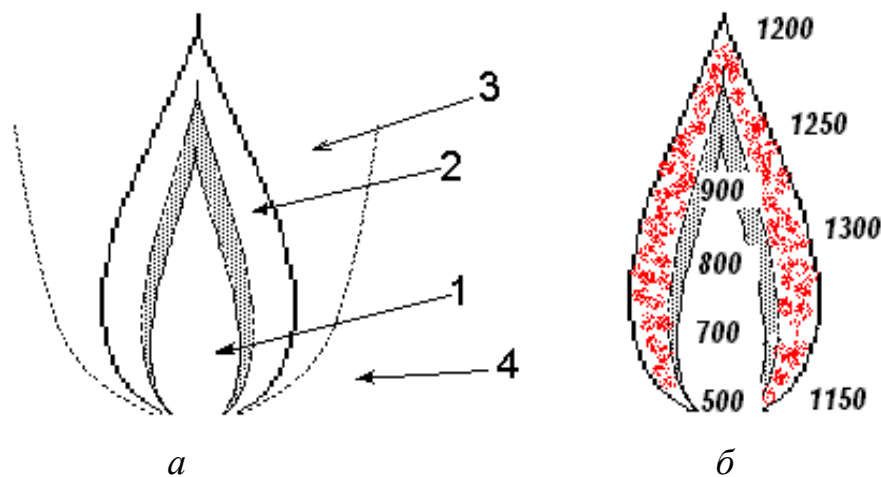
– детонаційне – поширення полум'я відбувається за рахунок швидкого адіабатичного стиснення горючої суміші ударною хвилею під тиском гарячих продуктів горіння (самовільна детонація газової суміші, що горить, можливо при достатній швидкості поширення горіння – більше за 500 м/с, в той час як нормальна швидкість горіння не перевищує 10 м/с).

За газодинамічним режимом горіння:

– ламіна́рне – компоненти горючої суміші надходять до зони реакції повільно, за законам молекулярної або слабкої конвекційної дифузії; напрям руху окремих частин потоку співпадає;

– турбулентне – компоненти горючої суміші надходять до зони реакції інтенсивно, з завихреннями, перемішуванням продуктів горіння з вихідною сумішшю; напрям руху окремих частин потоку не співпадає; газодинамічний режим горіння характеризує числове значення критерію Рейнольдса: якщо $Re < 2300$, то полум'я відносять до ламінарного, якщо $2300 < Re < 10\,000$ – полум'я перехідне, якщо $Re > 10\,000$ – турбулентне.

Полум'я – це газовий об'єм, в якому відбуваються всі процеси, пов'язані з підготовкою горючої суміші до горіння, і сам процес горіння.



1 – підготовча зона (підзони підігріву та розкладання); 2 – зона горіння;
3 – зона суміші продуктів горіння з повітрям; 4 – зона холодного повітря

Рисунок 1.1 – Схематична будова *а* та температурний режим *б* ламінарного полум'я

В будові ламінарного полум'я можна виділити декілька зон, і в кожній із них відбуваються процеси, які можна умовно поділити на фізичні та хімічні.

В підготовчій зоні первинним є фізичний процес попереднього нагріву горючої суміші (у разі кінетичного горіння) або горючої речовини (у разі дифузійного горіння). Нагрів здійснюється за рахунок випромінювання від зони горіння та за рахунок теплопровідності від гарячих продуктів горіння, які дифундують із зони горіння в підготовчу зону (прошарок суміші продуктів горіння та горючої речовини).

Температура газів із наближенням до зони горіння поступово збільшується. Це призводить до протікання низки хімічних процесів, розкладання молекул на атоми, радикали чи функціональні групи. За наявності кисню в підготовчій зоні відбувається попереднє окиснення, але цей процес ще не є горінням, оскільки швидкість хімічної реакції ще недостатньо велика.

Зона горіння – тонкий шар, де йде швидка реакція окиснення, тобто сам процес горіння. В зоні горіння виділяється тепло реакції та утворюються продукти горіння, які дифундують як в підготовчу зону (суміш продуктів горіння з горючою речовиною), так і в навколишній простір (суміш продуктів горіння з повітрям).

В дифузійному полум'ї реакції горіння передують фізичний процес сумішоутворення за рахунок молекулярної дифузії горючої речовини із підготовчої зони, а окисника – із навколишнього середовища. Концентрація кисню в зоні горіння швидко зменшується при наближенні до зони парів та газів, і в підготовчій зоні дифузійного полум'я вміст кисню з повітря дорівнює нулю. Концентрація горючої речовини в зоні горіння також падає за рахунок проходження хімічної реакції.

В зоні суміші продуктів горіння з повітрям відбувається взаємна дифузія продуктів горіння в навколишній простір та окисника із навколишнього простору до зони горіння. При цьому йде попередній нагрів кисню та азоту повітря шляхом випромінювання та теплопровідності від гарячих продуктів горіння і поступове охолодження продуктів реакції. Якщо горюча речовина не встигла повністю згоріти, то в цій зоні відбувається доокиснення продуктів неповного згорання.

Температура в різних зонах полум'я та в самій зоні горіння неоднакова.

Температура в підготовчій зоні значно нижча, ніж в зоні горіння. Якщо розглядати дифузійне полум'я над поверхнею рідини, то можна сказати, що температура потоку парів біля поверхні рідини дорівнює температурі кипіння. Із наближенням до зони горіння температура парів збільшується: спочатку за рахунок випромінювання зони горіння, а потім внаслідок теплопровідності від гарячих продуктів згорання. Нагрів обумовлює термічну дисоціацію парів біля зони горіння.

Температура зони горіння найбільша, але вона також неоднакова в різних за висотою точках полум'я. Пояснюється це зміною складу суміші в зоні горіння та витратами тепла на нагрів компонентів, які надходять в цю зону.

В нижній частині – температура мінімальна, оскільки велика кількість тепла йде на нагрів холодного повітря, яке підсмоктується з навколишнього простору.

В середній частині зони горіння теплота, яка виділяється внаслідок хімічної реакції, менша, ніж в нижній частині полум'я, що обумовлено дифузією в цю зону продуктів горіння. Проте, повітря, що поступає в цю зону, є більш нагрітим за рахунок його проходження через розжарені продукти горіння. Це компенсує втрати тепла і температура в середній частині зони горіння є найбільшою.

У верхній частині зони горіння теплота згоряння зменшується внаслідок нестачі кисню через збільшення товщини шару продуктів горіння. При цьому нагріте повітря, яке поступає в зону реакції, вже не компенсує всіх втрат тепла. Знижується температура горіння, утворюються продукти неповного згоряння (сажа).

Температура дифузійного полум'я менша, ніж температура кінетичного. Це пояснюється тим, що тепловтрати із зони горіння за рахунок випромінювання у кінетичного полум'я значно менші, ніж у дифузійного, у якого інтенсивне світіння обумовлюється великою кількістю частинок карбону. При кінетичному режимі відбувається горіння вже готової горючої суміші. В зоні горіння утворюються кінцеві газоподібні продукти повного згоряння, які світла у видимому діапазоні практично не випромінюють. Якщо в суміші, яка поступає для горіння, недостатньо окисника, то в зоні горіння утворюються частинки карбону, який не встиг прореагувати із киснем і полум'я набуває жовтого або жовтогарячого кольору.

Температура в зоні продуктів горіння падає за рахунок розбавлення гарячих продуктів горіння холодним повітрям, яке дифундує із навколишнього простору. В дифузійному полум'ї спадання температури йде повільніше за рахунок виділення тепла доокиснення ще гарячих продуктів неповного згоряння киснем повітря.

Колір світіння дифузійного полум'я залежить від вмісту кисню та карбону в горючій речовині, табл. 1.1. Якщо кисню достатньо, то при термічному розкладанні спочатку утворюється монооксид карбону CO , який потім згоряє з утворенням вуглекислого газу CO_2 . Така горюча речовина горить безбарвним або блакитним полум'ям. Якщо в складі горючої речовини багато карбону, то кисню, який шляхом дифузії потрапляє в зону горіння, не вистачає для повного окиснення. Тому у полум'ї залишаються розжарені частинки карбону, що надає йому яскравості.

Таблиця 1.1 – Залежність кольору дифузійного полум'я від складу горючої речовини

Характер світіння полум'я	Масовий вміст хімічних елементів у горючій речовині, %	
	окисген	карбон
безбарвне	більше 50	до 50
яскраве, без кіптяви	від 25 до 50	від 50 до 75
яскраве, із кіптявою	менше 25	більше 75

Карбон, який не прореагував в полум'ї, переходить в зону продуктів горіння у вигляді сажі. Полум'я в такому разі буде яскравим та кіптявим.

Залежність кольору полум'я від температури під час горіння деревини, вугілля і нафтопродуктів наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Залежність кольору дифузійного полум'я (та поверхонь розжарених твердих тіл) від температури

Колір	Температура, °С	Колір	Температура, °С
бардовий (у темряві)	400	рожево-червоний	900
слабо-червоний	480	оранжевий	940
криваво-червоний	560	лимонний	1000
темно-вишневий	635	світло-жовтий	1170
середньо-вишневий	670	оранжево-жовтий	1200
світло-вишневий	740	білий	1240
яскраво-червоний	840	яскраво-білий	1400

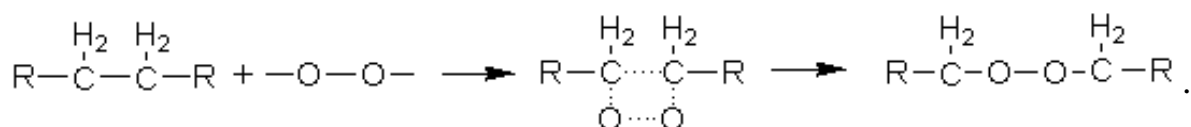
Механізм протікання реакцій окиснення в зоні горіння сформульовано вченими О.М. Бахом та К. Енглером у межах пероксидної теорії, за якою початкові компоненти горючої суміші переходять у кінцеві продукти окиснення через утворення проміжних продуктів з високою реакційною спроможністю – пероксидів. Схематично цей процес можна описати схемою:



У звичайних умовах кисень повітря малоактивний і для вступу в реакцію окиснення він повинен мати певний запас енергії за рахунок розриву одного або двох ковалентних зв'язків, якими з'єднані атоми киснену в молекулі. За відносно низьких температур, які властиві для зони підготовчих процесів, в окисному середовищі недостатньо енергії для утворення активного атомарного кисню (або така реакція йде з надзвичайно малою швидкістю). Розривання тільки одного зв'язку вимагає значно менших енергетичних витрат і тому утворення

енергетично активної пероксидної групи -O-O- відбувається з більшою ймовірністю, що і визначає швидкість та напрямок окисних процесів: $O=O + E = -O- + -O- + 488,3 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$, $O=O + E = -O-O- + 322,8 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$.

Активний кисень (-O-O-) легко вступає в хімічну реакцію з молекулою горючої речовини з утворенням пероксиду. Спочатку кисень приєднується до карбонового ланцюга з утворенням проміжного продукту, після чого відбувається розрив одного з валентних зв'язків з утворенням безпосередньо пероксиду – речовини з характерною групою (-O-O-):



Енергія розриву зв'язку (-O-O-) в усіх видах пероксидів низька і становить 150–160 кДж·моль⁻¹, тому всі пероксиди, особливо органічні, які і утворюються на проміжних стадіях окиснення, – це дуже реакційноздатні та нестійкі речовини. При незначному температурному або навіть механічному впливі вони розкладаються з утворенням оксидних, гідроксильних і вуглеводневих радикалів: $R-O-OH \rightarrow R-O^* + OH^* - 167 \text{ кДж}$; $2R-O-OH \rightarrow R-O^* + R-O-O^* + H_2O - 54 \text{ кДж}$.

Радикали, що утворюються при розкладанні пероксидів, є дуже активними і ініціюють продовження процесу окиснення до утворення кінцевих продуктів реакції горіння. Радикали також реагують із вуглеводнями, відриваючи від них атоми водню та генеруючи нові вільні радикали. Такий процес призводить до прискорення процесу окиснення горючої речовини, бо енергетичні витрати при окисненні пероксидами значно нижчі, ніж при окисненні молекулярним киснем.

Проте багато явищ, які мають місце при окисненні, не можна пояснити у межах пероксидної теорії. Це дозволяє зробити теорія ланцюгових реакцій окиснення М.М. Семенова, за якою вихідні речовини (горюча речовина ГР та окисник ОК) після отримання енергії активації утворюють проміжні активні центри полум'я АЦП, які після ланцюгового процесу переходять у кінцеві продукти горіння ПГ. *Ланцюговими* називають процеси, у яких перетворення вихідних речовин у продукти реакції здійснюється шляхом регулярного чергування кількох реакцій за участю *активних центрів* – частинок з великим запасом енергії, що визначає їх високу реакційну здатність (вільні атоми, радикали, функціональні групи тощо).

Будь-який тепловий імпульс (електричний розряд, зовнішній нагрів, опромінення) призводить до підвищення кінетичної енергії молекул горючої суміші. Кінетична енергія руху при співударянні переходить у потенційну енергію молекул і може витрачатися на розрив хімічних зв'язків.

Розрізняють *розгалужені та нерозгалужені ланцюгові реакції*. Якщо внаслідок взаємодії одного активного центру з молекулою вихідної суміші утворюється одна молекула кінцевого продукту та один новий активний центр, здатний продовжити реакцію, то така ланцюгова реакція називається *нерозгалуженою*. Прикладом нерозгалуженої ланцюгової реакції може бути реакція взаємодії водню та хлору.

Якщо внаслідок акту хімічної взаємодії одного активного центру з молекулою вихідної суміші утворюються два або більше активних центри, то така ланцюгова реакція називається *розгалуженою*. До розгалужених відносяться і реакції окиснення вуглеводнів за участю молекул кисню. Одним з прикладів такої реакції може служити реакція горіння водню: 1) ініціювання ланцюга $O_2 + H_2 = 2OH^*$; 2) розгалуження $H_2 + O^* = OH^* + H^*$; 3) продовження $H_2 + OH^* = H_2O + H^*$; 4) обрив $OH^* + H^* = H_2 + O^*$.

При взаємодії молекули водню з активним киснем утворюється два активні центри, надалі обидва вступають у взаємодію з атомами з утворенням декількох нових центрів реакції. Ланцюгова реакція буде одержувати нові розгалуження, в яких даний процес буде повторюватися.

Однак протікання будь-яких ланцюгових реакцій пов'язане не тільки з утворенням нових активних центрів, але і з їх загибеллю. При зіткненні активних центрів між собою, з молекулами інертних продуктів, що знаходяться в горючій системі, або з поверхнями, що обмежують реакційний об'єм, активні центри можуть віддати свою надлишкову енергію і перестати бути активними, тобто відбувається загибель активних центрів, що гальмує реакцію горіння.

Загальна швидкість протікання ланцюгової реакції $\omega_{лр}$ визначається швидкістю початкового ініціювання молекул (ω_o), швидкістю розгалуження (ω_f) і швидкістю обриву (ω_g) ланцюга: $\omega_{лр} = \omega_o + (\omega_f - \omega_g)$.

Якщо швидкість утворення активних центрів реакції більше, ніж швидкість обриву ланцюгів, концентрація активних центрів зростає в часі і реакція йде з прискоренням. Така умова відповідає процесу розвитку горіння. Якщо швидкість утворення активних центрів реакції

менша за швидкість обриву ланцюгів, в системі встановлюється стаціонарна концентрація вільних радикалів, відбувається гальмування хімічної реакції, і горіння припиняється.

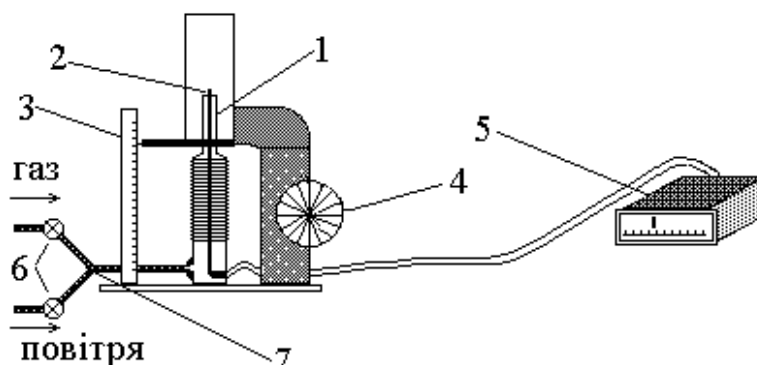
Експериментальна частина роботи

Дослід 1. Дослідження температурного режиму полум'я контактним методом за допомогою термопар

Мета роботи: Дослідити температурний режим в різних зонах дифузійного та кінетичного полум'я за допомогою термопар.

Опис лабораторної установки

Основною частиною лабораторно установки є газовий пальник, в трубці якого розміщено термопару, рис. 1.2.



- 1 – газовий пальник; 2 – термопара; 3 – лінійка вимірювальна;
4 – регулювальний гвинт; 5 – мілівольтметр для термопари;
6 – регулювальні крани; 7 – магістраль подачі газу

Рисунок 1.2 – Схема лабораторної установки для визначення температурного режиму ламінарного полум'я

Трубка пальника може пересуватись відносно нерухомої термопари за допомогою регулювального гвинта. У такий спосіб змінюється висота точки вимірювання температури від кромки пальника, що дозволяє вимірювати температуру в різних зонах полум'я за його віссю. Для захисту від коливань повітря, полум'я на пальнику захищене скляним ковпаком. Комп'ютеризована версія приладу виводить на екран значення температури та висоту точки вимірювання.

Порядок проведення лабораторної роботи

1. Відкрити кран подачі газу і запалити газовий пальник, відрегулювати висоту полум'я (2-2,5 см).
2. Визначити вид полум'я, зарисувати будову полум'я в лабораторний журнал, вказавши характерні зони полум'я та їх візуальні ознаки.
3. Провести вимірювання температури в різних зонах полум'я, змінюючи положення трубки газового пальника відносно термопари регулювальним гвинтом. Результати вимірювань записати в таблицю результатів дослідження.
4. Увімкнути подачу повітря в газову магістраль для створення кінетичного режиму горіння. Регулюючи подачу повітря за допомогою крану, досягти блакитного світіння полум'я. Повторити вимірювання температури в різних зонах полум'я.
5. Після закінчення вимірювань вимкнути подачу газу і повітря.
6. За результатами досліджень побудувати графік зміни температури за висотою факелу полум'я для кінетичного і дифузійного режиму горіння. Зробити висновок.

Таблиця результатів дослідження (зразок оформлення)

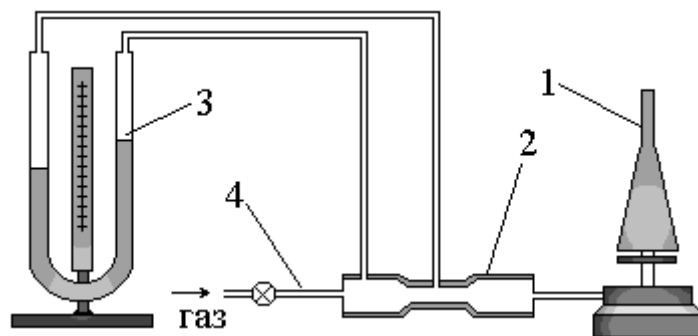
№	Точка вимірювання, мм.	Температура, °C	
		Дифузійне полум'я	Кінетичне полум'я

Дослід 2. Дослідження режиму руху дифузійного полум'я

Мета роботи: Дослідити газодинамічний режим дифузійного полум'я в залежності від швидкості руху газової суміші

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається із газового пальника, магістралі подачі газу через трубку Вентурі (витратомір), з якої знімається різниця тисків на водяний манометр з підфарбованою водою, рис. 1.3.



1 – газовий пальник; 2 – трубка Вентурі; 3 – U-подібний водяний манометр;
4 – магістраль подачі газу

Рисунок 1.3 – Схема установки дослідження газодинамічного режиму полум'я

Трубка Вентурі являє собою трубку із входним і вихідним отворами різного діаметра. В результаті пропускання газу через трубку Вентурі утворюється різниця тисків, яка залежить від швидкості руху газу і реєструється за допомогою U-подібного манометра. Змінюючи швидкість протікання газу, можна досягти різних режимів горіння (ламінарного, перехідного, турбулентного).

Порядок проведення лабораторної роботи:

1. Увімкнути подачу газу, запалити пальник, встановити мінімальну подачу газу.
2. Записати показання манометра, розрахувати швидкість руху газу і число Рейнольдса.
3. Визначити вид полум'я за газодинамічним режимом.
4. Збільшити подачу газу, записати показання манометра, розрахувати швидкість руху газу і число Рейнольдса, визначити вид полум'я.
5. Результати занести в таблицю результатів дослідження.
6. Після закінчення вимірювань вимкнути подачу газу.
7. Обробити результати дослідження, зробити висновок.

Обробка результатів досліду

1. Розрахувати швидкість руху газу за формулою:

$$\omega_{\Gamma} = \sqrt{2g \frac{\rho_{\text{В}}}{\rho_{\Gamma}} \frac{\Delta H}{1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4}},$$

де g – прискорення вільного падіння, $9,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$; $\rho_{\text{В}}$ – густина води, $1000 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$;
 ρ_{Γ} – густина газу, $\rho_{\Gamma} = 0,7 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$; $d_1 = 1 \text{ мм}$, $d_2 = 9 \text{ мм}$ – діаметри на вході та на виході трубки Вентурі; ΔH – показання водяного манометра, м.

2 Розрахувати число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\rho_{\Gamma} \omega_{\Gamma} d_o}{\mu_{\Gamma}},$$

де ω_{Γ} – швидкість руху газу, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; d_o – діаметр отвору пальника, 10^{-2} м ;
 μ_{Γ} – динамічна в'язкість газу, $10^{-4} \text{ кг}\cdot\text{м}^{-1}\text{с}^{-1}$.

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

№	Показання манометра, ΔH , м	Швидкість руху газу, v_{Γ} , $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$	Число Рейнольдса, Re	Режим полум'я

Контрольні запитання

1. Особливості процесу горіння та його відмінності від інших видів окиснення.
2. Класифікація процесів горіння.
3. Будова полум'я: зони, процеси, що відбуваються в кожній зоні, їх характеристики в дифузійному та кінетичному полум'ї.
4. Температурний режим полум'я.
5. Основні положення пероксидної теорії горіння.
6. Основні положення ланцюгової теорії горіння. Розгалужені та нерозгалужені ланцюгові реакції.
7. Складання рівнянь реакцій горіння речовин в кисні та повітрі; визначення об'ємів повітря і продуктів згорання.

1.2 Матеріальний та енергетичний баланс процесу горіння

Лабораторна робота ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛЬНОГО БАЛАНСУ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ

Теоретична частина роботи

Одним з основних аспектів процесу горіння є матеріальний баланс між вихідними речовинами та продуктами реакції горіння. На основі матеріального балансу розрахунковим шляхом можна визначити кількість повітря, необхідного для горіння, об'єм і склад продуктів повного згорання, температуру горіння й інші параметри, які визначають характер розвитку пожежі.

Розраховуючи об'єм повітря, необхідного для повного згорання одиниці кількості горючої речовини, і об'єм продуктів горіння, які утворюються при цьому, розрізняють *питому* і *повну, теоретичну* та *дійсну* кількість повітря, яка витрачається на згорання горючої речовини, та продуктів згорання:

– *питома* – необхідна для згорання одиниці кількості горючої речовини (1 моль, 1 м³, 1 кг);

– *повна* – необхідна для згорання фактичної кількості горючої речовини;

– *теоретична* – мінімальна необхідна для повного згорання горючої речовини;

– *дійсна* – та, яка фактично надходить на згорання горючої речовини.

Мінімальний об'єм повітря, який необхідний для повного згорання одиниці кількості горючої речовини (1 моль, 1 м³, 1 кг), називають *питомим теоретичним об'ємом повітря* $v_{\text{п}}^0$.

В дійсності об'єм повітря, що надходить до зони горіння, відрізняється від теоретичного. Такий об'єм повітря, що приходить на одиницю кількості горючої речовини, називають *питомим дійсним об'ємом повітря* $v_{\text{п}}$.

Для опису забезпеченості процесу горіння повітрям застосовують поняття *коефіцієнта надлишку повітря* ($\alpha_{\text{п}}$), який показує, у скільки разів кількість повітря, що дійсно надходить до зони горіння, відрізняється від

теоретично необхідної кількості для повного згоряння горючої речовини:

$$\alpha_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{п}}^0}. \text{ Тоді дійсний питомий об'єм повітря дорівнює: } v_{\text{пов}} = \alpha_{\text{пов}} \cdot v_{\text{пов}}^0, \text{ м}^3.$$

Частина повітря, що не витрачена на горіння, переходить у продукти горіння і називається *надлишком повітря*. Надлишок повітря є різницею між кількістю повітря, що дійсно поступила на горіння, і теоретично необхідною:

$$\Delta v_{\text{пов}} = v_{\text{пов}} - v_{\text{пов}}^0 = v_{\text{пов}}^0 (\alpha_{\text{пов}} - 1), \text{ м}^3.$$

Якщо кількість повітря, що надходить до зони горіння, менше, ніж теоретично необхідна, відбувається неповне згоряння горючої речовини і утворюються продукти неповного горіння – CO, C_{тв} (сажа) та інші.

При дифузійному горінні кисень надходить до зони горіння з навколишнього простору, де він міститься в кількості 21% від загального об'єму повітря. В процесі вигорання кількість кисню зменшується, а кількість продуктів горіння збільшується, частина повітря, що надходить, змішується з продуктами горіння. Це уповільнює процес дифузії окисника в зону горіння і, відповідно, зменшує швидкість реакції горіння. При цьому утворюються продукти неповного згоряння, незважаючи на те, що загальна кількість повітря буде достатньою для повного окиснення горючої речовини. Коли вміст кисню у повітрі зменшується до критичного значення (у більшості випадків 14-16 %), полум'яне горіння припиняється, але для пористих і волокнистих матеріалів можливе гетерогенне горіння (тління), для підтримування якого достатньо приблизно 5 % кисню.

Таким чином, при дифузійному горінні уявний коефіцієнт надлишку повітря більше 1. Знаючи залишкову концентрацію кисню в продуктах горіння, можна визначити коефіцієнт надлишку повітря як відношення процентного вмісту кисню у повітрі до його вмісту у продуктах горіння:

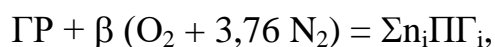
$$\alpha_{\text{п}} = \frac{21}{21 - O_2^{\text{п}}}. \text{ Тоді найменший коефіцієнт надлишку повітря при}$$

дифузійному горінні за умов, що утворюються лише продукти повного

$$\text{згоряння, становить: } \alpha_{\text{п}} = \frac{21}{21 - 14} = 3.$$

Розрахунок матеріального балансу процесу горіння залежить від складу та агрегатного стану горючої речовини.

Теоретичне число молів повітря та продуктів горіння для згорання одного моля горючої речовини індивідуального складу можна визначити з рівняння реакції горіння, яке для індивідуальних речовин має вигляд:



де β – *стехіометричний коефіцієнт рівняння реакції горіння*, який показує скільки молів кисню потрібно для згорання 1 молю ГР;
ГР – 1 моль горючої речовини;

$ПГ_i$ – *i-ий продукт горіння*;

n_i – *число молів i-ого продукту горіння*.

Сума $\sum n_i ПГ_i$ являє собою суміш продуктів повного окиснення горючих елементів, що входять до складу горючої речовини (CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , $HNaI$ тощо), а також негорючих газоподібних компонентів, що можуть міститися у вихідній горючій речовині (якщо це суміш газів). Азот повітря за типових температур пожежі не реагує, а тому як інертна речовина переходить у продукти реакції.

Питоме теоретичне число молів повітря для повного згорання 1 моля речовини, можна визначити як: $n_{\text{п}}^0 = (1+3,76)\beta = 4,76\beta$, моль·моль⁻¹.

Питоме теоретичне число молів продуктів горіння дорівнює сумі молів усіх продуктів горіння у рівнянні реакції горіння: $n_{\text{пг}}^0 = \sum n_{\text{пг}i}$, моль·моль⁻¹.

При горінні речовини з надлишком повітря визначають питоме дійсне число молів повітря та продуктів горіння: $n_{\text{п}} = n_{\text{п}}^0 \cdot \alpha_{\text{п}}$, моль·моль⁻¹;
 $n_{\text{пг}} = n_{\text{пг}}^0 + (\alpha_{\text{п}} - 1) n_{\text{п}}^0$, моль·моль⁻¹.

Процентний вміст окремих продуктів горіння визначається за часткою відношення кількості молів даного продукту до загальної кількості молів продуктів горіння. Якщо горіння протікає з надлишком повітря, в продуктах горіння буде наявний кисень, а для визначення вмісту азоту необхідно врахувати й азот, який перейшов до складу продуктів горіння із надлишком повітря: $\% O_2 = 100 \frac{(\alpha_{\text{п}} - 1) \cdot \beta}{n_{\text{пг}}}$, % ; $\% N_2 = 100 \frac{\alpha_{\text{п}} \cdot 3,76 \cdot \beta}{n_{\text{пг}}}$, %.

Однак на практиці кількість речовини вимірюють не в молях, а в m^3 , якщо це газ, або в kg , якщо речовина знаходиться в конденсованому стані (рідина чи твердий матеріал). Тоді в попередні формули потрібно підставляти не число молів, а об'єм, який займає моль газу, або масу, яка

еквівалентна молю речовини. Вид формули для розрахунку кількості повітря та продуктів горіння залежить від того, в якому агрегатному стані знаходиться горюча речовина. Треба пам'ятати, що 1 кмоль газу за даних температури T і тиску P займає об'єм V_{μ} м³: $V_{\mu} = 22,4 \cdot \frac{101,3 \cdot T}{273 \cdot P}$, м³·кмоль⁻¹,

де T – температура, К; P – тиск, кПа.

Для горючих речовин у рідкому або твердому агрегатному стані необхідно також враховувати, що 1 кмоль важить μ кг (μ – молярна маса, кг·кмоль⁻¹). Тоді питомі об'єми (на 1 кг горючої речовини) повітря та продуктів горіння визначають за формулами:

- питомий теоретичний об'єм повітря: $v_{\pi}^o = \frac{V_{\mu}^{\pi}}{\mu} 4,76\beta$, м³·кг⁻¹;
- питомий дійсний об'єм повітря: $v_{\pi} = \alpha \frac{V_{\mu}^{\pi}}{\mu} 4,76\beta$, м³·кг⁻¹;
- питомий теоретичний об'єм ПГ: $v_{\pi\Gamma}^o = \frac{V_{\mu}^{\pi\Gamma}}{\mu} \sum n_{\pi\Gamma i}$, м³·кг⁻¹;
- питомий дійсний об'єм ПГ: $v_{\pi\Gamma} = v_{\pi\Gamma}^o + \frac{V_{\mu}^{\pi\Gamma}}{\mu} (\alpha - 1) 4,76\beta$, м³·кг⁻¹.

У разі горіння фактичної кількості горючої речовини визначають повні об'єми повітря, що витрачається на горіння, та продуктів горіння, що утворюються:

- повний теоретичний об'єм повітря $V_{\pi}^o = v_{\pi}^o m_{\Gamma p}$, м³;
- повний дійсний об'єм повітря $V_{\pi} = v_{\pi} m_{\Gamma p}$, м³;
- повний теоретичний об'єм ПГ $V_{\pi\Gamma}^o = v_{\pi\Gamma}^o m_{\Gamma p}$, м³;
- повний дійсний об'єм ПГ $V_{\pi\Gamma} = v_{\pi\Gamma} m_{\Gamma p}$, м³,

де $m_{\Gamma p}$ – маса горючої речовини, кг;

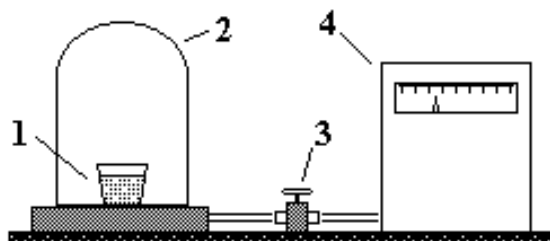
V_{μ}^{π} – молярний об'єм повітря та продуктів горіння за даної температури та тиску, м³·кмоль⁻¹.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Дослідити особливості матеріального балансу дифузійного горіння рідини в замкненому об'ємі.

Опис лабораторної установки

Установка має скляний ковпак об'ємом 5,5 л, під яким в тиглі спалюється задана кількість горючої рідини. Після припинення горіння в продуктах реакції за допомогою газоаналізатора вимірюється залишковий вміст кисню.



1 – тигель з рідиною; 2 – скляний ковпак; 3 – кран; 4 – газоаналізатор

Рисунок 1.4 – Схема установки для визначення складу продуктів горіння

Порядок проведення лабораторної роботи

Проведення досліду

1. Включити газоаналізатор.
2. Закрити кран.
3. За допомогою піпетки налити в тигель 5 мл виданої викладачем горючої рідини. Тигель із рідиною зважити на лабораторних вагах.
4. Поставити тигель на місце, швидко запалити рідину і накрити ковпаком. При запалюванні, щоб уникнути втрат, не торкатися сірником поверхні рідини.
5. Після припинення горіння відкрити кран і за допомогою газоаналізатора заміряти й записати концентрацію кисню в продуктах реакції.
6. Зняти скляний ковпак, зважити тигель, визначити масу рідини, що залишилась в тиглі.
7. Дослід повторити ще два рази, провітрюючи ковпак від продуктів горіння попереднього досліду. Результати вимірювань занести в таблицю й обчислити їх середньоарифметичні значення.

Таблиця результатів дослід (зразок оформлення)

№ з/п	Маса тиглю з рідиною, г		Концентрація кисню в продуктах горіння, %
	початкова, $m_{\text{п}}$	кінцева, $m_{\text{к}}$	
...			
середнє значення			

Обробка результатів дослід

Розрахунки виконуються тільки для середніх величин.

Виконати прямий розрахунок: за експериментальним значенням маси рідини, що вигоріла, розрахувати концентрацію кисню в продуктах реакції і порівняти її з виміряною величиною:

1. Написати рівняння горіння виданої рідини.
2. Розрахувати масу рідини, що вигоріла: $m_{\text{рід}} = m_{\text{п}} - m_{\text{к}}$, г;
3. Обчислити теоретичний об'єм повітря, необхідний для згорання цієї маси рідини, $v_{\text{п}}^{\circ}$, л.

4. Визначити коефіцієнт надлишку повітря: $\alpha = \frac{v_{\text{п}}^{\text{пр}}}{v_{\text{п}}^{\circ}}$, де $v_{\text{п}}^{\text{пр}}$ – об'єм повітря в приладі, $v_{\text{п}}^{\text{пр}} = 5,5$ л.

5. Розрахувати з урахуванням α концентрацію кисню в продуктах горіння й обчислити відносне її відхилення від виміряної величини.

Виконати обернений розрахунок: за виміряною величиною концентрації кисню в продуктах горіння обчислити масу рідини, що вигоріла, і порівняти її з експериментальним значенням. Обчислення виконати за тими ж формулами, але в зворотному порядку, і визначити відносне відхилення обчисленого значення маси рідини, що вигоріла, від виміряної експериментально.

Результати прямого і зворотного розрахунків матеріального балансу (для середніх значень) занести в таблицю.

Таблиця результатів розрахунків (зразок оформлення)

Маса рідини, що вигоріла, г			Концентрація кисню, % об.		
за дослідом	за розрахунком	відносне відхилення, %	за дослідом	за розрахунком	відносне відхилення, %

Зробити загальні висновки за результатами лабораторної роботи.

Контрольні запитання

1. Методика складання рівнянь реакцій горіння речовин в кисні та повітрі.
2. Горіння із надлишком повітря. Коефіцієнт надлишку повітря α .

3. Продукти горіння, їх склад, класифікація.
4. Дим та його небезпека.
5. Визначення об'ємів повітря і продуктів згоряння при горінні індивідуальної речовини.
6. Визначення об'ємів повітря і продуктів згоряння при горінні складної речовини.

Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ПРОДУКТІВ ГОРІННЯ

Теоретична частина роботи

В умовах пожежі атоми елементів, які входять до складу горючої речовини, переважно перетворюються на газоподібні оксиди цих елементів: CO_2 , H_2O , SO_2 та ін. Виняток становлять галогени. Якщо до складу даної речовини входить достатня кількість гідрогену, атом галогену при горінні утворює гідрогенгалогенід, у протилежному випадку – галоген виділяється у вільному вигляді. За умови неповного згоряння номенклатура продуктів, що утворюються, набагато більш різноманітна, бо з'являються продукти неповного згоряння та розкладання, наприклад, чадний газ CO , частинки вільного карбону (сажа).

У суміш продуктів згоряння, що відходить від осередку горіння або пожежі, входить й азот повітря. Кисень з повітря витратився на горіння, а азот залишився; у цю суміш може входити й кисень: якщо він надійшов на горіння у надлишку. Всі ці компоненти входять до складу продуктів згоряння. Отже, *продуктами горіння називають* газоподібні, рідкі та тверді речовини, що утворюються під час розкладання горючої речовини та її реагування з повітрям у процесі горіння.

Основну частину продуктів згоряння складають газоподібні речовини. Тому аналіз продуктів згоряння найчастіше зводиться до аналізу складу газової фази. При повному згорянні речовини та відомій кількості повітря, яке було витрачене на спалювання, цей склад може бути визначений розрахунком.

Схема проведення розрахунку матеріального балансу.

Наприклад, під час горіння згоряє m кг речовини A за умов у газовій суміші: температура – T_r , тиск – P_r . Обчислити об'єм продуктів згоряння за цих умов та відсотковий склад продуктів горіння, що утворилися.

Розв'язання

1. Визначаємо масу μ -молекули даної речовини А.
2. Складаємо рівняння реакції горіння:



3. Визначаємо загальне число молей продуктів горіння:

$$\sum n_i = n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{N_2} + \dots = a + b + \dots + \beta \cdot 3,76.$$

4. Визначаємо молярний об'єм газів за даних умов: $V_\mu = \frac{22,4 \cdot P_o \cdot T_\Gamma}{P_\Gamma \cdot T_o}$, м³.

5. Перераховуємо питимий об'єм згорання 1 молю речовини на згорання 1 кг. Якщо при згорянні μ кг горючої речовини виділяється $V_\mu \sum n_i$ газоподібних продуктів горіння, то при згорянні 1 кг – в μ разів менше:

$$V_{п.г.} = \frac{V_\mu \cdot \sum n_i}{\mu}, \text{ м}^3. \text{ При згорянні } m \text{ кг горючої речовини виділиться } V_{п.г.}$$

продуктів горіння в m разів більше: $V_{п.г.} = \frac{V_\mu \cdot \sum n_i \cdot m}{\mu}$, м³; за н.у. $V_\mu = 22,4$ м³,

$$\text{тоді: } V_{п.г.} = \frac{22,4 \cdot \sum n_i \cdot m}{\mu}, \text{ м}^3.$$

Якщо горіння було з надлишком повітря, то продукти горіння будуть містити надлишкові кисень і азот, а також азот повітря після витрачання кисню;

– кількість молів надлишкового кисню: $n_{O_2} = \beta (\alpha - 1)$, моль,

– надлишкового азоту: $n_{N_2} = 3,76 \beta (\alpha - 1)$, моль,

– тоді азоту разом азоту з повітря: $n_{N_2} = 3,76 \beta \alpha$, молів.

За наявності атомів нітрогену в молекулі горючої речовини до цієї кількості буде додаватися молекулярний азот, який буде утворюватися під час горіння.

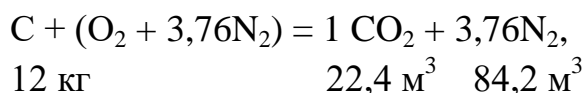
Якщо кількість горючої речовини відома в об'ємних одиницях, то розрахунок спрощується, оскільки за законом Авогадро кількість молів пропорційна кількості об'ємів, тому не потрібно враховувати молярні маси. Тобто, якщо задано $V_{г.г.}$ м³ горючого газу, то можна обчислити

тільки кількість молів продуктів згоряння (Σn_i), яку дає 1 моль горючого газу, а далі: $V_{\text{пр}}^{\circ} = V_{\text{гг}} \Sigma n_i$. Для отриманого результату треба врахувати фактичні умови даного горіння за формулою універсального газового закону. Відсотковий склад отриманої суміші продуктів горіння обчислюють у мольних або в об'ємних відсотках:

$$\%CO_2 = \frac{n_{CO_2} \cdot 100}{\Sigma n_i}; \quad \%H_2O = \frac{n_{H_2O} \cdot 100}{\Sigma n_i}; \quad \%N_2 = \frac{n_{N_2(\text{загальн})} \cdot 100}{\Sigma n_i};$$

$$\%O_2 = \frac{n_{O_2} \cdot 100}{\Sigma n_i}.$$

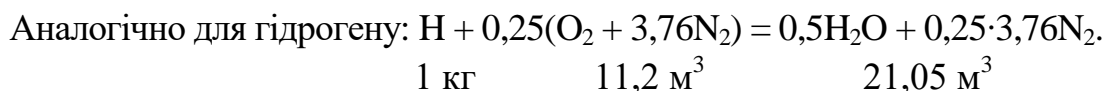
Горючі органічні речовини складаються, головним чином, з карбону та водню, іноді до їх складу входять кисень, сульфур, нітроген, фосфор, галогени. Для кожного горючого хімічного елемента можна скласти реакцію горіння. Наприклад для карбону:



тобто, при спалюванні 1 молю карбону (що відповідає 12 кг) утворюється 1 моль (або 22,4 м³) CO₂ і залишається від повітря 3,76 моля (або 84,2 м³) азоту. Тоді об'єми продуктів горіння при спалюванні 1 кг карбону будуть наступні:

$$V_{CO_2} = \frac{22,4}{12} = 1,86 \text{ м}^3; \quad V_{N_2} = \frac{84,2}{12} = 7,0 \text{ м}^3,$$

тобто при спалюванні 1 кг карбону утворюється 1,86 м³ вуглекислого газу і залишається від повітря 7,0 м³ азоту.



тобто, при спалюванні 1 кг водню утворюється 11,2 м³ пари води і залишається від повітря 21 м³ азоту.

Тоді при спалюванні 1 кг суміші карбону і водню кількість CO₂ буде дорівнювати масовій частці карбону, помноженій на 1,86 м³; води – масовій частці водню, помноженій на 11,2 м³; азоту – сумі масових часток карбону, помноженої на 7,0 м³, і масових часток водню, помноженої на 21 м³.

Наприклад, при спалюванні 1 кг речовини, яка є сумішшю 80 % карбону і 20 % гідрогену, за нормальних умов об'єм продуктів горіння дорівнюватиме:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,8 \cdot 1,86 = 1,49 \text{ м}^3; \quad V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,2 \cdot 11,2 = 2,24 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,8 \cdot 7,0 + 0,2 \cdot 21,0 = 5,6 + 4,2 = 9,8 \text{ м}^3.$$

Якщо до складу горючої речовини входять нітроген або волога, то під час горіння вони теж переходять у газоподібний стан і їх треба додавати до загальної кількості азоту або водяної пари за рівнянням реакції горіння. За нормальних умов 1 кг нітрогену дає $\frac{22,4}{28} = 0,8 \text{ м}^3$ азоту, а 1 кг вологи – $\frac{22,4}{18} = 1,24 \text{ м}^3$ водяної пари. Наявність кисню у молекулі горючої речовини зменшує потребу в ньому з повітря, тому водночас меншає кількість азоту у продуктах горіння.

Розрахунок об'єму продуктів горіння речовини за відсотковим вмістом хімічних елементів можна спростити, якщо узагальнити дані у формі табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Розрахунок об'єму продуктів горіння речовини

Речовина	$V_{\text{CO}_2}, \text{ м}^3$	$V_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ м}^3$	$V_{\text{N}_2}, \text{ м}^3$
Карбон	$\dots \cdot 1,86$	–	$\dots \cdot 7,0$
Гідроген	–	$\dots \cdot 11,2$	$\dots \cdot 21,0$
Нітроген у паливі	–	–	$\dots \cdot 0,8$
Вода у паливі	–	$\dots \cdot 1,24$	–
Нітроген за рахунок кисню	–	–	$\dots - x \cdot 2,63$
Кількість кожного ПГ

Тоді продукти горіння разом: $V_{\text{п.г.}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + \dots = \dots \text{ м}^3.$

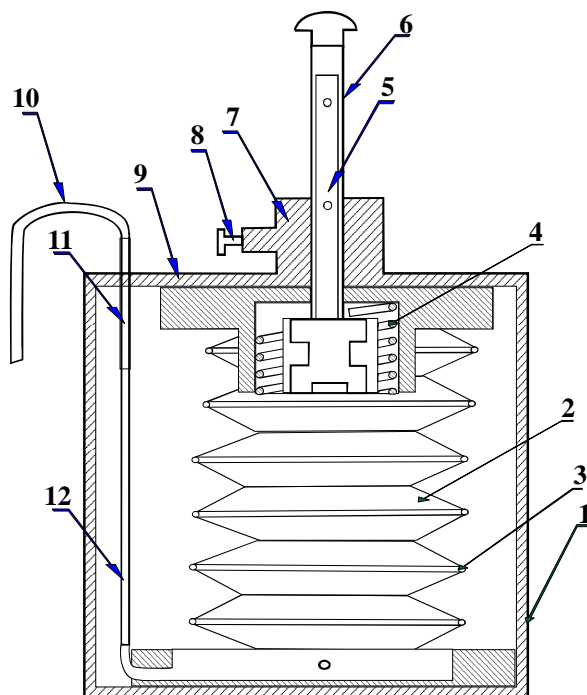
На практиці склад продуктів горіння (а також інших газоподібних сумішей) визначають експериментально за допомогою газоаналізаторів різного ступеня складності та точності. Одним із простих та портативних приладів цього призначення є УГ-2 (універсальний газоаналізатор). Він дозволяє визначати в повітрі домішки не тільки продуктів згорання, а й інших шкідливих речовин, які з'явилися в результаті внесення сторонніх газоподібних чи летючих речовин.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Визначити склад продуктів горіння та умови згоряння горючої речовини.

Опис лабораторної установки

Основою лабораторної установки є прилад УГ-2. До складу установки входять повітрязабірний пристрій (рис. 1.5) і набір індикаторних трубок, які заповнені забарвленим твердим сорбентом (окремим для кожної речовини).



1 – корпус; 2 – сиффон; 3 – кільце розпірне; 4 – пружина; 5 – канавка з заглибленнями;
6 – шток; 7 – втулка; 8 – фіксатор; 9 – плата; 10, 12 – трубки гумові; 11 – штуцер

Рисунок 1.5 – Повітрязабірний пристрій:

Сорбент в індикаторній трубці під час сорбції газів або парів певної речовини змінює колір. Після проходження крізь таку трубку певної кількості парів даної речовини колір сорбенту змінюється на відповідну цій кількості висоту. Окремо для кожного типу індикаторної трубки створено калібровану шкалу залежності висоти зміни забарвлення від вмісту в повітрі парів цієї речовини. Кількість повітря, яка протягується крізь індикаторну трубку, задається повітрязабірним пристроєм з набором штоків, який з'єднується з індикаторною трубкою гнучкою (гумовою) трубкою.

Схема повітрязабірного пристрою наведена на рис. 1.5. Шток пристрою 6 має повздовжні канавки з двома заглибленнями, призначеними для його фіксації за допомогою фіксатора 8 в нижньому і верхньому положенні. Відстань між заглибленнями підібрана так, що при ході штока від нижнього до верхнього заглиблення в сільфонову камеру набирається об'єм газу, позначений під головкою штока. При аналізі саме такий об'єм газу або повітря пристрій протягує крізь індикаторну трубку.

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка проведення досліду

1. Перевірити герметичність сільфонової камери: обрати необхідний шток, установити його у відповідне гніздо, зафіксувати в нижньому положенні. Перегнути гнучку трубку та відпустити фіксатор. Камеру вважають герметичною, якщо 2 хв. немає руху штока. Після перевірки шток фіксують в нижньому положенні.

2. Під'єднати індикаторну трубку до гнучкої трубки; залишити отвір з маркуванням вільним.

Проведення досліду

1. У спеціальній ємності провести спалювання досліджуваної речовини.

2. Встромити отвір індикаторної трубки в середовище продуктів горіння, відпустити фіксатор штока, одночасно відмітити час початку прокачування.

3. Зареєструвати час проходження штока від нижнього до верхнього положення. Занести отримані дані до таблиці.

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

Продукт горіння	Забарвлення сорбенту: до / після досліду	Об'єм аналізованого повітря, мл	Час ходу штоку, с	Концентрація газу, мг/м ³
	/			

4. Загасити полум'я, накривши ємність спеціальною кришкою.

5. Від'єднати індикаторну трубку, порівняти висоту стовпчика сорбенту, який змінив колір, з каліброваною шкалою, занести в журнал досліджень отриманий вміст даного продукту горіння в газовій суміші. Прибрати робоче місце.

6. Розрахувати склад продуктів горіння, порівняти експериментальні дані з теоретичними, зробити висновок про надлишок повітря в продуктах горіння. Обчислити коефіцієнт надлишку повітря.

Обробка результатів досліду

1. Записати назву та хімічну брутто-формулу речовини.
2. Скласти рівняння хімічної реакції горіння речовини.
3. Визначити відсотковий атомарний склад речовини.
4. Визначити склад продуктів горіння речовини відповідно до її атомарного складу; для зручності оформити розрахунок у вигляді таблиці 1.3.
5. Визначити відсотковий склад продуктів горіння.
6. Зробити загальні висновки за результатами лабораторної роботи.

Контрольні запитання

1. Що показує стехіометричний коефіцієнт реакції горіння?
2. Для якої кількості горючої речовини пишуться рівняння хімічних реакцій під час опису процесів горіння?
3. Яким чином хімічні рівняння для опису процесів горіння враховують наявність в окиснику (повітрі) аргону та гелію?
4. Молярна маса ацетилену 26 атомних одиниць маси. Який об'єм займають 26 кг ацетилену при температурі 0 °C і тиску 380 мм рт. ст.?
5. Який об'єм займає 1 моль ацетилену за нормальних умов?
6. Для спалювання 1 моля H_2 теоретично необхідно 0,5 молів O_2 . Скільки m^3 повітря необхідно для спалювання за нормальних умов 2 кг водню?

Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ДИФУЗІЙНОГО ПОЛУМ'Я ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИЧНОГО ПРОМЕТРА

Теоретична частина роботи

Температурою горіння називають ступінь нагріву продуктів горіння за рахунок теплоти згоряння. Теплотою згоряння називають кількість тепла, що виділяється при згорянні одиниці кількості речовини з утворенням продуктів повного згоряння. Тобто, температурою горіння є та максимальна температура, до якої в процесі горіння нагріваються продукти горіння разом з азотом повітря. За мірою спрощень у

розрахунках розрізняють калориметричну, адіабатичну, теоретичну та дійсну температуру горіння.

Під *калориметричною температурою горіння* розуміють температуру, до якої нагріваються продукти горіння за наступних умов:

- вся теплота згорання, що виділилася у процесі реакції, йде на нагрівання продуктів горіння, втрати тепла відсутні ($Q_{\text{пр}} = Q_{\text{н}}$);
- відбувається повне згорання горючої суміші стехіометричного складу (тобто немає надлишку або нестачі повітря, $\alpha = 1$, кількість наявного повітря відповідає теоретичній);
- не відбувається термічної дисоціації продуктів горіння;
- горюча суміш знаходиться за нормальних умов, тобто за початкової температури 273 К і тиску 101,3 кПа.

Тобто калориметрична температура горіння може бути досягнута за найбільш сприятливих умов для розвитку горіння та збереження тепла; вона залежить тільки від природи речовини та розраховується виходячи зі значень *нижчої теплоти згорання* даної речовини (гарячі продукти горіння, вода в них газоподібна), а також суми ентальпій продуктів згорання. Енергія, яка витрачається на нагрівання продуктів згорання від 0 °С до калориметричної температури, – це та кількість тепла, що виділилася при горінні. Оскільки ця енергія витрачається не тільки на збільшення тепловмісту продуктів згорання, а й на випаровування води, це буде нижча теплота згорання. Таким чином, тепло, що йде на нагрівання продуктів згорання до калориметричної температури, дорівнює нижчій теплоті згорання $q_{\text{г}} = Q_{\text{н}}$, тобто теплоті, що виділяється під час горіння за умови утворення води в газоподібному стані. Це тепло повністю витрачається на нагрівання продуктів згорання і відповідає їх тепловмісту.

Адіабатична температура горіння на відміну від калориметричної враховує тепловтрати на нагрівання надлишку повітря за умови наявності дійсної кількості повітря та $\alpha > 1$.

Теоретична температура горіння на відміну від калориметричної враховує тепловтрати на дисоціацію продуктів горіння слід враховувати за температур, вищих за 1700 °С: $2\text{CO}_2 = 2\text{CO} + \text{O}_2 - 566 \text{ кДж}$, $2\text{H}_2\text{O} = 2\text{H}_2 + \text{O}_2 - 478 \text{ кДж}$.

Дійсна температура горіння на відміну від попередніх враховує всі фактичні тепловтрати, включаючи неповноту згорання. Тобто, це температура, до якої нагріваються продукти горіння в реальних умовах; при цьому враховується, що горіння може проходити з надлишком або нестачею повітря (із неповним згоранням горючої речовини як хімічний недопал або фізичний недопал – за недостатнього контакту компонентів суміші), значними тепловтратами у навколишнє середовище, а початкові

умови, в яких знаходиться горюча суміш, можуть відрізнитись від нормальних. Дійсна температура горіння завжди нижча за калориметричну та є певною її часткою.

Експериментально визначити температуру горіння багатьох речовин досить складно, що обумовлено необхідністю проведення досліду за підвищених температур; до того ж треба вимірювати температуру газу, який знаходиться у стані хімічного перетворення. У той же час, теорія дозволяє із достатньою точністю розрахувати калориметричну або адіабатичну температуру горіння, виходячи із закону збереження енергії та хімічного складу речовини. Використовують два розрахункові методи визначення адіабатичної температури горіння: 1) за ентальпією продуктів горіння; 2) з використанням залежності теплоємності продуктів горіння від їх температури. Для розрахунку температури горіння потрібно спочатку визначити Q_H – нижчу теплоту згоряння та V_i – об'єм кожного продукту горіння, що утворюється при спалюванні 1 кг заданого матеріалу.

Молярну теплоту згоряння розраховують згідно із законом Гесса. Тепловий ефект реакції визначається як різниця між теплотою утворення кінцевих продуктів горіння та теплотою утворення вихідних компонентів системи. Враховуючи, що теплота утворення простих речовин (азоту та кисню) дорівнює нулю, тоді вираз для закону Гесса для опису реакції горіння у повітрі можна записати у вигляді:

$$\Delta H_{гор}^{\circ} = \sum \nu_i \Delta H_{f, i}^{\circ} - \sum \nu_j \Delta H_{f, j}^{\circ}, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1},$$

де $\Delta H_{гор}^{\circ}$, $\Delta H_{f, ГР}^{\circ}$, $\Delta H_{f, ПГі}^{\circ}$ – стандартні теплоти реакції горіння, утворення горючої речовини та продуктів горіння, $\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$; ν_i – число молів і-го продукту горіння в рівнянні реакції горіння.

Для складних речовин можна визначити молярні теплоти згоряння окремих хімічних елементів за законом Гесса та перерахувати у масові теплоти згоряння. Тоді з урахуванням відсоткового вмісту у речовині окремих хімічних елементів можна скласти загальну формулу для теплоти згоряння усієї речовини. Відповідний розрахунок для масової нижчої теплоти згоряння складних речовин проводять за формулою Менделєєва, яка враховує також відмінність вищої теплоти згоряння $Q'_в$ від нижчої на значення теплоти конденсації $Q'_{конд}$ пари води у складі продуктів горіння $Q'_H = Q'_в - Q'_{конд}$:

$$Q'_H = 339,4C + 1257H + 108,9(S - O - N) - 25,1(9H + W), \text{ кДж/кг}; \quad (1.1)$$

де С, Н, О, N, S, W – процентний вміст карбону, гідрогену, кисню, нітрогену, сульфуру та вологи у складі речовини.

Приклад розрахунку температури горіння складної речовини.

Визначити температуру горіння складної речовини з елементним складом: [С] = 50 %; [Н] = 5 %; [О] = 30 %; [N] = 2 %; [W] = 13 %; повітряна суміш – стехіометрична $\alpha = 1$; початкові умови – нормальні, $P_0 = 101,325 \text{ кПа}$, $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розв'язання

1. Визначаємо нижчу масову теплоту згорання складної речовини за формулою Менделєєва (1.1):

$$Q_H = 339,4 \cdot 50 + 1257 \cdot 5 - 108,9(30 + 2) - 25(9 \cdot 5 + 13) = 18297,0 \text{ кДж/кг.}$$

2. Визначаємо об'єм і склад продуктів горіння, для зручності складаємо таблицю.

Компонент	CO ₂ , м ³ /кг	H ₂ O, м ³ /кг	N ₂ , м ³ /кг
Карбон	$(50/100) \cdot 1,86 = 0,93$	–	$(50/100) \cdot 7,0 = 3,5$
Гідроген	–	$0,05 \cdot 11,2 = 0,56$	$0,05 \cdot 21 = 1,05$
Нітроген у пальному	–	–	$0,02 \cdot 0,8 = 0,016$
Вода у пальному	–	$0,13 \cdot 1,24 = 0,16$	–
Зменшення N за рахунок O пального	–	–	$-0,3 \cdot 2,63 = -0,79$
V _{п.г.}	0,93	0,72	$4,57 - 0,79 = 3,78$

Разом: $V_{п.г.} = 0,93 + 0,72 + 3,78 = 5,43 \text{ м}^3/\text{кг.}$

3. Визначаємо середню об'ємну ентальпію продуктів згорання:

$$Q_{Пг\text{сер}} = \frac{Q_H}{V_{п.г.}} = \frac{18297}{5,43} = 3375,8 \text{ кДж/м}^3.$$

Найбільший вміст у продуктах згорання має азот (залишок від повітря), тому він є основним теплоносієм. За додатком 1 для азоту знаходимо найближче менше значення до середньої ентальпії продуктів горіння, за яким обираємо значення температури горіння у першому наближенні: для $3375,8 \text{ кДж/м}^3$ найближче значення – $3211,5 \text{ кДж/м}^3$, що означає температуру горіння у першому наближенні $2200 \text{ }^\circ\text{C}$. За значенням

цієї температури обираємо ентальпії інших продуктів горіння та враховуємо об'єм кожного з них у суміші.

$$Q_{\text{III}}^{T_1} = q(\text{CO}_2) \cdot V(\text{CO}_2) + q(\text{H}_2\text{O}) \cdot V(\text{H}_2\text{O}) + q(\text{N}_2) \cdot V(\text{N}_2) = \\ = 0,93 \cdot 5034,4 + 0,72 \cdot 4168,2 + 3,78 \cdot 3211,5 = 19822,6 \text{ кДж.}$$

Отримане значення ентальпії (тепловмісту) продуктів горіння 19822,6 кДж є більшим за масову теплоту згорання 18297,0 кДж/кг. Тому відповідний до теплоти згорання запас енергії продуктів горіння має бути за меншої температури. Приймаємо температуру горіння у другому наближенні на 200 К меншою: $2200 - 200 = 2000 \text{ К}$. Для цієї температури повторюємо розрахунок.

$$Q_{\text{III}}^{T_2} = 0,93 \cdot 4493,98 + 0,72 \cdot 3704,6 + 3,78 \cdot 2892,0 = 17778,5 \text{ кДж.}$$

Отримане значення ентальпії (тепловмісту) продуктів горіння виявилось меншим за масову теплоту згорання 18297,0 кДж/кг, тобто в межах між двома проведеними розрахунками. Тоді адіабатичну температуру горіння (без врахування надлишку повітря співпадає з калориметричною) можна визначити методом лінійної інтерполяції (пропорційність місця теплоти згорання у діапазоні розрахованих значень ентальпій до діапазону температур горіння взятих у першому T_1 та другому T_2 наближенні):

$$T_{\text{ад}} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1)(Q_{\text{н}} - Q_{\text{III}}^{T_1})}{(Q_{\text{III}}^{T_2} - Q_{\text{III}}^{T_1})} \\ = 2200 + \frac{(2000 - 2200)(18297,0 - 19822,6)}{17778,5 - 19822,6} = 2050,7, \text{ К.}$$

У випадку, коли горить індивідуальна хімічна речовина, завдання трохи полегшується. $Q_{\text{н}}$ у цьому випадку можна визначати як різницю між теплотами утворення кінцевих та початкових речовин або взяти з табличних даних. У таблицях наведені теплоти горіння майже всіх поширених органічних речовин.

Експериментально температуру горіння визначають за допомогою термометрів, термопар, оптичних пірометрів та інших приладів. Як і в інших подібних випадках зручними у використанні є прості та недорогі прилади, які, однак, дають лише орієнтовне значення величини, що

вимірюється. Одними з найпростіших приладів для визначення температури є оптичні пірометри «Промінь» та ЛОП-72. Їх переваги – портативність, мобільність та можливість оперативного визначення температури полум'я або пожежі з області поза меж зони її критичного теплового впливу. Недоліками методу можна назвати недостатню точність та можливість суб'єктивного трактування показань (однаковість кольору об'єкта та еталонної розжареної електричної спіралі).

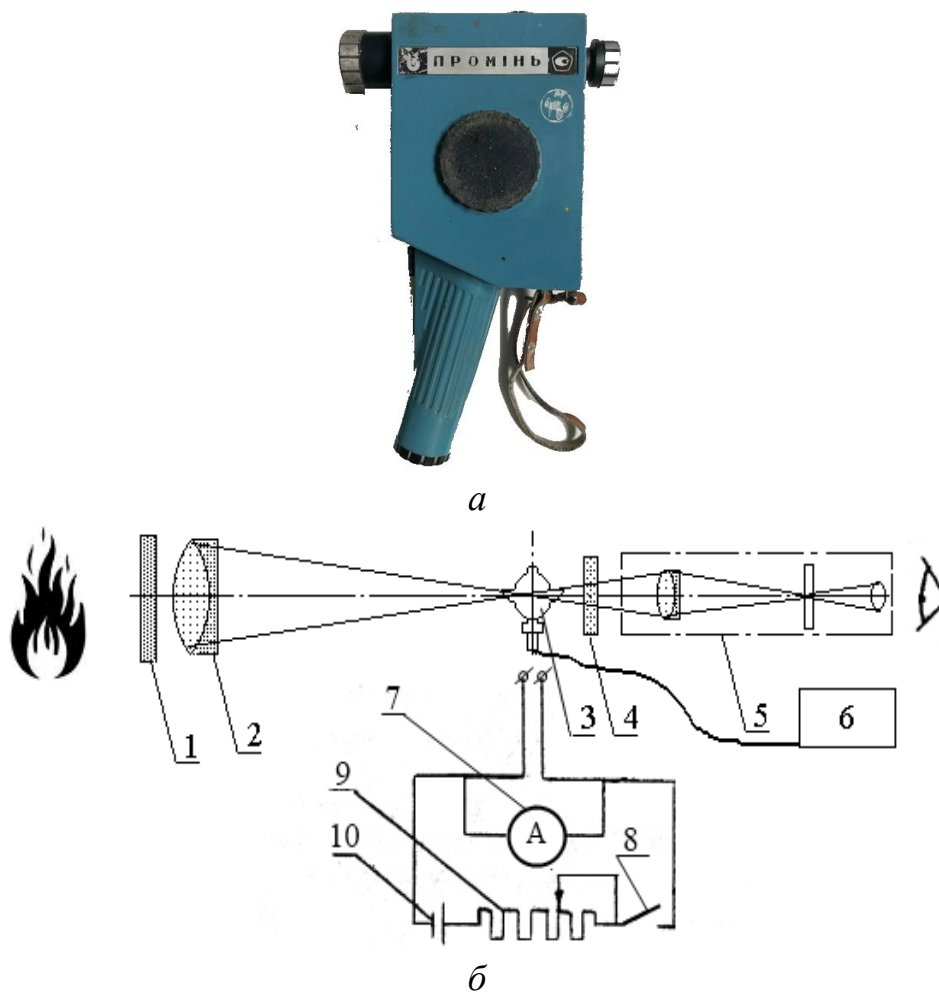
Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Дослідити температурний режим дифузійного полум'я досліджуваних речовин за допомогою пірометра.

Опис лабораторної установки

Оптичний пірометр «Промінь» призначено для вимірювання температури тіл, нагрітих вище за температуру видимого світіння. Температуру визначають за променистою яскравістю об'єкта шляхом порівняння з еталонною яскравістю спіралі електричної лампи розжарювання. Принцип дії пірометра полягає в порівнянні монохроматичної яскравості розжареного тіла (полум'я) з регульованою яскравістю спіралі розжарювання. Тверді тіла з однаковою температурою мають однаковий колір та яскравість світіння. Тому під час роботи приладу визначається момент фотометричної рівноваги за зникненням контуру розжареної спіралі електричної лампи на фоні розжареного тіла (полум'я).

Оптичний пірометр «Промінь» є оптичною камерою (рис. 1.6); рукоятка якої містить акумуляторні батареї (можливе живлення від електричної мережі) та вимикач; збоку корпусу є колесо реостату для зміни напруги, яка подається на електричну спіраль; має окуляр та регульований об'єктив для формування чіткого зображення розжареного тіла (полум'я) і нитки розжарювання; градуйовану шкалу для реєстрації результату вимірювання; світлодіодний індикатор роботи приладу, перемикач діапазонів вимірювання: I – 800-400 °С; II – 1200-2000 °С; III – 1800-3000°С. Основними елементами оптичного пірометру є спеціальна лампа (еталон світіння), яка знаходиться всередині зорової труби між об'єктивом і окуляром, та блок вимірювання температури.



1 – поглинаюче скло; 2 – об’єктив; 3 – спеціальна лампа; 4 – червоний світлофільтр; 5 – окуляр; 6 – блок вимірювання температури; 7 – амперметр, проградуїований у градусах; 8 – вмикання живлення; 9 – реостат для зміни струму; 10 – акумулятор

Рисунок 1.6 – Вигляд *a* та схема роботи *б* оптичного пірометра

Таким чином, робота пірометра ґрунтується на вимірюванні яскравості випромінювання нагрітого об’єкта шляхом порівняння з яскравістю еталону – спеціально пірометричної лампи з відомою залежністю температури спіралі розжарювання від величини струму, що протікає через неї. Оператор наводить об’єктив пірометра на розжарене джерело світлового випромінювання та шляхом зміни сили струму через спіраль розжарювання лампи, дорівнюють яскравість спіралі із яскравістю джерела випромінювання (в певний момент спіраль розжарювання зникає на фоні джерела випромінювання). Тоді температуру джерела випромінювання визначають за величиною сили струму, який протікає через спіраль розжарювання лампи, але при цьому амперметр заздалегідь відкалібровано та проградуїовано у градусах температури.

Поглинаюче скло служить для розширення діапазону вимірюваних температур; червоний світлофільтр – для монохроматизації світлового потоку.

Порядок проведення лабораторної роботи

Проведення досліду 1

1. Встановити пірометр перед джерелом випромінювання і приєднати до стабілізованого джерела живлення.

2. Досягти чіткого зображення спіралі розжарювання лампи на фоні джерела випромінювання шляхом переміщення окуляра 5.

3. Регулюючи силу струму лампи реостатом досягти зникнення спіралі розжарювання на фоні джерела випромінювання, (У разі перевищення яскравості джерела випромінювання у порівнянні з яскравістю спіралі пірометричної лампи, ввести поглинаюче скло 1).

4. Розрахувати середнє значення сили струму пірометричної лампи і визначити температуру джерела випромінювання. Результати занести в таблицю.

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

№	Об'єкт дослідження	Сила струму, А	Температура, °С

5. По закінченні досліду зробити висновок про фактори, що визначають температуру й колір полум'я.

Проведення досліду 2

1. Зовнішнім оглядом перевірити цілісність усіх частин пірометра.

2. Протерти лінзи окуляра та об'єктива чистою ватою, змоченою спиртом.

3. Перевірити справність контуру розжарювання нитки, для чого натиснути кнопку включення, відмітити свічення світлодіодного індикатору і, дивлячись в окуляр, повертати ручку реохорда до появи свічення нитки.

4. Ручкою перемикачів діапазонів установити межі вимірювання, задані викладачем.

5. Запалити в призначеній для цього ємності суміш, запропоновану викладачем.

6. Тримаючи прилад у лівій руці на відстані 0,5-1 м від полум'я і дивлячись в окуляр, направити об'єктив пірметра на центр полум'я і переміщенням об'єктива домогтися чіткої видимості полум'я.

7. Натиснути кнопку вмикання і правою рукою повертати ручку реохорда, добиваючись моменту рівноваги між яскравістю свічення полум'я і яскравістю свічення розжареної нитки.

8. Записати в журналі спостережень відмічену температуру.

9. Загасити полум'я спеціальною кришкою.

10. Протерти прилад і вкласти в призначений для нього футляр.

11. Прибрати робоче місце.

12. Записати в журналі спостережень назву речовини або суміші, що горіла.

13. Розрахунковим шляхом знайти значення адіабатичної температури горіння заданої речовини або суміші та порівняти її зі значенням дійсної температури горіння. Зробити висновок.

Контрольні запитання

1. У яких одиницях вимірюються теплота утворення і теплота згоряння?

2. Яку величину має теплота утворення молекули хлору?

3. На яку величину теплота утворення води більша за теплоту згоряння водню, якщо обидва процеси розглядаються за нормальних умов?

4. Вищою чи нижчою буде вважатися теплота згоряння бензину під час пожежі на складі пально-мастильних матеріалів?

5. Скільки кДж тепла виділиться при спалюванні 1 кг водню, якщо теплота його згоряння становить 241,8 кДж/моль?

6. Скільки масових відсотків «С» і скільки «Н» містить молекула метану CH_4 ?

7. Скільки відсотків кисню містить молекула сульфур двооксиду SO_2 ?

8. Скільки відсотків нітрогену містить молекула метиламіну CH_3NH_2 ?

9. Що називається температурою горіння?

10. Яку температуру горіння називають калориметричною, яку – дійсною?

11. Яку температуру горіння знаходять розрахунковим шляхом, яку – дослідним?

1.3 Горючі системи. Самоспалахування горючих систем

Лабораторна робота ВИЗНАЧЕННЯ СТАНДАРТНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ САМОСПАЛАХУВАННЯ

Теоретична частина роботи

Самоспалахування – це виникнення горіння в результаті різкого збільшення швидкості екзотермічних реакцій окиснення, що виникають під дією зовнішнього нагріву всієї горючої системи.

Температура самоспалахування t_{cc} – це найменша температура горючої системи, за якої в умовах спеціальних випробувань спостерігається спалахування усієї суміші водночас. Тобто при самоспалахуванні горюча суміш (ГС) вся цілком нагрівається до температури, вище якої вона самостійно, без додаткового зовнішнього впливу, спалахує. Характерними ознаками системи, що досягла t_{cc} , є те, що тепловиділення у ГС за рахунок реакції окиснення перевищує тепловіддачу від системи в навколишній простір, перехід від повільної реакції окиснення до горіння відбувається за певний час – період індукції.

В гомогенній системі, в якій горюча речовина і окисник знаходяться в газоподібному стані, збільшення температури призводить до збільшення швидкості хімічної реакції за законом Ареніуса: $\omega_{xp} = \varphi_{гр}^m \varphi_{ок}^n k \cdot \exp\left(\frac{-E_{акт}}{RT}\right)$, де $\varphi_{гр}$, $\varphi_{ок}$ – концентрації горючої речовини та окисника; m , n – стехіометричні коефіцієнти в реакції горіння для горючої речовини та окисника; k – константа швидкості хімічної реакції; $E_{акт}$ – енергія активації хімічної реакції, кДж·моль⁻¹; R – універсальна газова стала, кДж·моль⁻¹ К⁻¹; T – температура системи, К.

Реакції окиснення є екзотермічними (з виділенням тепла), тому в системі йде додатковий розігрів і зростання температури. Інтенсивність тепловиділення в посудині об'ємом V буде становити: $q(+) = Q_H V_{гс} \omega_{xp}$, де Q_H – теплота згоряння речовини, кДж·моль⁻¹; $V_{гс}$ – об'єм горючої суміші (посудини), м³, ω_{xp} – швидкість хімічної реакції, моль·с⁻¹. Але швидкість хімічної реакції не може бути нескінченною, тому лінія тепловиділення виходить на насичення, рис. 1.6.

Тепло, що виділяється в ході реакції окиснення, витрачається на самонагрів суміші, а тому й на підвищення швидкості реакції. Як тільки

температура горючої газової суміші всередині посудини підвищиться за рахунок накопичення в ній тепла і стане вище температури стінок посудини, виникне тепловий потік в навколишній простір. Якщо теплопередача від газу з температурою T здійснюється до стінок посудини з поверхнею S і температурою T_0 тільки шляхом теплопровідності (за відсутності конвекційних потоків і променистого переносу тепла), то швидкість передачі тепла не залежить від тиску, і її залежність від температури визначається з рівняння Ньютона: $q(-) = \alpha_k (T - T_0) S$, де T – температура газової суміші; T_0 – температура стінок посудини; S – площа поверхні тепловіддачі (стінок посудини); α_k – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі.

Якщо поступово підвищувати початкову температуру горючої суміші (температуру стінок посудини T_0) при незмінному тиску, то закономірності зміни швидкості тепловіддачі за різних початкових температур буде представлено серією прямих ($q(-)'$, $q(-)''$, $q(-)'''$) однакового нахилу, що відповідає незмінному значенню коефіцієнта тепловіддачі α_k .

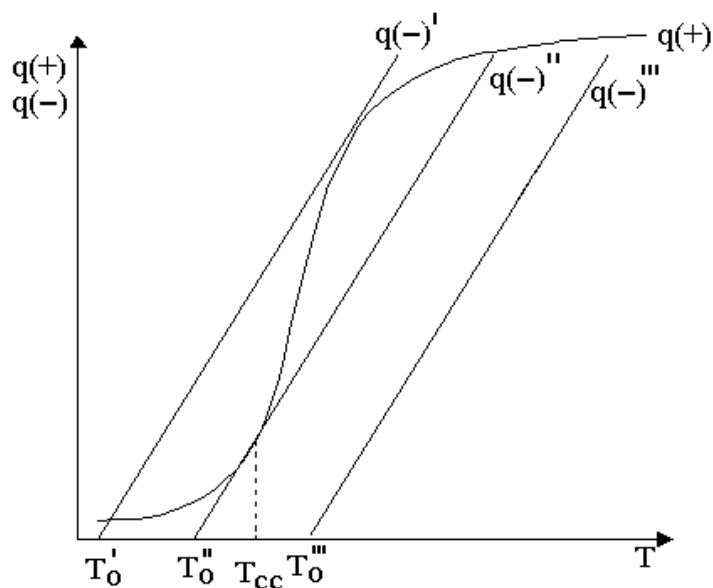


Рисунок 1.6 – Залежність інтенсивності тепловиділення і тепловіддачі в системі під час екзотермічної реакції від температури

Згідно тепловій теорії можливість самоспалахування визначається умовою дотику ліній тепловиділення $q(+)$ і тепловіддачі на стінки посудини $q(-)$. В точці дотику (за T_{cc}) є умови: тепла рівновага між тепловиділенням від хімічної реакції та тепловтратами в навколишнє середовище $q(+)$ = $q(-)$; тепловиділення та тепловтрата зростають з

однаковою швидкістю $\frac{dq(+)}{dT} = \frac{dq(-)}{dT}$; інтенсивність тепловиділення прискорюється $\frac{d^2q(+)}{dT^2} > 0$, а тепловтрат – ні.

За температури самоспалахування t_{cc} процес горіння речовини ще не виникає, він встановлюється в момент досягнення температури горіння, яка незначно перевищує t_{cc} . Але за температури самоспалахування створюються умови, що призводять до стрибкоподібного підйому температури через різке збільшення швидкості хімічної реакції. Спочатку йде період *самонагрівання*. Проміжок часу, протягом якого горюча суміш самонагрівається від температури стінок посудини T_0 до появи полум'яного горіння, називають *часом (періодом) індукції* теплового вибуху. Тобто поява полум'я у ГС відбувається не в момент розігріву її до t_{cc} , а через деякий проміжок часу. Протягом цього часу ГС самостійно розігрівається від температури стінок посудини T_0 до появи полум'яного горіння. Такий відрізок часу називають періодом індукції теплового вибуху. Тривалість цього періоду залежить від виду горючої речовини, складу ГС, умов у ГС. Чим нижча температура початкового розігріву системи, тим більший період індукції. Під час вимірювань за температуру самоспалахування приймають ту температуру стінок посудини, за якої період індукції є максимальним; t_{cc} та час індукції можуть бути використані як показник ступеня пожежної небезпеки горючих речовин та матеріалів.

Оскільки виникнення горіння можливе внаслідок змін тепловиділення і тепловіддачі (збільшення тепловиділення, зменшення тепловіддачі або одночасна зміна $q(+)$ і $q(-)$), то значення t_{cc} і величини індукційного періоду теплового вибуху не є постійними величинами. На t_{cc} речовин та на пожежну небезпеку технологічного процесу, де використовується горюча речовина, впливають три групи факторів, які характеризують: 1) вид горючої речовини; 2) склад горючої суміші; 3) умови, в яких знаходиться горюча суміш.

До 1 групи належать фактори: теплотворна здатність горючої речовини Q_H (залежить від складу горючої речовини); середня довжина карбонового ланцюга (залежить від будови і просторової структури горючої речовини).

Температура самоспалахування t_{cc} у різних класів сполук залежить від схильності цих сполук до реакцій окиснення. Окисно-відновні реакції, що лежать в основі процесу горіння, протікають через розрив зв'язків в

молекулах і утворення проміжних активних центрів. При збільшенні енергії розриву зв'язку важче йде реакція окиснення, а отже, самонагрівання буде протікати повільніше. Рівність між інтенсивністю тепловиділення і тепловіддачі буде досягатися за більш високої температури, отже і t_{cc} буде при цьому підвищуватись.

Найбільшу t_{cc} мають ароматичні вуглеводні. Наприклад, для бензолу C_6H_6 $t_{cc} = 864$ К, для циклогексану C_6H_{12} $t_{cc} = 543$ К, для гексану C_6H_{14} $t_{cc} = 534$ К.

Сполуки з ненасиченими зв'язками окиснюються легше, ніж насичені вуглеводні з тією ж кількістю атомів карбону, тому мають нижчу t_{cc} .

Кисневмісні похідні вуглеводнів (прості ефіри, альдегіди) мають t_{cc} нижчу ніж у вуглеводнів з тією ж кількістю атомів вуглецю в молекулі.

Для вуглеводнів ізомерної будови із збільшенням розгалужень в молекулі t_{cc} зростає. Так, н-бутан має C_4H_{10} $t_{cc} = 704$ К, а ізобутан C_4H_{10} має $t_{cc} = 749$ К.

В гомологічному ряду, частіше, найбільшу t_{cc} має перший член, оскільки його молекула більш стійка до приєднання кисню. Із збільшенням довжини карбонового ланцюга і молярної маси енергія зв'язку С-Н зменшується. Відбувається зміна конфігурації молекули і полегшується реакція з окисником, при цьому t_{cc} знижується. При збільшенні довжини нерозгалуженого ланцюга в молекулах одного гомологічного ряду починаючи з C_9-C_{10} , енергія зв'язків відрізняється незначною мірою, а отже t_{cc} змінюється мало.

Крім зменшення енергії зв'язку С-Н, із збільшенням кількості атомів карбону в молекулі горючої речовини збільшується її молекулярна маса, відповідно збільшується теплота згоряння речовини, тому при протіканні реакцій окиснення більше тепла піде на самонагрівання системи. Це приводить до того, що рівність між тепловиділенням і тепловіддачею настає за більш низької температури, а отже температура самоспалахування зменшується.

До 2 групи належать фактори: концентрації горючої речовини $\varphi_{гр}$, негорючих газів $\varphi_{нг}$, каталізаторів або інгібіторів окиснення у горючій суміші; вміст кисню в окисному середовищі $\varphi_{ок}$.

Швидкість хімічної реакції найбільша за *стехіометричного співвідношення* горючої речовини й окисника у суміші, тому за такої умови спостерігається мінімальне значення t_{cc} (більша безпека). За зміни концентрації горючої речовини від стехіометричної концентрації як у бік бідних сумішей (нестача горючої речовини і надлишок окисника), так і у

бік багатих сумішей (надлишок горючої речовини і нестача окисника) t_{cc} підвищується (менша небезпека). Це пояснюється тим, що при зменшенні концентрації горючої речовини чи окисника (відносно стехіометричного співвідношення) зменшується швидкість хімічної реакції, а, отже, й інтенсивність тепловиділення. При цьому рівновага між тепловиділенням та тепловіддачею буде досягатися за більшої температури, отже t_{cc} збільшується. Суміші, склад яких виходить за діапазон концентраційних меж поширення полум'я (КМПП), не здатні до самоспалахування.

Оскільки вміст кисню в повітрі не перевищує 21%, то частина тепла, що виділилася при окисненні горючої речовини в повітрі, буде витрачатися на нагрів великої кількості азоту, що не бере участі в реакції окиснення. При додатковому введенні в повітря кисню швидкість хімічної реакції, а отже і швидкість тепловиділення, збільшуються, а t_{cc} зменшується. При контакті деяких видів горючих речовин з чистим киснем можливе таке різке зниження t_{cc} , що навіть за температури навколишнього середовища виникає тепловий вибух.

При розбавленні негорючими компонентами суміші горючої речовини і окисника відбувається зниження концентрації реагуючих речовин, при цьому знижується швидкість хімічної реакції, а, отже й інтенсивність тепловиділення. Крім того, частина тепла, що виділяється, витрачається на нагрів додаткового негорючого газу. Внаслідок цього період індукції і t_{cc} будуть підвищуватися.

На t_{cc} речовин впливає наявність в суміші каталізатора або інгібітору. Для підвищення t_{cc} в систему вводять добавки, що інгібують, так, для зниження детонації палива у двигунах внутрішнього згоряння (*антидетонатори*). За наявності в системі каталізатора швидкість хімічної реакції зростає, при цьому збільшується інтенсивність тепловиділення і t_{cc} падає.

До 3 групи можна віднести: тиск в системі P ; об'єм $V_{гс}$ і діаметр посудини; площа поверхні тепловіддачі S ; коефіцієнт тепловіддачі α ; початкова температура суміші T_0 .

Збільшення об'єму реакційної посудини приводить до збільшення тепловиділення і, отже, до зниження t_{cc} . За зміни об'єму від десятків мілілітрів до 3–4 л t_{cc} знижується на десятки градусів; при подальшому збільшенні об'єму (більше за 5 л) зміна t_{cc} незначна.

Швидкість тепловіддачі визначається відношенням поверхні посудини до її об'єму: $S/V \sim d^2/d^3 \sim 1/d$. Відношення S/V називають «питомою поверхнею», воно визначає залежність швидкості тепловіддачі від температури. Для більшої питомої поверхні (менших об'ємів однакової

форми) t_{cc} зростає і можливе досягнення такого значення, при якому самоспалахування не відбувається. Тобто існує такий критичний діаметр посудини, більше за який відбувається тепловий вибух, а менше за який – ні. Цей принцип використовується в основі побудови вогнеперешкоджувачів, які застосовують для запобігання поширення полум'я по горючих системах в технологічному обладнанні. Вогнеперешкоджувачі – спеціальні пристрої різної конструкції (щілини, сітки, касети, гравійні засипки), принцип дії яких полягає в розбиванні горючої системи на маленькі об'єми, що значно збільшує площу тепловіддачі. При цьому t_{cc} горючої системи зростає аж до негорючого стану, і запалити таку суміш вже практично неможливо.

Підвищення початкової температури системи приводить до збільшення швидкості реакції окиснення, а тому і підвищення інтенсивності тепловиділення. Крім того, за більш високої початкової температури суміші знижується інтенсивність тепловіддачі. Все це приводить до зниження t_{cc} .

Підвищення тиску в системі також спричиняє збільшення швидкості реакції окиснення, а, отже, зниження t_{cc} . Однак потрібно враховувати ланцюгову природу процесу самоспалахування. Експерименти показують, що залежність t_{cc} від тиску дуже складна і залежить від виду горючої речовини.

Експериментально t_{cc} визначають методами: 1) впускання заздалегідь готової холодної суміші у вакуумовану нагріту посудину; 2) адіабатичне стиснення ГС; 3) метод «краплі»: ГС утворюють в нагрітій посудині шляхом випаровування горючої рідини. Але у всіх методах у досліджуваному об'ємі створюють стехіометричну концентрацію горючої речовини, за якої t_{cc} найменша.

Практичне значення температури самоспалахування: t_{cc} речовин використовують для проведення наступних видів аналізу пожежної небезпеки.

1. Порівняння пожежонебезпеки речовин за значенням t_{cc} .
2. Класифікація речовин по групах вибухонебезпечних сумішей з повітрям для вибору типу вибухозахищеного енергоустаткування згідно [7]:

Таблиця 1.4 – Визначення групи вибухонебезпечних повітряних сумішей за температурою самоспалахування горючої речовини

Група вибухонебезпечних сумішей	Температура самоспалахування, °С
T1	більше за 450
T2	300-450
T3	200-300
T4	135-200
T5	100-135
T6	85-100

Тоді за групою вибухонебезпечних сумішей встановлюють максимально допустиму температуру нагріву поверхні обладнання у вибухонебезпечних приміщеннях і у зовнішніх установках, якщо можливий контакт цих поверхонь з вибухонебезпечним середовищем.

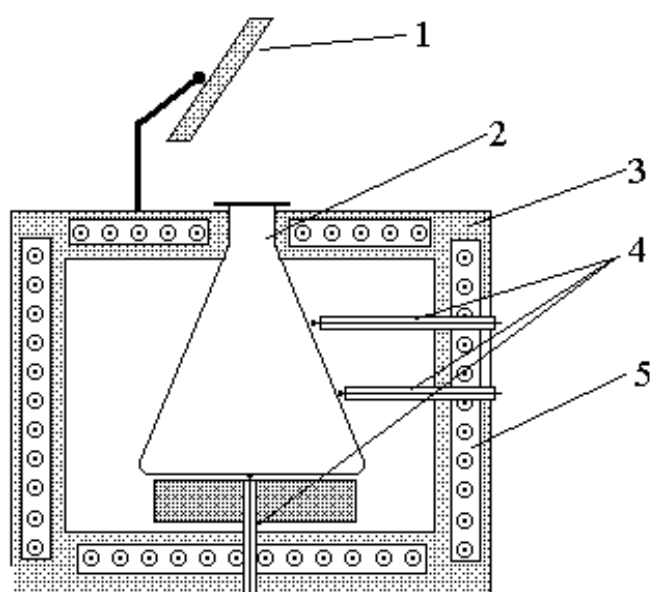
3) визначення допустимої температури нагрівання робочих поверхонь технологічного обладнання (безпечної температури $t_{без}$): необхідно підтримувати температури нагрівання поверхонь машин, механізмів, устаткування, пристроїв, речовин і матеріалів, що можуть вступити у контакт із горючим середовищем, нижче гранично допустимої, як 80 % від стандартної t_{cc} : $t_{без} \leq 0,8 \cdot t_{cc}$, °С.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Встановити експериментально стандартну температуру самоспалахування. Визначити фактори, що впливають на температуру самоспалахування.

Опис лабораторної установки

Стандартну температуру самоспалахування визначають за допомогою приладу СТС [7], який призначено для визначення стандартної t_{cc} парів рідин, газів і речовин, що плавляться, методом «краплі», рис. 1.7.



1 – оглядове дзеркало; 2 – реакційна колба; 3 – корпус термостату; 4 – термопари;
5 – нагрівальні елементи

Рисунок 1.7 – Прилад СТС для визначення стандартної температури самоспалахування:

Прилад являє собою термостат з рівномірним нагріванням реакційної посудини до заданої температури. Робочий діапазон температур приладу становить $50-600^{\circ}\text{C}$. Реакційною посудиною є скляна конічна колба об'ємом 200 см^3 . Вимірювання температури здійснюється за допомогою каліброваних термопар, які розташовані в обраних точках і знаходяться у тісному контакті із зовнішньою поверхнею колби. За температуру випробування приймають середнє значення між найменшою і найбільшою температурою, причому показання термопар між собою не повинні відрізнятися більше ніж на 1%.

Для дозування рідин використовують шприц або піпетку об'ємом 1 см³. За можливим спалахом у колбі спостерігають за допомогою дзеркала, яке закріплено над колбою на висоті 250 мм. Час індукції вимірюють за допомогою секундоміру.

Видалення продуктів реакції із колби між дослідами здійснюють за допомогою стиснутого повітря від компресору.

Порядок проведення лабораторної роботи ***Розрахункова підготовка до проведення досліду***

1. Записати речовину для проведення експериментальної частини роботи.

2. Для заданої речовини розрахувати: об'ємну та масову стехіометричні концентрації пари досліджуваної речовини в суміші із повітрям.

2.1 Скласти рівняння реакції горіння речовини у повітрі, визначити коефіцієнт β .

2.2 Розрахувати молярний об'єм газу за даних умов: $V_{\mu} = 22,4 \frac{101,3T}{273P}$, м³·кмоль⁻¹. де T – температура за даних умов, К; P – тиск за даних умов, кПа.

2.3 Розрахувати об'ємну та масову стехіометричну концентрацію речовини:

$$\varphi_{\text{смк}} = \frac{100}{1 + 4,76\beta}, \%; \quad \varphi'_{\text{смк}} = \varphi_{\text{смк}} \frac{10 \cdot \mu}{V_{\mu}}, \text{ г} \cdot \text{м}^{-3},$$

де β – стехіометричний коефіцієнт реакції горіння; μ – молярна маса горючої речовини, кг·кмоль⁻¹; V_{μ} – молярний об'єм газу за даних умов, м³·кмоль⁻¹.

3. Визначити об'єм рідини, який необхідно вводити в реакційну посудину для утворення стехіометричної концентрації:

$$V_{\text{рід}} = \frac{V_{\text{колби}} \varphi'_{\text{смк}}}{\rho_{\text{рід}}}, \text{ мл},$$

де $V_{\text{колби}}$ – об'єм реакційної посудини, мл; $\varphi'_{\text{смк}}$ – масова стехіометрична концентрація речовини, г·м⁻³; ρ – густина речовини, г·м⁻³.

4. Розрахувати прогнозовану стандартну температуру самоспалахування досліджуваної речовини.

4.1 За структурою молекули та середньою довжиною її карбонового ланцюга.

4.1.1 Записати структурну формулу речовини.

4.1.2 Визначити число кінцевих груп в молекулі m .

4.1.3 Розрахувати число карбонових ланцюгів n в молекулі:

$$n = \frac{m(m-1)}{2}.$$

4.1.4 Розрахувати довжину кожного ланцюга l_i та середню довжину молекули $l_{\text{сер}}$:

$$l_{\text{сер}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n}$$

4.1.5 За таблицями додатків 6 або 7 визначити температуру самоспалахування досліджуваної речовини.

4.2 Для алкан-похідних провести розрахунок за константами гомологічного ряду: $t_{\text{cc}} = at_{\text{cc}}^{\text{алк}} + b$, де a , b – константи гомологічного ряду (додаток Г).

5. На підставі стандартної температури самоспалахування розрахувати безпечні температури нагріву робочих поверхонь для даної речовини: $t_{\text{без}} \leq 0,8 t_{\text{cc}}$, °C.

6. Визначити групу вибухонебезпечних сумішей (таблиця 1.4).

Проведення досліду

1. Попередньо розігривають термостат до температури на 50°C вище від розрахованої для виданої речовини температури самоспалахування.

2. У центр нагрітої колби ввести розраховану кількість рідини і увімкнути секундомір (пробу вводять за час, не більший 2 с). В момент самоспалахування вимкнути секундомір і відмітити час індукції до спалаху за даної температури стінки. Якщо самоспалахування не відбулось протягом 5 хв., фіксують результат «відмова». Увага: досліди проводять за вимкненого електроживлення термостата, під час подавання рідини – уникати її попадання на стінки колби.

3. Продути реакційну колбу повітрям, почекати поки колба не відновить необхідну температуру для проведення наступного

випробування. У випадку забруднення колби продуктами згорання її очищують або заміняють на чисту.

4. Якщо самоспалахування відбулось, то температуру термостата у наступному досліді зменшують на 10 °С, а за «відмови» – збільшують і повторюють дослід. За отримання для «сусідніх» температур ефектів «спалаху» та «відмови» – дослід продовжують з кроком вимірювання 2 °С.

5. Шляхом послідовних випробувань визначити найменшу температуру стінок посудини, за якої відбувається самоспалахування, а на 2 °С нижче – «відмова». Самоспалахування за цієї температури повторити не менше двох разів.

6. Результати випробувань занести в таблицю результатів досліді.

Таблиця результатів досліді (зразок оформлення)

№ досліді	температура, °С.	час індукції, с.	результат (відмова, спалах)

7. За результатами експерименту зробити висновок про величину стандартної температури самоспалахування досліджуваної речовини. Порівняти розраховану та визначену температуру самоспалахування, вказати фактори, що могли вплинути на величину температури самоспалахування.

Контрольні запитання

1. Основні положення теплової та ланцюгової теорії самоспалахування.

2. Графічне та математичне відображення критичних умов самоспалахування за тепловою теорією. Критичні умови самоспалахування.

3. Процеси, що відбуваються в горючій суміші під час нагрівання.

4. Період індукції. Стандартна та мінімальна температура самоспалахування.

5. Фактори, що впливають на температуру самоспалахування.

6. Методи розрахунку температури самоспалахування.

7. Характер впливу на температуру самоспалахування:

а) природи горючої речовини (склад, будова та молярна маса);

б) складу горючої суміші (концентрація горючої речовини, окисника, каталізаторів та інгібіторів);

в) умов, в яких знаходиться горюча суміш (об'єм та форма посудини, тиск, початкова температура).

8. Практичне значення температури самоспалахування горючої речовини для пожежної безпеки технологічних процесів.

9 Методи експериментального визначення температури самоспалахування.

1.4 Самозаймання речовин та матеріалів

Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ СХИЛЬНОСТІ ДО САМОЗАЙМАННЯ ЖИРІВ, ОЛІЙ ТА ПРОМАСЛЕНИХ МАТЕРІАЛІВ

Теоретична частина роботи

Всі горючі речовини при контакті з повітрям за певних температур починають окиснюватися. Цей процес супроводжується виділенням тепла і в разі перевищення швидкості тепловиділення за рахунок протікання екзотермічних процесів над швидкістю тепловіддачі в навколишній простір виникає *самонагрівання*, яке по досягненні критичної температури призведе до появи горіння. Найменша температура, за якої виникає самонагрівання речовини, називається *температурою самонагрівання*.

Температура самонагрівання багатьох горючих речовин може дорівнювати або бути нижче кімнатної температури. Деякі такі речовини необхідно зберігати та використовувати за умов, коли неможливий їх контакт з повітрям (під захисним шаром води або мінерального масла, в герметично закритій посудині, в середовищі інертного газу тощо). Тому всі речовини поділяють на дві групи: 1) з температурою самонагрівання вище 50 °С, 2) з температурою самонагрівання нижче 50 °С (*пирофорні*). Речовини першої групи здатні до горіння тільки за умови їх нагрівання ззовні. Речовини другої групи здатні до самовільного виникнення горіння без додаткового підведення тепла, тому що температура навколишнього середовища може дорівнювати або перевищувати температуру їх самонагрівання. Процес виникнення їх горіння за рахунок самонагрівання під впливом внутрішніх екзотермічних процесів за відсутності джерела запалювання називається *самозайманням*. До появи горіння призводить процес самонагрівання горючої системи до критичної температури за рахунок утворення тепла всередині самої системи, незалежно від притоку тепла ззовні за сприятливих умов для накопичення тепла в масі горючої речовини.

Відмінності між процесами самозаймання та самоспалахування:

1. При самоспалахуванні горюча система нагрівається вся повністю за рахунок нагріву стінок посудини ззовні до критичної температури

посудину. При самозайманні нагрів системи ззовні відсутній і для виникнення горіння необхідне виконання умов: 1) первинний внутрішній імпульс, який викликає реакцію окиснення горючої речовини; 2) підтримка певного температурного режиму, що приводить до акумуляції тепла в матеріалі (за відсутності умов для акумуляції тепла самозаймання матеріалів практично неможливе).

2. Оскільки для виникнення самозаймання необхідною умовою є акумуляція тепла, то горіння виникає не у всій системі, як під час самоспалахування, а в осередку самонагрівання у горючій системі, де менші тепловтрати.

3. До самозаймання схильні речовини, які мають низьку температуру самонагрівання. Чим нижче температура самонагрівання речовини, тим більше ймовірність виникнення самозаймання.

4. При самоспалахуванні горюча речовина завжди знаходиться в газоподібному стані, а горіння має гомогенний кінетичний характер. Самозаймання ж може виникнути і без переходу конденсованої горючої речовини в паро-газоподібний стан. При цьому виникає дифузійне гетерогенне горіння – тління.

5. Самозайманню передують порівняно тривалий процес самонагрівання матеріалу, оскільки лише внутрішні екзотермічні процеси призводять до підвищення температури системи. Тому *період індукції* при самозайманні значно більше, ніж при самоспалахуванні, і може досягати кількох тижнів і навіть місяців.

6. Самонагрівання при самоспалахуванні є результатом окисних процесів, первинним імпульсом яких служить тільки тепловий нагрів системи ззовні. У разі самозаймання процес самонагрівання може бути ініційоване іншими чинниками: тепловиділення життєдіяльності мікроорганізмів, теплота реакції окиснення, тепло фізичних процесів, розкладання матеріалу після дії зовнішнього теплового імпульсу.

В залежності від природи первинного теплового імпульсу, розрізняють чотири види самозаймання: *мікробіологічне, хімічне, фізичне і теплове*.

Оскільки підведення тепла до системи відсутнє, під час самозаймання визначальне значення мають умови тепловіддачі. Кількісний опис цих процесів спирається на тепловий баланс між тепловиділенням в системі і тепловіддачею назовні. Тепловиділення відбувається внаслідок окиснення матеріалу. Оскільки спочатку здійснюється окиснення поверхні конденсованого горючого матеріалу, то швидкість такої гетерогенної реакції буде залежати від швидкості адсорбції і концентрації кисню на

поверхні матеріалу. Тоді кількість тепла, що виділяється під час окиснення матеріалу становить: $q(+) = Q\omega_{xp} = Q\rho K\varphi$, де Q – теплота реакції окиснення; φ – концентрація кисню; ρ – щільність скупчення матеріалу; ω_{xp} – швидкість хімічної реакції; K – константа швидкості адсорбції.

Тепло, що виділилося, піде на нагрівання самої горючої речовини і окисника, частина тепла буде віддаватись в навколишнє середовище за рахунок теплопровідності та конвекції, піде на випаровування вологи тощо $q(-) = q_{\text{нагр.гр}} + q_{\text{нагр.пов.}} + q_{\text{тп}} + q_{\text{конв.}} + q_{\text{твт}}$. Тоді сумарні втрати тепла можна описати виразом:

$$q(-) = \rho_{\text{гр}} c_{p\text{гр}} \frac{dT}{d\tau} + \rho_{\text{пов}} c_{p\text{пов}} v_{\text{пов}} \frac{dT}{dy} + \lambda \nabla^2 T + \alpha S(T - T_0) + q_{\text{твт}}, \text{ де } q_{\text{нагр.гр}} -$$

втрати тепла на нагрів горючої речовини; $q_{\text{нагр.пов.}}$ – на нагрів повітря; $q_{\text{тп}}$ – теплопровідністю; $q_{\text{конв.}}$ – шляхом конвекції; $q_{\text{твт}}$ – на інші ендотермічні процеси (випаровування вологи та ін.); $\rho_{\text{гр}}$ – щільність скупчення горючої речовини; $\rho_{\text{пов}}$ – густина повітря; $c_{p\text{гр}}$, $c_{p\text{пов}}$ – теплоємність горючого матеріалу і повітря відповідно; $dT/d\tau$ – швидкість нагрівання матеріалу; dT/dy – градієнт температури уздовж повітряного потоку; $v_{\text{пов}}$ – швидкість надходження повітряного потоку; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу; $\nabla^2 T$ – зміна в часі температурного поля; α_k – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі; S – поверхня тепловіддачі; T_0 – температура навколишнього середовища.

Аналіз рівняння теплового балансу процесу самозаймання свідчить, що на процес *самонагрівання* найбільше впливають такі чинники, як: тепловий ефект екзотермічних процесів; швидкість реакції окиснення, яка залежить від концентрації окисника, природи речовини та величини поверхні окиснення; теплофізичні властивості матеріалу (густина, теплоємність, теплопровідність); коефіцієнт тепловіддачі; початкова температура середовища; співвідношення об'єму системи і площі тепловіддачі. Чим вище *теплотворна здатність* горючої речовини, тим більше тепла може виділитися при протіканні реакції окиснення і тим легше почнеться процес самонагрівання.

Велике значення в процесі самозаймання має приплив повітря. Виділення тепла під час реакції окиснення в об'ємі горючого матеріалу є пропорційним концентрації окисника, тому схильність системи до самозаймання визначається *доступом кисню повітря до поверхні горючої речовини*. Потік повітря в скупченні матеріалу, що окиснюється, впливає

також на тепловтрати від системи. Тому при збільшенні швидкості потоку збільшується й інтенсивність тепловіддачі за рахунок тепловтрат на нагрів повітря і конвекційну тепловіддачу.

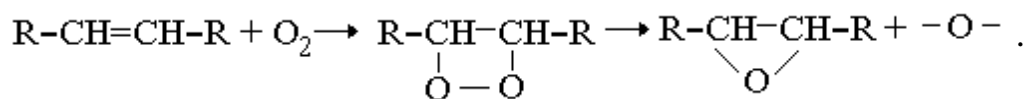
Самозаймання виникає у випадку, коли *площа поверхні реагування значно більше зовнішньої поверхні матеріалу*. Критичне значення співвідношення зовнішньої поверхні (площі тепловіддачі) до об'єму скупчення матеріалу залежить від виду горючої речовини, складу окисного середовища та зовнішніх умов. Для більшості *пірофорних речовин* процес самозаймання ініціюється за температур навколишнього середовища не менше 10 °С (за більш низьких температур критично зростає інтенсивність тепловіддачі).

Розрахунок умов *теплого самозаймання* проводять за емпіричними залежностями для зміни температури самонагрівання від геометричних розмірів скупчення досліджуваного матеріалу та періоду індукції до самозаймання [7]: $\lg t_{\text{сн}} = A_p + n_p \cdot \lg S_{\text{пит}}$, $\lg t_{\text{сн}} = A_b - n_b \cdot \lg \tau_{\text{інд}}$, де $t_{\text{сн}}$ – температура теплового самонагрівання, °С; $\tau_{\text{інд}}$ – час індукції до самозаймання, год.; A_p , n_p , A_b , n_b – емпіричні коефіцієнти, які визначають для даної горючої речовини за довідниковими даними [3]; $S_{\text{пит}} = \frac{S_{\text{повн}}}{V}$ –

питома поверхня зразка, м^{-1} , відношення повної поверхні тепловіддачі $S_{\text{повн}}$ (м^2) до об'єму матеріалу V (м^3), в якому відбуваються екзотермічні процеси.

Хімічне самозаймання – це виникнення горіння внаслідок тепловиділення хімічних реакцій за контакту горючої речовини й окисника, наприклад, самозаймання жирів та олій на повітрі. Олії являють собою суміш гліцеридів високомолекулярних ненасичених жирних кислот, які мають ненасичені (подвійні) зв'язки, що визначає здатність рослинних олій до самозаймання.

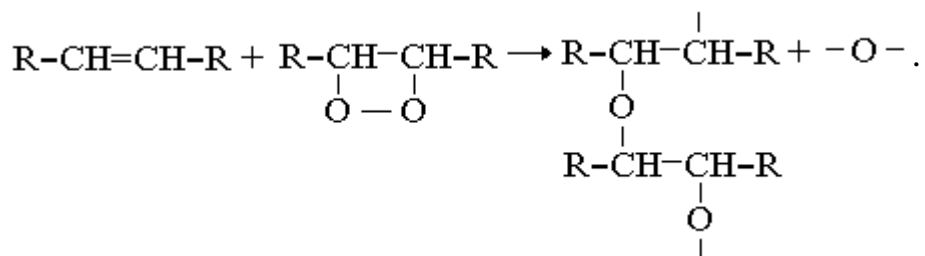
Самозаймання жирів відбувається за рахунок тепловиділення під час окиснення і полімеризації за участі кисню повітря за місцями подвійних зв'язків у карбоновому ланцюзі органічної речовини. Згідно пероксидної теорії О.М. Баха, механізм окиснення олії можна представити схемою:



Пероксиди легко розкладаються з утворенням активного кисню, який може взаємодіяти навіть з гліцеридами насичених кислот.

Одночасно з окисненням протікають реакції полімеризації (так,

говорять, що масляна фарба або оліфа «висохла», а насправді – полімеризувалася):



Тепло, що виділяється під час реакцій окиснення і полімеризації, йде на розігрів горючого матеріалу. За наявності умов для акумуляції тепла починається процес самонагрівання з подальшим samozайманням.

Умови, що сприяють samozайманню олій: 1) вміст значної кількості гліцеридів ненасичених жирних кислот; 2) наявність великої поверхні окиснення і малої поверхні тепловіддачі; 3) достатній доступ повітря; 4) температура середовища не менше за 10 °С; 5) певна щільність промасленого матеріалу. Жири самі по собі не samozаймаються, але це властиво промасленим матеріалам, в яких розвинута реакційна поверхня, є повітря та середовище для накопичення тепла.

Збільшення кількості ненасичених зв'язків в гліцериді збільшує здатність олії до samozаймання. Визначити кількість подвійних зв'язків та схильність олії до хімічного samozаймання можна за допомогою йодометричного методу. Даний метод ґрунтується на здатності галогенів (йоду) приєднуватися до органічних сполук за місцем подвійних зв'язків. За кількістю йоду, який вступив в реакцію, визначають наявність та кількість ненасичених зв'язків у молекулах гліцеридів та здатність жиру або олії, які їх містять, до samozаймання. Критерієм такої оцінки служить *йодне число* J_q , яке показує скільки грамів йоду приєднається у досліді (або за розрахунком) до 100 грамів олії. Якщо $J_q < 50$ – олія не схильна до хімічного samozаймання, а якщо $J_q > 50$ – схильна.

Експериментально схильність речовин до samozаймання (самонагрівання) можна також визначити на приладі Маккея, який являє собою водяний термостат з температурою у повітряному об'ємі реакційної камері не більше 100 °С. В центр цього простору розташовують досліджуваний матеріал. Якщо у матеріалі ініціюється екзотермічна реакція окиснення з киснем повітря, то тепло реакції акумулюється у матеріалі і його температура стає більшою за температуру термостату, що свідчить про початок процесів

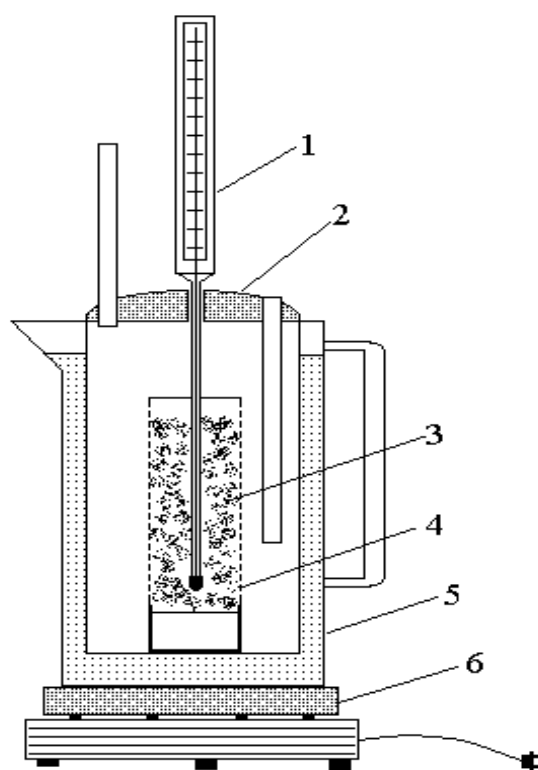
самонагрівання та схильність даного матеріалу до хімічного самозаймання у середовищі кисню повітря.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Визначити умови та схильність до хімічного самозаймання олії при контакті з киснем повітря за допомогою приладу Маккея.

Опис лабораторної установки

Прилад Маккея за принципом роботи є водяним термостатом, рис. 1.8.



1 – термометр; 2 – кришка; 3 – вата з олією; 4 – сітчастий циліндр;
5 – латунний корпус водяного термостату; 6 – електрична плитка

Рисунок 1.8 – Прилад Маккея для визначення схильності жирів до самозаймання

Прилад Маккея складається з циліндричної латунної посудини з подвійними стінками, у простір між якими заливається вода, кришки з двома трубками для циркуляції повітря (у центральний отвір розташовується термометр), сітчастого циліндру для розташування вати, просоченої досліджуваною олією, термометра, електричної плитки. Термометр точкою

вимірювання (ртутна кулька термометра) розташовується всередині об'єму вати у перфорованому циліндрі.

Порядок проведення лабораторної роботи

1. Залити в простір між стінками термостата воду і поставити нагріватись на електричну плитку на початку заняття.

2. Відважити 7 г вати та 14 г досліджуваної олії. Олію зважувати в чашці, в якій потім можна просочити вату. Під час просочення олією вату періодично розпушувати для рівномірного розподілення олії.

3. Витягти сітчастий циліндр із термостата. Зробити «дно» у циліндрі з просоченої вати. Обгорнути вимірювальну частину термометра ватою, просоченою олією, і вставити його в сітчастий циліндр. Решту вати розподілити між термометром і стінками циліндра, злегка ущільнюючи (обережно, щоб не розбити термометр).

4. Витягти термометр із сітчастого циліндра. Сітчастий циліндр помістити на виступ в центрі дна латунного термостату і закрити прилад кришкою.

5. Вставити термометр в центральний отвір кришки, так, щоб вимірювальна частина потрапила в «канал», який залишився від термометра під час набивання вати, та розташувалась в центрі сітчастого циліндра з ватою.

6. По досягненні температури вати 60 °С заносити показання термометра в таблицю результатів досліду кожні 3 хв.

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

Час, хв.	Температура термостату, °С.	Температура вати, просоченої олією, °С.

7. Нагрівання термостату припинити по досягненні температури вати 100 °С.

8. По досягненні температури вати 150°С дослід припинити. Якщо температура вати не піднялась вище 100°С протягом години нагріву, досліджувану олію вважати не здатною до самозаймання.

9. По закінченні досліду витягти термометр, вату викинути в таз із водою (не залишати просочену олією вату без догляду для запобігання самозаймання).

10. Побудувати за результатами досліду графік залежності температури вати від часу, зробити висновок про здатність до хімічного самозаймання за умов контакту з киснем повітря досліджуваної олії (обмасленого матеріалу).

Контрольні запитання

1. Самозаймання: визначення, сутність, класифікація процесів.
2. Відмінність самозаймання від самоспалахування.
3. Тепловий баланс між тепловиділенням і тепловіддачею при самозайманні.
4. Фактори, що впливають на процес самозаймання.
5. Сутність, умови виникнення, види хімічного самозаймання.
6. Хімічне самозаймання при контакті з водою.
7. Хімічне самозаймання при контакті з киснем повітря, самозаймання пірофорного заліза.
8. Фактори і умови самозаймання жирів і олій.
9. Методи визначення здатності олій та жирів до самозаймання.
10. Фізичне самозаймання вугілля, механізм процесу.
11. Механізм теплового самозаймання.
12. Відмінність процесів самоспалахування, самонагрівання і самозаймання?
13. Що називається температурою самонагрівання?
14. Які речовини відносяться до пірофорних?
15. Сутність теплового самозаймання; які речовини до нього схильні?
16. Сутність мікробіологічного самозаймання; які речовини схильні до такого типу самозаймання?
17. У чому полягає сутність самозаймання в результаті хімічної взаємодії речовин між собою? Напишіть приклади хімічних реакцій.
18. Яке буде за розрахунком йодне число олії з тригліцериду лінолевої кислоти $(C_3H_5O_2)(COOC_{17}H_{31})_3$ (містить 6 ненасичених (подвійних) зв'язків).

1.5 Вимушене запалювання горючих систем

Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ МІНІМАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ ЗАПАЛЮВАННЯ ПАРІВ ГОРЮЧИХ РІДИН

Теоретична частина роботи

Вимушене запалювання виникає внаслідок прогріву малої частки холодної горючої системи від джерела запалювання. Джерелом запалювання може бути відкрите полум'я, розжарене тіло, фрикційна іскра, електричний розряд, які мають енергію і температуру, достатні для запалювання інших речовин. Виділяють *безумовні джерела запалювання*: прямі удари блискавок, потужні електричні дуги, полум'я газових пальників, сірника.

На відміну від самоспалахування, вимушене запалювання виникає при зовнішньому нагріві малої частини горючої системи малим джерелом тепла, від якого полум'я поширюється на всю суміш. Біля малого джерела тепла існує велика інтенсивність тепловтрат, тому температура для запалювання $T_{\text{зап}}$ потрібна значно більша, ніж для самоспалахування. Горіння зможе поширитися на всю горючу суміш, якщо за час дії джерела запалювання тепло не встигне розсіятися в холодну суміш шляхом теплопровідності, а біля стінки джерела запалювання утвориться прогрітий до температури запалювання $T_{\text{зап}}$ шар товщиною δ . За умови тривалого впливу джерела запалювання на горючу повітряну суміш, температура запалювання зменшується, але не менше ніж до температури самоспалахування $T_{\text{сс}}$.

На практиці 40 % пожеж виникає внаслідок теплових проявів електричної енергії: електричні розряди статичної та атмосферної електрики; іскри та краплі металу короткого замикання; нагрів поверхні ламп накалювання, електричних дротів і контактів при перевантаженнях.

Існує певна мінімальна енергія електричного розряду E_{min} , яка достатня для прогріву сферичного об'єму холодної горючої суміші радіусом r_{min} до температури горіння. За такої умови виникає критичний незгасаючий елемент полум'я, здатний до поширення. Тобто існує *мінімальна енергія запалювання* для кожної горючої речовини; за дослідом її визначають як найменшу енергію електричного конденсатора, при розряді якого через простір виникає іскра, яка

запалює стехіометричну повітряну суміш горючого газу або аерозолю з імовірністю 0,01.

Якщо джерело запалювання буде мати запас енергії рівний або більший за мінімальну енергію запалювання $Q_{\text{іскри}} > E_{\text{minГР}}$ та достатню температуру $T_{\text{зап}}$, то запалювання відбудеться. Запас енергії нагрітої твердої частинки $Q_{\text{іск}}$, наприклад фрикційної іскри, залежить від її маси, об'єму $V_{\text{іск}}$, густини матеріалу $\rho_{\text{іск}}$, теплоємності $C_{p \text{ іск}}$, перевищення температури частинки $T_{\text{іск}}$ над температурою самоспалахування: $Q_{\text{іск}} = V_{\text{іск}} \rho_{\text{іск}} C_{p \text{ іск}} (T_{\text{іск}} - T_{\text{сс гр}})$.

Фрикційні іскри – це шматочки металу відірвані і нагріті при механічному впливі і частково окислені, що може підвищити температуру іскри ще на 500 °С.

Мінімальну енергію запалювання речовини визначають шляхом порівняння з відомими властивостями бутану спираючись на значення нормальної швидкості поширення горіння речовини u_n : $E_{\text{min}} = 0,036/u_n^2$, мДж.

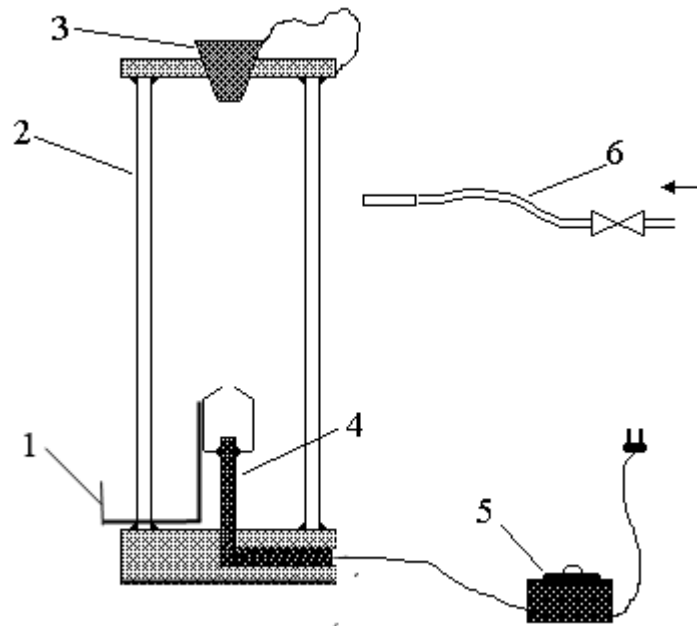
Розжарене тіло, що почало діяти на горючу систему, буде безпечним, тобто не запалить дану повітряну суміш або тверду речовину, якщо його енергія буде менша ніж безпечна: $E_{\text{без}} = 0,4E_{\text{min}}$, мДж, а температура – менша ніж безпечна температура самоспалахування: $t_{\text{без}} = 0,8 \cdot t_{\text{сс}}$, °С.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Експериментально оцінити мінімальну енергію запалювання горючої рідини.

Опис лабораторної установки

Конструктивні елементи установки, рис. 1.9: 1) важіль натискання на електрод; 2) скляний циліндр(вибухова труба); 3) кришка з клапаном для скидання надлишкового тиску (пробка); 4) електричний розрядник – джерело запалювання; 5) високовольтний блок; 6) магістраль подачі повітря. Довжина труби до запалювального пристрою складає 300 мм, внутрішній діаметр – 50 мм (площа перерізу $\approx 200 \text{ мм}^2$), загальний об'єм камери – 600 см^3 .



1 – важіль натискання на електрод; 2 – скляний циліндр; 3 – клапан скидання надлишкового тиску; 4 – електричний розрядник; 5 – високовольний блок живлення; 6 – подач повітря

Рисунок 1.9 – Установа для визначення мінімальної енергії запалювання пароповітряної суміші

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення дослідів

1. Для заданої викладачем горючої рідини провести розрахунок параметрів запалювання.

1.1 Провести розрахунок мінімальної енергії запалювання горючої рідини за значенням нормальної швидкості поширення полум'я [3]:

$$E_{\min} = 0,036 / u_{\text{н}}^2, \text{ мДж.}$$

1.2 Провести розрахунок безпечної енергії іскри під час запалювання горючої рідини:

$$E_{\text{без}} = 0,4E_{\min}, \text{ мДж.}$$

1.3 Провести розрахунок безпечної температури нагрітого тіла під час запалювання горючої рідини за значенням температура самоспалахування [3]:

$$t_{\text{без}} = 0,8 \cdot t_{\text{сс}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

1.4 Провести розрахунок ємності електричного конденсатора, яка відповідає мінімальній енергії запалювання горючої рідини ($W = E_{\text{min}}$, напруга зарядки конденсатора $U = 310 \text{ В}$):

$$C_{\text{ел}} = 2 W / U^2, \text{ Дж}$$

2. Провести розрахунок кількості рідини для утворення в нижній частині труби найбільш пожежовибухонебезпечної – стехіометричної концентрації.

2.1 Скласти рівняння хімічної реакції горіння, визначити стехіометричний коефіцієнт реакції β , розрахувати об'ємну стехіометричну концентрацію:

$$\varphi_{\text{смк}} = \frac{100}{1 + 4,76\beta}, \%$$

2.2 Розрахунок масової стехіометричної концентрації.

2.2.1 Розрахувати молярну масу горючої речовини μ , $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

2.2.2 Розрахувати молярний об'єм газу за даних умов:

$$V_{\mu} = 22,4 \frac{101,3T}{273P}, \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1},$$

де T – температура за даних умов, К ; P – тиск за даних умов, кПа .

2.2.3 Розрахувати масову концентрацію речовини у повітрі:

$$\varphi' = \varphi \cdot \frac{10 \cdot \mu}{V_{\mu}}, \text{ г} \cdot \text{м}^{-3},$$

де φ' – масова концентрація, $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$; φ – об'ємна концентрація, %.

2.2.4 Розрахувати об'єм рідини, що необхідно ввести в реакційну посудину для отримання розрахованих концентрацій:

$$V_{\text{рід}} = \frac{V_{\text{рп}} \cdot \varphi'}{\rho_{\text{рід}}}, \text{ мл},$$

де $V_{\text{рп}}$ об'єм реакційної посудини, мл (прийняти, що пара у посудині займе нижню частину об'єму труби у кількості 300 мл); ρ – густина рідини, $\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$.

2.2.5 Оцінити кількість крапель рідини, введеної з піпетки враховуючи, що середній об'єм краплі органічної рідини дорівнює 0,03 мл.

Проведення досліду

1. Відкрити гумову пробку і ввести у вибухову трубу за допомогою піпетки розрахований об'єм досліджуваної рідини, що відповідає стехіометричній концентрації.

2. Закрити (не щільно) отвір вибухової труби гумовою пробкою. Дати 2–3 хв. на випаровування, після чого усереднити концентрації пари у трубі «прапорцем».

3. Встановити перемикачем на високовольтному блоці найближчу енергію електричного конденсатора, яка відповідає очікуваній мінімальній енергії запалювання горючої рідини.

4. Увімкнути живлення високовольтного блока, натиснути електроізолюваний важіль для зведення електродів у вибуховій трубі до запалювання (для гарантування повної розрядки конденсатора та відповідності енергії іскри енергії, яка була накопичена у конденсаторі). Фіксувати наявність або відсутність спалаху. Результати випробування «відмова», «спалах» або «вибух» занести у таблицю результатів досліду.

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

№	Горюча рідина	Енергія конденсатора, мДж		Результат

5. Після проведення досліду продути реакційну посудину (вибухову трубу) повітрям, повторити випробування: у разі «відмови» – збільшити енергію конденсатора, у разі «спалаху» – зменшити. Повторити ці досліди на 2-х найближчих значеннях енергії конденсатора, за яких були «спалах» та «відмова». Якщо дослід, який раніше дав «відмову» тепер дав «спалах» – повторити ці досліди на 2-х менших значеннях енергії конденсатора.

6. Найменшу енергію електричного конденсатора, за якої хоча б 1 раз був спалах прийняти за мінімальну енергію запалювання горючої рідини. Зробити висновок шляхом порівняння довідкових, розрахованих та експериментально отриманих значень мінімальної енергії запалювання.

Контрольні запитання

1. Умови вимушеного запалення, графічна інтерпретація.
2. Відмінність вимушеного запалювання від самоспалахування.
3. Що називається джерелом запалювання (ДЗ), види ДЗ?
4. Механізм запалювання нагрітою поверхнею.
5. Механізм запалювання електричним розрядом.
6. Механізм запалювання фрикційними іскрами.
7. За якої концентрації горючої речовини у повітрі її мінімальна енергія запалювання найменша?

1.6 Горіння газо-пароповітряних сумішей. Концентраційні межі поширення полум'я

Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ НИЖНЬОЇ КОНЦЕНТРАЦІЙНОЇ МЕЖІ ПОШИРЕННЯ ПОЛУМ'Я ДЛЯ ПАРІВ РІДИН

Теоретична частина роботи

Найбільш вибухонебезпечною є стехіометрична суміш горючої речовини з повітрям (киснем), за такої концентрації тиск вибуху та швидкість полум'я максимальні. У випадку дуже бідної суміші ($\alpha > 1$) молекул горючого мало, в системі в основному спостерігаються співударання молекул окисника між собою. У випадку дуже багатой суміші ($\alpha < 1$) у нестачі знаходяться молекули окисника. Основна кількість зіткнень відбувається між молекулами горючої речовини. Ці зіткнення, так саме, як і зіткнення молекул окисника між собою, не ведуть до ініціювання реакції горіння. Обидві ці ситуації призводять до зниження нормальної швидкості поширення полум'я. При деяких критичних значеннях концентрацій ця швидкість зменшується до критичного значення, менше за яке горіння не підтримується (але нульової швидкості полум'я бути не може). Тобто поодинокі результативні зіткнення виділяють у суміш в одиницю часу тепла менше, ніж його з даної суміші втрачається. Система, далека від стехіометричної у будь-який бік, стає нездатною до самозагоряння, вимушеного запалювання, вибуху, спалаху та поширення полум'я.

Мінімальний вміст горючої речовини в однорідній суміші з окисним середовищем, при якому можливе поширення полум'я по суміші на будь-яку відстань від джерела запалювання, називається *нижньою*

концентраційною межею поширення полум'я (нижня КМПП). Суміші, які містять горючу речовину у кількості меншій за нижню КМПП, є вибухо- і пожежобезпечними. Змішування такої суміші з повітрям веде до збільшення її безпечності.

КМПП органічних речовин можна оцінити за апроксимаційною формулою на підставі стехіометричного коефіцієнту реакції горіння β :

$$\varphi_{H(B)} = \frac{100}{a \cdot \beta + b}, \%, \text{ де } a \text{ та } b - \text{емпіричні константи, окремі для нижньої і}$$

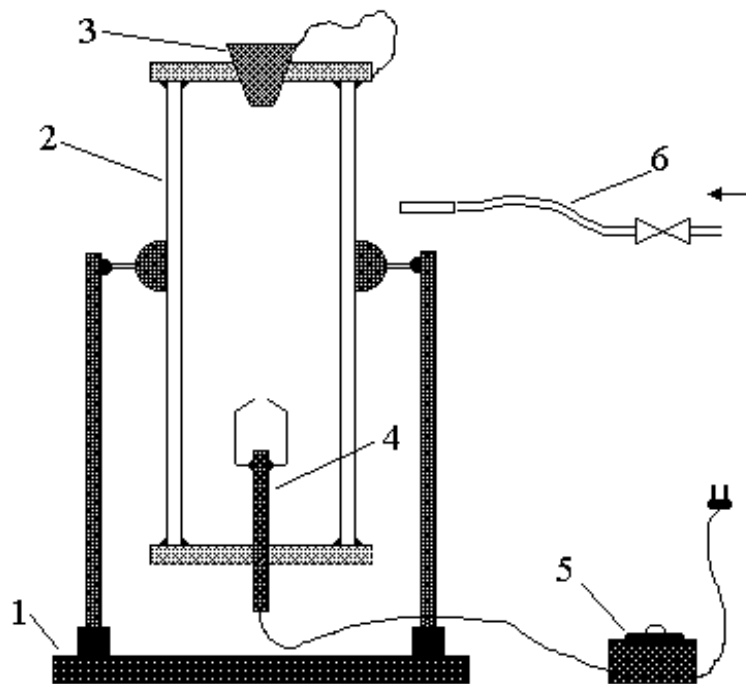
верхньої КМПП (додаток Б, для нижньої КМПП $a = 8,684$, $b = 4,679$); β – стехіометричний коефіцієнт реакції горіння, який показує, скільки молів кисню необхідно для повного згорання 1 молю даної горючої речовини.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Оцінити експериментально значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я пари рідини.

Опис лабораторної установки

Основні конструктивні елементи установки, рис. 1.10: 1) станина з опорними стойками для можливості зміни кута нахилу вибухової труби; 2) скляний циліндр (вибухова труба); 3) кришка з клапаном для скидання надлишкового тиску (пробка); 4) електричний розрядник – джерело запалювання; 5) високовольтний блок; 6) магістраль подачі повітря. Довжина труби до запалювального пристрою складає 300 мм, внутрішній діаметр – 50 мм (площа перерізу $\approx 200 \text{ мм}^2$), загальний об'єм камери – 600 см^3 .



1 – станина; 2 – скляний циліндр; 3 – клапан скидання надлишкового тиску;
 4 – електричний розрядник; 5 – високовольтний блок живлення;
 6 – магістраль подачі повітря

Рисунок 1.10 – Установа для визначення вибухонебезпеки пароповітряної суміші

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення дослідів

Для лабораторного дослідження обрано рідини: ацетон, етанол, бензол; вони мають нижні КМПП: ацетон – 2,7 %, етанол – 3,6 %, бензол – 1,43 %. Ці рідини складаються з карбону, гідрогену та кисню (крім бензолу), тому токсичних продуктів повного згоряння не утворюють.

Вибухонебезпечна суміш утворюється протягом перших декількох секунд випаровування в нижній частині камери, яка становить приблизно 1/2000 її об'єму. Для забезпечення в цій частині повного об'єму камери кількості парів, що відповідає нижній КМПП, необхідна маса рідин:

- ацетону $2,7 \cdot 600 / (100 \cdot 2000) = 0,0081 \text{ см}^3$,
- етанолу $3,6 \cdot 600 / (100 \cdot 2000) = 0,0108 \text{ см}^3$,
- бензолу $1,43 \cdot 600 / (100 \cdot 2000) = 0,0043 \text{ см}^3$.

Враховуючи тиск насиченої пари кожної рідини за 20 °С, така їх кількість може бути забезпечена при введенні рідини у кількості:

- ацетону $0,0081 \cdot 760 / 130 = 0,048$ г,
- етанолу $0,0108 \cdot 760 / 44 = 0,186$ г,
- бензолу $0,0043 \cdot 760 / 70 = 0,047$ г.

Незначний об'єм пристрою і невелика кількість рідини у досліді не викликають значного виділення теплоти згорання, помітного нагріву стінок труби і помітного збільшення об'єму (та тиску) всередині труби.

Таблиця 1.5 – Властивості рідин та їх кількість для проведення дослідів

№ з/п	Рідина	Тиск насиченої пари за 20 °С, мм рт. ст.	Нижня КМПП, об. %	Кількість для дослідів		
				г	мл	краплі
1	Ацетон	130	2,7	0,048	0,032	1,0
2	Етанол	44	3,6	0,205	0,141	5,0
3	Бензол	70	1,43	0,047	0,028	1,0

Проведемо розрахунок кількості теплоти, що виділяється під час горіння потрібної кількості кожної з рідин, а також – температур, до яких може нагрітися стінка труби, оцінимо надлишковий тиск, який при цьому може виникнути. Вхідні параметри для проведення розрахунку: маса скляної труби $m_c = 400$ г., теплоємність скла $c_c = 0,8$ Дж/г·К. Теплоємність та густина продуктів згорання всередині пристрою мало відрізняються від теплоємності та густини повітря, тому приймаємо їх за нормальних умов: $c_{п} = 1000$ Дж/кг·К та $\rho = 1,29 \cdot 10^{-3}$ г/см³.

Якщо не враховувати тепло, що передається продуктам згорання, і вважати, що вся теплота згорання (вибуху) витрачається на нагрів стінок труби, їх температура підвищиться на величину: $Q/m_c c_c = Q/(400 \cdot 0,8) = Q/144$ °С.

Якщо вважати, що все тепло передається газоподібній суміші продуктів згорання всередині приладу, то температура суміші в цьому об'ємі підвищиться на величину: $Q/m_{п} c_{п} = Q/(m_{п} \cdot I)$ °С.

Потрібна кількість повітря для спалювання оптимальної (стехіометричної) кількості речовини в даному випадку становить:

при спалюванні ацетону: $C_3H_6O + 4(O_2 + 3,76N_2) = 3CO_2 + 3H_2O + 15,04N_2$
 $V_{п} = 0,0048 \cdot 4 \cdot 4,76 \cdot 22,4 / 58 = 0,033$ л.

при спалюванні етанолу: $C_2H_6O + 3(O_2 + 3,76N_2) = 2CO_2 + 3H_2O + 13,16N_2$
 $V_{п} = 0,0186 \cdot 3 \cdot 4,76 \cdot 22,4 / 46 = 0,207$ л.

при спалюванні бензолу: $C_6H_6 + 7,5(O_2 + 3,76N_2) = 6CO_2 + 3H_2O + 28,2N_2$
 $V_{п} = 0,0047 \cdot 7,5 \cdot 4,76 \cdot 22,4 / 78 = 0,048$ л.

При цьому утворюються об'єми (маси) продуктів горіння (за нормальних умов і з урахуванням надлишкової кількості повітря в об'ємі колби):

– при спалюванні ацетону: $0,0048 \cdot 22,4(3+3+15,04)/58 + (0,600 - 0,033) = 0,64 \text{ л} = 0,51 \text{ г}$.

– при спалюванні етанолу: $0,0186 \cdot 22,4(2+3+13,1)/46 + (0,600 - 0,207) = 0,55 \text{ л} = 0,43 \text{ г}$.

– при спалюванні бензолу: $0,0047 \cdot 22,4(6+3+28,2)/78 + (0,322 - 0,048) = 0,61 \text{ л} = 0,53 \text{ г}$.

Таблиця 1.6 – Властивості рідин та можливі теплові показники у досліді

№ з/п	Рідина	Теплота згорання, кДж/г	Виділення теплоти Q, кДж	Збільшення			
				температури, °C		об'єму, до л	тиску, рази
				стінки	в об'ємі		
1	Ацетон	31,4	$31,4 \cdot 0,0048 = 0,15$	0,9	326,0	0,720	2,3
2	Етанол	30,6	$30,6 \cdot 0,0186 = 0,57$	1,2	434,0	0,832	2,6
3	Бензол	40,6	$40,6 \cdot 0,0047 = 0,19$	0,6	218,0	0,578	1,8

Тобто, якщо б все тепло передалося стінкам, температура скляної труби піднялась би на величину:

– при спалюванні ацетону на: $150/144 = 1,04 \text{ °C}$,

– при спалюванні етанолу на: $570/144 = 3,96 \text{ °C}$,

– при спалюванні бензолу на: $190/144 = 1,32 \text{ °C}$.

За умови, що все тепло передалося продуктам згорання, їх температура повинна була збільшитися на величину:

– при спалюванні ацетону на: $150/0,51 = 294,0 \text{ °C}$,

– при спалюванні етанолу на: $570/0,43 = 1203,0 \text{ °C}$,

– при спалюванні бензолу на: $190/0,53 = 594,0 \text{ °C}$.

Підвищення температури збільшить об'єм продуктів горіння до:

– при спалюванні ацетону на: $0,51(294+273)/273 = 1,05 \text{ л}$ або в 1,75 рази,

– при спалюванні етанолу на: $0,43(1187+273)/273 = 0,782 \text{ л}$ або в 2,57 рази,

– при спалюванні бензолу на: $0,53(594+273)/273 = 0,578 \text{ л}$ або в 1,65 рази.

Розрахунки показують, що стінка труби навіть за умов передачі їм усієї теплоти вибуху помітно нагріватися не будуть.

Продукти горіння за умови поглинання ними всієї теплоти можуть нагрітися до температур 300-1200 °C і викликати збільшення об'єму, а,

отже, і тиску в 4 рази. Цього достатньо, щоб виштовхнути нещільно встановлену кришку, і, в той же час, недостатньо, щоб створити загрозу руйнування апарату і розльоту його уламків. Крім того, продуктів горіння утворюється малий об'єм – 1 л і у приміщенні вони протягом 1-2 секунд охолоджуються до температури середовища.

Проведення досліду

1. Перед початком експерименту провести зовнішній огляд установки; перевірити її цілісність; чи нещільно закривається кришка отвору, чи не підключений електричний шнур до електроживлення, чи вільно обертається скляна труба з горизонтального у вертикальне положення і навпаки. Потренуватись набрати піпеткою потрібну кількість рідини для досліду.

2. Відкрити витяжну шафу, поставити скляну трубу у вертикальне положення.

3. За командою викладача набрати піпеткою 1–2 краплі рідини (бажано етанолу) і ввести її у скляну трубу; нещільно закрити отвір труби кришкою.

4. Перемістити трубу у горизонтальне положення, направити отвір на стіну витяжної шафи; закрити витяжну шафу.

5. Вставити вилку електричного шнура у розетку електроживлення. Натиснути кнопку вмикача, спостерігати за трубою і кришкою, відмітити, чи відбувся вибух або горіння всередині труби.

6. Витягнути вилку електричного шнура з розетки електроживлення. Відкрити створу витяжної шафи; перемістити трубу у вертикальне положення.

7. Зняти кришку з отвору труби. За командою викладача набрати піпеткою більшу кількість рідини і ввести цю рідину до скляної труби. Повторити дослід.

8. Отримати 2 сусідні значення фактичної концентрації горючої речовини у вимірюваному просторі з кроком 0,5 %, за більшого значення з яких буде «спалах», а за меншого – «відмова». Най менше значення фактичної концентрації за якого був «спалах» прийняти за нижню КМПП.

Обробка результатів досліду

1. Розрахувати теоретичне значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я для пари рідини, яка досліджувалася.

2. Визначити об'єм рідини, введеної до вибухової труби установки, враховуючи, що середній об'єм краплі органічної рідини дорівнює 0,03 мл:

$$V = 0,03 \cdot X \dots = \dots \text{мл}$$

3. Визначити масу досліджуваної рідини у досліді, враховуючи її густину:

$$M = \dots \cdot X \dots = \dots \text{г.}$$

4. Визначити концентрацію пари рідини у нижній частині труби, де утворилася її повітряна суміш та відбувся спалах:

$$\text{НКМПП}_{\text{дослід}} = 2000M/6 = \dots \text{ об. \%}$$

5. Порівняти розрахункове та дослідне значення нижньої КМПП.

6. Розрахувати абсолютну та відносну похибку вимірювання:

$$\Delta x = (\text{НКМПП})_{\text{дослід}} - (\text{НКМПП})_{\text{розрах.}} = \dots \text{ об. \%}$$

$$\Delta \varepsilon = 100 \Delta x / (\text{НКМПП})_{\text{розрах.}} = \dots \text{ відносних \%}$$

7. Зробити висновок за проведеним експериментом.

Контрольні запитання

1. Що таке НКМПП та ВКМПП?
2. Які концентрації має горюча речовина у вибухонебезпечній суміші?
3. Що називається тиском насиченої пари рідини?
4. На скільки при проведенні вогневих робіт фактична концентрація речовини повинна бути меншою за нижню КМПП?

Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ СТУПЕНЯ НЕБЕЗПЕКИ РІЗНИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ ГОРЮЧИХ ПАРІВ ТА ГАЗІВ У ПОВІТРІ

Теоретична частина роботи

Найважливішим принципом, який лежить в основі радикального рішення задачі забезпечення вибухонебезпеки, є виключення можливості утворення горючих систем за рахунок регулювання складу парогазової суміші.

Виникнення та поширення полум'я в сумішах пального й окисника можливе тільки в обмеженому діапазоні їх концентрацій – *концентраційних межах поширення полум'я (КМПП)*. При спробі підпалити суміші, склад яких виходить за ці межі, стійке горіння не утворюється, і реакція, яка викликана нагріванням в локальній зоні, або не виникає, або затухає на деякій відстані.

Для сумішей, що містять горючу речовину й окисник, розрізняють нижню і верхню концентраційну межу поширення полум'я φ_H і φ_B .

Нижня концентраційна межа поширення полум'я (НКМПП) – найменша концентрація горючої речовини в суміші з повітрям, за якої вже можливе виникнення і поширення горіння.

Верхня концентраційна межа поширення полум'я (ВКМПП) – найбільша концентрація горючої речовини в суміші з повітрям, за якої ще можливе виникнення і поширення горіння.

КМПП – одна з найважливіших характеристик вибухонебезпеки горючих газів і парів. Область концентрації горючої речовини, яка лежить між нижньою і верхньою КМПП, характеризується можливістю запалювання і стійкістю горіння суміші в кінетичному режимі, називається «областю вибухонебезпечних концентрацій». За концентраційними межами суміші стають вибухобезпечними. Але якщо при концентраціях горючої речовини менше НКМПП не можливо виникнення ніякого горіння, то при концентраціях горючої речовини більше ВКМПП можливе виникнення дифузійного горіння при виході струменя газу в навколишній простір і за наявності джерела запалювання (сумішоутворення до потрібних горючих концентрацій буде відбуватися в зоні горіння).

КМПП можуть сильно змінюватися за зміни зовнішніх умов. Зміни КМПП можна пояснити з точки зору теплового балансу тепловиділення і тепловіддачі в системі. Чинники, зміна яких підвищує тепловиділення в

системі внаслідок реакції окиснення, будуть розширювати КМПП (знижувати нижню КМПП і підвищувати верхню КМПП), а чинники, які збільшують тепловіддачу від системи в навколишнє середовище, будуть звужувати область запалювання (збільшувати нижню КМПП і зменшувати верхню КМПП). *На зміну КМПП найбільше впливають:* концентрація окисника в окисному середовищі; концентрація інертних газів (флегматизаторів); температура і тиск суміші; потужність джерела запалювання (ДЗ); ступінь турбулізації газового потоку; добавки каталізаторів й інгібіторів.

Збільшення *концентрації кисню* в окисному середовищі від 21% в повітрі до 100% приведе до збільшення швидкості тепловиділення, а тому приведе до розширення зони вибухонебезпечних концентрацій. При зниженні концентрації окисника КМПП вужчають, і є таке мінімальне значення концентрації окисника, при якому нижня і верхня КМПП співпадають. Така концентрація кисню називається мінімальною вибухонебезпечною, і позначається $\phi_{\text{МВКК}}$.

При введенні *негорючих газів* в горючу суміш область вибухонебезпечних концентрацій вужчає, більшою мірою за рахунок ВКМПП, оскільки в сумішах на НКМПП завжди є надлишок кисню. Кисню на ВКМПП недостатньо для повного згорання, тому при збільшенні вмісту інертних добавок ВКМПП різко меншає. За певної концентрації флегматизатора (флегматизуюча концентрація) суміш стає пожежобезпечною.

Зі збільшенням *початкової температури* вибухонебезпечна область розширюється: НКМПП трохи меншає, а ВКМПП збільшується, оскільки при цьому збільшується швидкість хімічної реакції і зменшується інтенсивність тепловтрат. При підвищенні температури на 100 К НКМПП, як правило, знижується на 8-10 % від стандартного значення, а ВКМПП підвищується на 12-16%.

Для більшості вуглеводнів підвищення тиску розширює вибухонебезпечну область. Із збільшенням *тиску* у суміші зменшуються міжмолекулярні відстані, що приводить до збільшення швидкості хімічних реакцій. Тобто НКМПП дещо меншає, а ВКМПП – збільшується. Так, для ацетилено-повітряної суміші за тиску 101 кПа КМПП становить від 2,5 до 81%, підвищення тиску до 150 кПа приводить до зростання ВКМПП практично до 100%, а при тиску 270 кПа відбувається тепловий вибух суміші за нормальної температури. При зниженні тиску нижче атмосферного область запалювання всіх сумішей стає вужче.

При збільшенні *потужності джерела запалювання* (наприклад, електричної іскри) діапазон концентрацій горючої речовини, в якому

можливе запалювання, розширюється, але існують межі, поза які збільшення потужності іскри не приводить до розширення діапазону вибухонебезпечних концентрацій. Таку потужність називають «насиченою». При зниженні потужності джерела запалювання відбувається звуження КМПП аж до неможливості запалювання.

Із збільшенням *турбулентності*, що характеризується швидкістю руху газового потоку, КМПП вужчають. Це пояснюється тим, що при перемішуванні зростає тепловіддача, що ускладнює запалювання.

Оскільки КМПП можуть змінюватися при зміні зовнішніх умов, для забезпечення пожежної безпеки при роботі з горючими речовинами визначають не тільки самі концентраційні межі, але й *безпечні концентрації*, нижче або вище яких суміш гарантовано не буде запалюватися.



області концентрацій: БК – безпечні; НК – небезпечні за зміни умов;
ВНК – вибухонебезпечні; ПНК – вибухобезпечні але пожежонебезпечні

Рисунок 1.11 – Шкала концентраційних меж поширення полум’я; області різної пожежовибухонебезпеки фактичних концентрацій горючої речовини

Розрахункові методи визначення КМПП.

Більш простим методом розрахунку концентраційних меж є розрахунок за емпіричною формулою: $\varphi_{н(в)} = \frac{100}{a \cdot \beta + b}$, %, де β – стехіометричний коефіцієнт реакції горіння; a , b – константи для нижньої та верхньої КМПП (додаток Б).

Більш точна методика розрахунку КМПП враховує вплив хімічної будови горючої речовини на її схильність до окиснення: $\varphi_{н(в)} = \frac{100}{\sum_{\mu=1}^s h_s m_s}$, % ,

де h_s – коефіцієнт s -ої структурної групи (додаток В); m_s – число s -тої структурної групи в структурній формулі речовини.

Безпечні концентраційні межі враховують запас на безпеку:

$$\varphi_{нб} = 0,9(\varphi_{н} - 0,21), \% \quad (1.2)$$

$$\varphi_{вб} = 1,1(\varphi_{в} + 0,42), \%, \quad (1.3)$$

де $\varphi_{н}$, $\varphi_{в}$ – нижня та верхня КМПП, %.

Масові КМПП визначають перерахунком об'ємних КМПП за формулою:

$$\varphi'_{н(в)} = \varphi_{н(в)} \frac{10 \cdot \mu}{V_{\mu}}, \text{ г} \cdot \text{м}^{-3},$$

де μ – молярна маса горючої речовини, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$; $V_{\mu} = 22,4 \cdot \frac{101,3T}{273P}$ – молярний об'єм газу за даних умов, $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$, T , P – фактичні температура (К) та тиск (кПа).

На виробництві та у технологічних процесах частіше використовують суміші кількох горючих речовин; КМПП суміші розраховують за правилом Ле-Шательє:

$$\varphi_{н(в) \text{ сум.}} = \frac{\sum \varphi_i}{\sum \frac{\varphi_i}{\varphi_{н(в) i}}}, \%,$$

де $\varphi_{н(в) i}$ – нижня або верхня КМПП кожного i -го горючого компонента, %; φ_i – вміст i -го компонента в суміші, %.

Але це правило погано працює для багатьох горючих сумішей, складові яких сильно відрізняються за своєю хімічною активністю.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Визначити здатність до кінетичного горіння пароповітряної суміші, в залежності від концентрації досліджуваної речовини.

Опис лабораторної установки

Основою приладу є товстостінна скляна циліндрична посудина (вибухова труба) з потужним іскровим джерелом запалювання, рис. 1.9. Верхня й нижня частини циліндру закриті кришками. На нижній кришці розташовано джерело запалювання, у верхній кришці є отвір, закритий гумовою пробкою на мотузці. Скляний циліндр закріплено на станині на вертикальних стойках. Кріплення скляного циліндру дає можливість обертати його у вертикальній площині.

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення дослідів

1. Для заданої викладачем горючої речовини провести розрахунок об'ємних КМПП за різними методиками та визначити область вибухонебезпечних концентрацій.

1.1 За апроксимаційною формулою (додаток Б): скласти рівняння реакції горіння речовини у повітрі, визначити стехіометричний коефіцієнт β та константи a , b для нижньої і верхньої КМПП та розрахувати нижню і верхню концентраційні межі поширення полум'я φ_H і φ_V .

1.2 З урахуванням хімічної структури речовини за формулою (додаток В): за допомогою викладача визначити структурну формулу речовини, вид і кількість зв'язків; для зручності проведення розрахунку заповнити таблицю та розрахувати нижню і верхню КМПП φ_H і φ_V .

Вид зв'язку	Число зв'язків, m_s	h_s для НКМПП	h_s для ВКМПП

1.3 Провести розрахунок стехіометричної концентрації:

$$\varphi_{\text{СМК}} = \frac{100}{1 + 4,76\beta}, \%$$

3. Провести розрахунок безпечних КМПП φ_{H6} , φ_{V6} за формулами (1.2) і (1.3).

4. Розрахунок масових концентрацій: стехіометричної, нижньої і верхньої КМПП, нижньої і верхньої безпечних КМПП.

4.1 Розрахувати молярну масу горючої речовини μ , кг·кмоль⁻¹.

4.2 Розрахувати молярний об'єм газу за даних умов V_μ :
$$V_\mu = 22,4 \frac{101,3T}{273P}, \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}, \text{ де } T - \text{температура за даних умов, К; } P - \text{тиск за даних умов, кПа.}$$

4.3 Розрахувати масові концентрації за формулою: $\varphi' = \varphi \cdot \frac{10 \cdot \mu}{V_\mu}$, г·м⁻³, де φ' – масова концентрація речовини у повітрі, г·м⁻³; φ – об'ємна концентрація речовини, %.

5. Розрахувати об'єм рідини, мл, що необхідно ввести в реакційну посудину для отримання розрахованих концентрацій: $V_{\text{рід}} = \frac{V_{\text{рп}} \cdot \varphi'}{\rho_{\text{рід}}}$, мл, де $V_{\text{рп}}$ – об'єм реакційної посудини, мл; ρ – густина рідини, г·м⁻³.

6. Занести до таблицю результатів досліду одержані 5 значень об'ємів рідини, які в реакційному циліндрі утворюють нижню безпечну та нижню КМПП, стехіометричну концентрацію, верхню та верхню безпечну КМПП.

Проведення досліду

1. Відкрити гумову пробку і ввести у вибухову трубу за допомогою піпетки розрахований об'єм досліджуваної рідини, що відповідає нижній безпечній КМПП.

2. Закрити отвір вибухової труби гумовою пробкою (не щільно), дати 2–3 хв. на випаровування, після чого усереднити концентрації пари шляхом повільного обертання труби у вертикальній площині.

3. Натиснути кнопку високовольтного блока, увімкнути джерело запалювання. Фіксувати наявність або відсутність спалаху. Результати випробування «відмова», «спалах» або «вибух» занести у таблицю результатів досліду.

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

№	Горюча речовина	Об'єм, мл	Концентрація, %	Результат

4. Після проведення досліду продути реакційну посудину (вибухову трубу) повітрям, повторити випробування наступної концентрації досліджуваної рідини.

5. По закінченні досліду за візуальними спостереженнями проявів горіння зробити висновок про залежність та зміну небезпеки пароповітряної суміші від концентрації горючої речовини.

Контрольні запитання

1. Поняття про концентраційних меж поширення полум'я (КМПП).
2. Практичне значення КМПП.
3. Зміна яких параметрів приводить до розширення КМПП?
4. Зміна яких параметрів приводить до звуження КМПП?
5. Обґрунтуйте наявність безпечних КМПП.
6. Обґрунтуйте наявність КМПП з точки зору теплової теорії виникнення горіння.
7. Як проводити оцінку пожежної небезпеки фактичної концентрації горючої речовини?

Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ СТУПЕНЯ НЕБЕЗПЕКИ ФАКТИЧНОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ ПАРІВ ГОРЮЧОЇ РЕЧОВИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ГАЗОАНАЛІЗАТОРА

Теоретична частина роботи

Визначення ступеня небезпеки фактичної концентрації парів або газів проводять шляхом її порівняння з повною шкалою концентраційних меж поширення полум'я (КМПП), яка будується від 0 до 100 % та враховує нижню безпечну, нижню, верхню та верхню безпечну КМПП. Відповідно на цій шкалі виникає 5 областей з різним ступенем небезпеки для фактичних концентрацій горючої речовини в газоподібному окисному середовищі: безпечні концентрації, бідні суміші – небезпечні за зміни певних умов, вибухонебезпечні концентрації, багаті суміші – небезпечні за зміни певних умов, вибухобезпечні але пожежонебезпечні концентрації. Але у практиці пожежної безпеки частіше мають справу з безпечним середовищем (повітряним простором), у якому необхідно контролювати зміну цього стану внаслідок потрапляння горючих речовин. Тобто зазвичай контролюється концентраційна область безпечних концентрацій та небезпека наближення фактичної концентрації до нижньої безпечної

КМПП, тобто до області небезпечних концентрацій за зміни певних умов. Для цього використовують газоаналізатори різного типу.

Наприклад, для експериментального визначення фактичної концентрації горючих парів і газів застосовують різні прилади періодичної або постійної дії типу СТХ (сигналізатор термохімічний) або ЕТХ (експлозиметр термохімічний) тощо. Робота приладів заснована на реєстрації тепловиділення реакції окиснення для сумішей з концентраціями горючої речовини, меншими за стехіометричну: в цьому діапазоні концентрацій – чим вони більші, тим більше виділяється тепла. Але випробування ініціюється нагрівом на каталізаторі для ініціювання окиснення будь-яких концентрацій горючого, навіть безпечних; але за умови дії цієї системи на небезпечні концентрації у реакційній камері приладу буде спалах або вибух, що може його пошкодити, а у гіршому випадку ініціювати вибух вимірюваного середовища у приміщенні або іншому просторі. Для запобігання такого розвитку подій на виходах з реакційної камери стоять вогнеперешкоджувачі. Тим не менш, техніка безпеки користування приладом передбачає вимірювання лише безпечних концентрацій з сигналізацією наближення до небезпечних концентрацій.

Експериментальна частина роботи

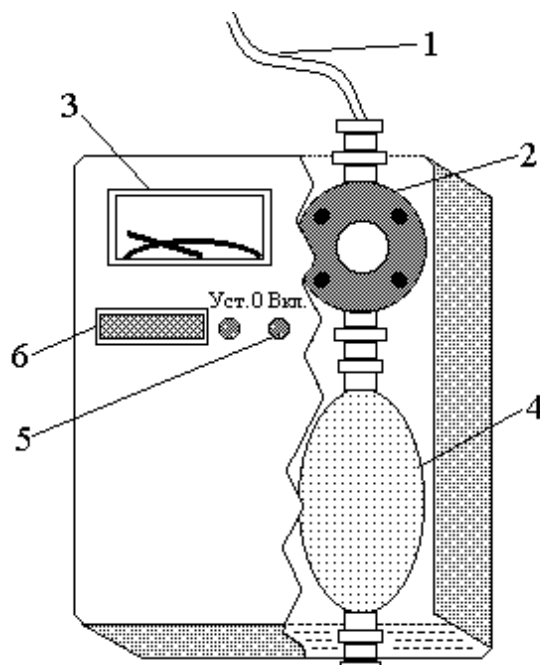
Мета роботи: Визначити ступінь небезпеки фактичної концентрації пари досліджуваної речовини.

Опис лабораторної установки

Термохімічний сигналізатор СТХ-5А призначено для періодичного контролю в «ручному» режимі довибухових концентрацій горючих парів і газів у повітрі в діапазоні 5-80 % від нижньої КМПП речовини. Лабораторна робота може проводитись на приладі, який працює в автоматичному режимі прокачування газу, вимірювання та сигналізації.

Дія термохімічного сигналізатора ґрунтується на вимірюванні інтенсивності реакції окиснення горючих речовин на робочому чутливому елементі, електричний опір якого включено у мостову схему, у якій усі чотири «плеча» у холодному стані мають однаковий опір, відповідно – на виході з мостової схеми 0 V. Чутливий елемент являє собою електропровідний шарик із напиленням платини. При окисненні на поверхні чутливого елемента горючих речовин його температура зростає, відповідно змінюється опір, вимірювальний міст розбалансовується і в його діагоналі з'являється напруга, пропорційна концентрації горючої

речовини. Цю напругу вимірює гальванометр, який проградуйовано відповідно до концентрацій метану. Тобто прилад показує частку у % від нижньої безпечної КМПП метану. Показання 80 % означає досягнення тепловиділення, яке відповідає нижній безпечній КМПП метану.



1 – вхідний патрубок; 2 – реакційна камера; 3 – стрілочний індикатор; 4 – гумова «груша»; 5 – індикатор «Вмик»; 6 – кнопка «Вимірювання»

Рисунок 1.12 – Схема приладу СТХ-5А для вимірювання довибухових концентрацій парів і газів у повітрі:

Для контролю працездатності джерела живлення передбачено світлодіод «Вмик», який повинен світитись при натисканні кнопки «Вимірювання». Якщо світлодіод не світиться, необхідно замінити джерело живлення (акумулятор).

Для різних речовин передбачено індивідуальні коефіцієнти перерахунку показань приладу. Кінцеве значення концентрації знаходять після перерахувань для конкретної горючої речовини за формулою: $A_{Hj} = K_j A_j$, %, де A_{Hj} – фактична концентрація речовини, % НКМПП; K_j – коефіцієнт перерахунку показань приладу на значення для даної горючої речовини відносно метану (додаток Г); A_j – показання приладу, % НКМПП CH_4 .

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення дослідю

1. Для заданої викладачем горючої речовини провести розрахунок меж області вибухонебезпечних концентрацій за апроксимаційною формулою (додаток Б) та з урахуванням хімічної структури речовини (додаток В).

2. Визначити область безпечних концентрацій $\varphi_{н.без}$ і $\varphi_{в.без}$ за формулами:

$$\varphi_{нб} = 0,9(\varphi_{н} - 0,21), \%, \varphi_{вб} = 1,1(\varphi_{в} + 0,42), \%$$

Побудувати шкалу КМПП.

3. Розрахувати фактичну концентрацію парів горючої речовини $\varphi'_{факт}$ в заданому об'ємі $V_{рп}$ (посудина із кришкою, ємністю 1–2 літри).

3.1 Розрахувати масу горючої рідини $m_{рід}$, що вводять в посудину за об'ємом $V_{рід}$ (задає викладач) і густиною горючої рідини $\rho_{рід}$:

$$m_{рід} = \frac{V_{рід}}{\rho_{рід}}, \text{ г.}$$

3.2 Розрахувати молярну масу горючої речовини μ , кг·кмоль⁻¹.

3.3 Розрахувати молярний об'єм газу за даних умов:

$$V_{\mu} = 22,4 \frac{101,3T}{273P}, \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}, \text{ де } T - \text{температура за даних умов, К; } P - \text{тиск за}$$

даних умов, кПа.

3.4 Розрахувати фактичну масову $\varphi'_{факт}$ та об'ємну $\varphi_{факт}$ концентрації горючої речовини в заданому об'ємі: $\varphi'_{факт} = \frac{m_{рід}}{V_{рп}}, \text{ г} \cdot \text{м}^{-3},$

$$\varphi_{факт} = \varphi'_{факт} \frac{V_{\mu}}{10\mu}, \%, \text{ де } m_{рід} - \text{маса рідини, г; } V_{рп} - \text{об'єм реакційної}$$

посудини, м³; μ – молярна маса горючої речовини, кг·кмоль⁻¹; V_{μ} – молярний об'єм газу за даних умов, м³·кмоль⁻¹.

4. Підготувати до роботи газовий аналізатор. Робоче положення приладу – горизонтальне. Провести зовнішній огляд. Здійснити 8–9 натискань гумового балону, натиснути кнопку «Вимірювання», повинен загорітись світлодіод «Вмик». При натиснутій кнопці «Вимірювання» перевірити «нуль» індикатора. Якщо «нуль» індикатора не встановлений, встановити стрілку індикатора в нульове положення,

обертаючи ось резистора «Уст. 0». Підготовку приладу до роботи проводити в приміщенні, яке не містить горючих парів і газів.

Проведення досліду

1. Для проведення вимірювань розташувати прилад в робочому положенні.

2. Відкрити кришку посудини, опустити вхідний патрубком приладу у посудину із парою горючої речовини, здійснити 8 - 9 натискань гумового балону.

3. Натиснути кнопку «Вимірювання» і через 3 с проводити натискання гумової «груші» із частотою – одне натискання за 2 с. Зафіксувати показання приладу.

4. Розрахувати фактичну концентрацію вимірюваної горючої речовини виходячи із значення нижньої КМПП метану за формулою:

$$\varphi_{\text{факт}} = \frac{A_{\text{нї}} \cdot \varphi_{\text{н(CH}_4\text{)}}}{100}, \text{ \%}, \text{ де } \varphi_{\text{н(CH}_4\text{)}} - \text{НКМПП метану, \%}; A_{\text{нї}} = K_j \cdot A_j -$$

перерахунок показань приладу за коефіцієнтами для даної горючої речовини відносно метану (додаток Г).

5. Результати вимірювань занести в таблицю.

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

№	Речовина	Показання приладу, A_j , (% НКМПП CH_4)	Концентрація	
			% НКМПП $A_{\text{нї}} = K_j \cdot A_j$	$\varphi_{\text{факт}} = \frac{A_{\text{нї}} \cdot \varphi_{\text{н(CH}_4\text{)}}}{100}$

6. Зробити висновок про ступінь небезпеки фактичної концентрації горючої речовини за порівнянням зі шкалою КМПП.

Контрольні запитання

1. Теорії поширення горіння в газових сумішах.
2. Суть теплової теорії поширення полум'я. Будова фронту полум'я.
3. Види кінетичного горіння.
4. Поняття про концентраційні межі поширення полум'я (КМПП). Їх вплив на пожежовибухонебезпеку технологічних процесів.
5. Способи розрахункового визначення КМПП.
6. Залежність КМПП від будови та концентрації горючої речовини, концентрації окисника, інертних газів, каталізаторів, інгібіторів, тиску,

температури суміші, потужності джерела запалювання.

7. Експериментальне визначення КМПП і ступеня небезпеки фактичної концентрації паро-газоповітряних сумішей (устрій приладу та спосіб вимірювання КМПП).

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ПОШИРЕННЯ ФРОНТУ ПОЛУМ'Я

Теоретична частина роботи

Однією з визначальних властивостей процесу горіння є його здатність до самостійного поширення. Процес горіння виникає внаслідок впливу джерела запалювання або самозапалювання, зона горіння надалі самостійно пересувається з деякою швидкістю в напрямі свіжої горючої суміші, при цьому його поширення супроводжується випромінюванням світла і тепла.

Поширення полум'я по однорідній горючій суміші відбувається за кінетичним механізмом, внаслідок пошарового прогріву початкової суміші за рахунок передачі тепла від зони горіння. Таке горіння називають *дефлаграційним*. Якщо прогрів холодної горючої суміші перед фронтом полум'я до запалювання відбувається шляхом швидкого адіабатичного стиснення, такий механізм поширення горіння називається *детонаційним*. При різкому локальному стисненні виникає хвиля стиснення – ударна хвиля, яка поширюється з великою швидкістю – порядку швидкості звуку, тому між гарячим фронтом полум'я та холодною сумішшю не встигає відбуватися теплообмін шляхом теплопровідності. Внаслідок ударного стиснення відбувається сильне нагрівання горючої газової суміші до 1500-1700 К, тому вона самоспалахує.

Більш сприятливі умови для виникнення детонації виникають під час горіння горючих сумішей у довгих трубах. Швидкий рух газу в трубі та втрати тепла на стінки приводять до витягування полум'я зі збільшення об'єму зони згорання, що прискорює згорання. При цьому фронт полум'я турбулізується, що додатково прискорює горіння. Перед фронтом полум'я йде швидке стиснення початкової газової суміші і підвищення тиску в ній, утворюється ударна хвиля.

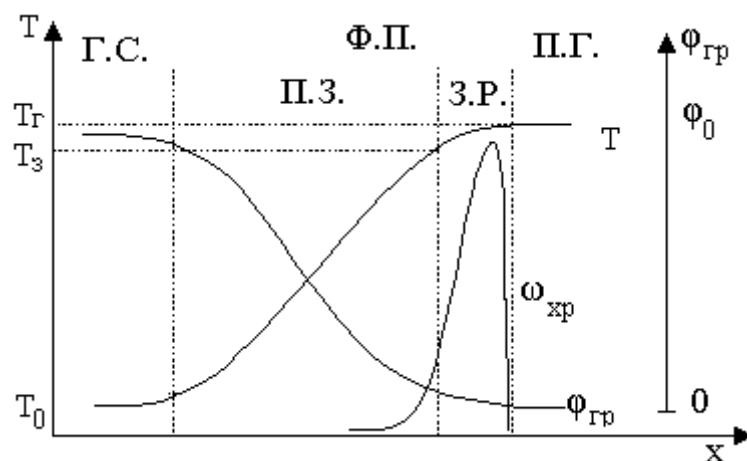
Стиснення в ударній хвилі практично миттєво збільшує густину і температуру газу, що в свою чергу спричиняє збільшення швидкості хімічної реакції і, відповідно, швидкості поширення фронту полум'я. Одночасно з прискоренням поширення полум'я відбувається зростання

тиску в ударній хвилі. Нова ударна хвиля поширюється по вже стиснутому і нагрітому попередньою хвилею газу з більшою швидкістю. На певній відстані ця наступна, більш швидка хвиля, наздоганяє першу, їх амплітуди додаються, в результаті виникає нова більш потужна ударна хвиля. Відбиті від огорожуючих поверхонь ударні хвилі можуть накладатися, що різко збільшує тиск в ударній хвилі,.

Швидкість переходу дефлаграційного горіння до детонації визначається властивостями речовини і залежить тільки від її теплотворної здатності та співвідношення теплоємностей і не залежить від кінетики реакції.

При поширенні горіння між вихідною горючою сумішшю (ГС) та продуктами горіння (ПГ) знаходиться вузька зона – фронт полум'я (ФП), рис. 1.12.

Фронт полум'я – об'єм системи, в якому протікає хімічна реакція взаємодії горючої речовини з окисником. У цій зоні утворюються продукти горіння, виділяється теплота згорання і температура підвищується до температури горіння.



T_0 – початкова температура газової суміші; $T_з$ – температура запалювання; $T_{гор}$ – температура горіння; ϕ_0 – початкова концентрація горючої речовини, $\omega_{хр}$ – швидкість хімічної реакції окиснення

Рисунок 1.12 – Зміна температури, концентрації горючої речовини і швидкості хімічної реакції у фронті ламінарного полум'я

Фронт полум'я починає поширюватися у холодну горючу суміш з певною найменшою швидкістю – її називають «нормальною». *Нормальна швидкість поширення горіння u_n* – швидкість руху фронту полум'я (ФП) по нерухомій горючій суміші у напрямку по нормалі (перпендикуляру) до

поверхні ФП: $u_n = \frac{dx}{dt}$, де x – відстань, яку проходить ФП по нерухомій горючій суміші по нормалі до поверхні ФП за одиницю часу.

Значення нормальної швидкості горіння лежить в межах від кількох десятків сантиметрів до кількох метрів в секунду і залежить від складу горючої суміші (співвідношення вмісту горючої речовини, окисника, інертних компонентів), її теплофізичних параметрів, початкової температури, тиску тощо.

Однак, розширення гарячих продуктів горіння, що утворилися, створює тиск та надає додаткове зміщення поверхні фронту горіння, тому швидкість поширення фронту полум'я u_{fn} є більшою, ніж нормальна швидкість.

За умови рівності швидкості витікання горючої суміші і швидкості руху фронту полум'я назустріч встановлюється *стаціонарне, нерухоме* полум'я коли кількість горючої суміші, що згоряє, компенсується кількістю горючої суміші, що надходить $u_{fn} = u_{gc}$ (наприклад, на газовому пальнику – збільшення потоку газової суміші збільшує розмір полум'я до встановлення рівноваги між кількістю горючої суміші, що згоряє, та кількістю горючої суміші, що надходить).

Нестационарне полум'я (*рухоме*) утворюється, якщо швидкість руху горючого газу відрізняється від швидкості поширення фронту полум'я: 1) якщо швидкість фронту полум'я є більшою за швидкість виходу горючої суміші назовні з певного об'єму $u_{fn} > u_{gc}$ – станеться проскок полум'я з вибухом усередині цього об'єму; 2) якщо швидкість фронту полум'я є значно меншою за швидкість виходу горючої суміші назовні з певного об'єму $u_{fn} < u_{gc}$ – станеться зрив полум'я. Значення швидкості поширення фронту полум'я в газових сумішах дозволяє визначати безпечні швидкості перекачування газоповітряних сумішей.

При дефлаграційному горінні фронт полум'я рухається в просторі за рахунок передачі тепла шляхом теплопровідності із зони реакції в свіжу горючу суміш. Під дією цього тепла суміш розігрівається до критичної температури, що різко збільшує швидкість хімічної реакції з виникненням полум'яного горіння. Оскільки тепловий потік передається безперервно, відбувається постійне послідовне запалювання нових шарів горючої суміші.

У фронті полум'я внаслідок протікання хімічної реакції концентрація початкових компонентів знижується до нуля, а температура підіймається до температури горіння, рис. 1.12. Таким чином, в досить вузькій зоні відбуваються різкі якісні зміни в газовій суміші. Однак відомо, що процес горіння може початися тільки при досягненні деякої критичної

температури. Така температура значно перевищує початкову температуру суміші, тому було зроблене припущення про наявність зони підготовчих процесів.

У фронт полум'я виділяють на підготовчу зону (ПЗ) і зону хімічної реакції (ЗР), рис. 1.12. У підготовчій зоні швидкість хімічної реакції ω_{xp} ще мала, однак в ній відбувається найбільша зміна температури внаслідок передачі тепла із зони реакції та підігрівання горючої суміші до критичної температури. У зоні реакції проходить процес горіння, з яким пов'язана основна частка тепловиділення і утворення продуктів горіння (ПГ). Інтенсивна реакція в цій зоні підтримується дифузійним перенесенням складових горючої суміші із підготовчої зони.

Рівняння теплового балансу ФП має вид:

$$\lambda \frac{d^2T}{dx^2} - c_p \rho u_n \frac{dT}{dx} + Q_n \omega_{xp} = 0,$$

де λ , c_p , ρ – коефіцієнт теплопровідності, масова теплоємність, густина газової суміші; T – температура газової суміші; u_n – нормальна швидкість поширення фронту полум'я; Q_n – тепловий ефект реакції; ω_{xp} – швидкість хімічної реакції окиснення; x – координата по нормалі до поверхні фронту полум'я. Перший член рівняння описує тепловий потік внаслідок молекулярної теплопровідності, другий – внаслідок конвекційного теплообміну, третій – внаслідок тепла хімічної реакції.

Рішення рівняння, з урахуванням того, що в підготовчій зоні можна нехтувати тепловиділенням хімічної реакції ($Q_n \omega_{xp} = 0$), температура на поверхні фронту полум'я дорівнює температурі горіння $T_{гор}$, а в зоні реакції відбувається незначна зміна температури газової суміші і конвекційний потік можна прийняти рівним нулю ($C_p \rho u_n dT/dx = 0$), дає рівняння для нормальної швидкості поширення полум'я:

$$u_n = \frac{\sqrt{\frac{2Q_n \omega_{xp} \lambda R T_{гор}^2}{E_{акт}}}}{c_p \rho (T_{гор} - T_o)}$$

На швидкість поширення полум'я впливають наступні чинники: вид горючої речовини (теплотворна здатність горючої речовини); склад горючої суміші (концентрації горючої речовини, окисника, негорючого газу, інгібіторів або каталізаторів); теплофізичні характеристики газової суміші (λ, C_p, ρ); умови, в яких знаходиться газова суміш (тиск, початкова температура).

Під час горіння утворюються продукти згорання і відбувається їх теплове розширення. Якщо горіння відбувається в замкненому об'ємі або з великою швидкістю, то воно супроводжується вибухом. *Вибух* – це швидке кінетичне згорання, що супроводжується різким виділенням значної кількості енергії і утворенням стиснутих газів, здатних виконувати роботу, за концентрацій горючої речовини, близької до стехіометричної. За дещо менших та більших концентрацій для швидкої реакції не вистачає або горючої речовини, або повітря – тому буде спостерігатися *хлопок* – швидке кінетичне згорання зі звуковим ефектом без руйнувань. На нижній та верхній КМПП існує критична нестача компонентів у горючій суміші, тому буде спостерігатися *спалах* – повільне кінетичне згорання без звукового ефекту.

Процес згорання при вибуху відбувається дуже швидко, і гази, що утворилися, не встигають розширитися. Такий процес називають *адіабатним* та *ізохорним*, тобто без тепловтрат в навколишній простір та при постійному об'ємі. Енергія вибуху – це зміна внутрішньої енергії системи між кінцевим і початковим станом, що враховує теплоту згорання і збільшення кількості молей у системі після реакції. $Q_{\text{виб}} = Q_{\text{н}} + RT_0 \Delta n$, кДж·моль⁻¹, де $Q_{\text{н}}$ – нижча теплота згорання, кДж·моль⁻¹; R – універсальна газова стала, кДж·моль⁻¹ К⁻¹; T_0 – початкова температура, К; Δn – різниця між числом молів продуктів горіння і вихідної суміші.

Оскільки згорання горючої суміші за умов великої швидкості реакції йде без теплового розширення та без зміни об'єму середовища, то для розрахунку тиску при вибуху застосовують формулу: $P_{\text{виб}} = \frac{P_0 T_{\text{виб}} \sum n_{\text{пр}}}{T_0 \sum n_{\text{поч}}}$, кПа, де P_0 , T_0 – початкові тиск (кПа) та температура (К) у горючій суміші; $T_{\text{виб}}$ – температура продуктів вибуху, К; $\sum n_{\text{поч}}$, $\sum n_{\text{пр}}$ – число молів вихідної горючої суміші та продуктів горіння.

При вибуху стехіометричної суміші температура горіння досягає найбільшого значення, отже, і тиск вибуху буде максимальним.

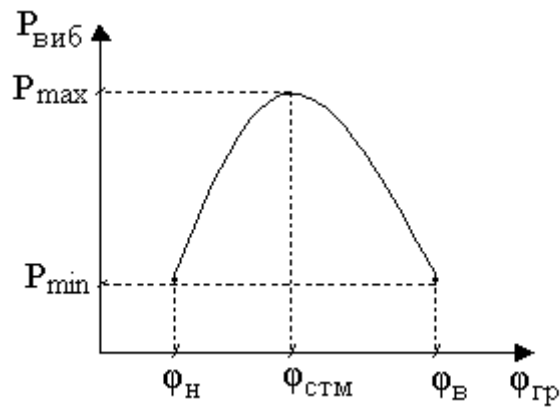


Рисунок 1.13 – Зміна тиску вибуху від концентрації горючої речовини в суміші

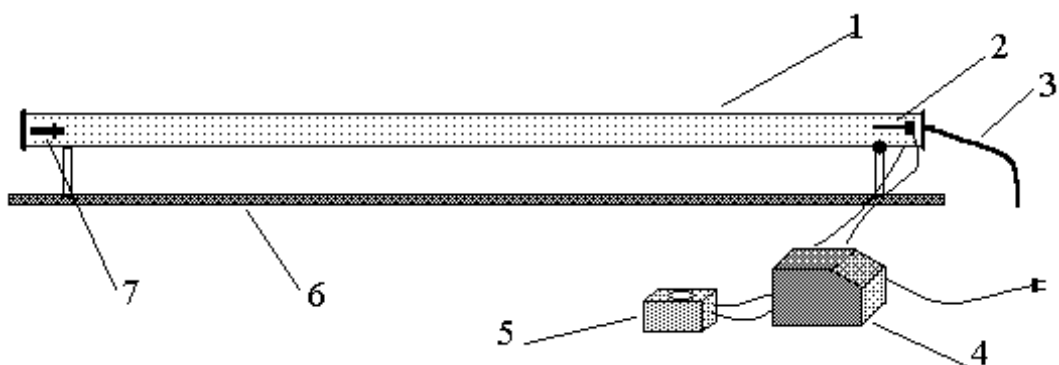
При заміні повітря в горючій суміші киснем тиск вибуху різко зростає, тому що знижується кількість молів початкової суміші ($1 \text{ моль } GP + \beta \text{ молів } O_2$ замість $1 \text{ моль } GP + 4,76 \cdot \beta \text{ молів повітря}$), при цьому зростає температура вибуху (не витрачається тепло на нагрівання інертного азоту повітря).

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Дослідити залежність швидкості руху фронту полум'я від концентрації горючої речовини. Визначити фактори, що впливають на швидкість поширення фронту полум'я.

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається із скляної труби, яка розміщена на станині може підніматись на шарнірі. В середині труби розміщено іскровий розрядник, за допомогою якого запалюється суміш досліджуваної речовини з повітрям. З цього ж боку приєднано шланг подачі повітря для продування труби чистим повітрям після проведення дослідів. З протилежного боку знаходиться засувка, яка закриває отвір труби і з'єднана із кінцевим вимикачем. Запалювання горючої суміші здійснюється шляхом подачі на іскровий розрядник струму від високовольтного трансформатора. Час, за який полум'я пройде від розрядника до засувки, фіксується за допомогою таймера.



1 – скляна труба; 2 – іскровий розрядник; 3 – шланг подачі повітря;
4 – високовольтний трансформатор; 5 – таймер; 6 – станина; 7 – кінцевий вимикач

Рисунок 1.14 – Лабораторна установка для визначення швидкості поширення фронту полум'я

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення дослідів

1. Одержати від викладача речовину для проведення дослідження.
2. Провести розрахунок об'ємної та масової стехіометричної, нижньої і верхньої концентраційної межі поширення полум'я заданої речовини.
 - 2.1. Скласти рівняння реакції горіння, визначити стехіометричний коефіцієнт β .
 - 2.2 Розрахувати молярну масу горючої речовини μ , $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$.
 - 2.3 Розрахувати молярний об'єм газу за даних умов V_μ , $\text{м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}$.
 - 2.4 Розрахувати об'ємну та масову стехіометричну, нижню і верхню концентраційну межу поширення полум'я за формулами:

$$\varphi_{\text{стм}} = \frac{100}{1 + 4,76 \cdot \beta}, \%, \quad \varphi_{\text{н(в)}} = \frac{100}{a \cdot \beta + b}, \%, \quad \varphi'_{\text{стм(н; в)}} = \varphi_{\text{стм(н; в)}} \cdot \frac{10 \cdot \mu}{V_\mu}; \text{Г} \cdot \text{М}^{-3}.$$

3. Визначити об'єм реакційної посудини: $V_{\text{труби}} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot l$, м^3 , де d – діаметр труби, м; l – довжина труби, м.

4. Розрахувати об'єм рідини мл, що вводиться в реакційну посудину (трубу) на підставі значення її густини $\rho_{\text{рід}}$ $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$:

$$V_{\text{рід(стм)}} = 1000 \cdot \frac{V_{\text{труби}} \cdot \Phi'_{\text{стм}}}{\rho_{\text{рід}}}, \text{ мл}, \quad V_{\text{рід}(\Phi_{\text{н(в)}})} = 1000 \cdot \frac{V_{\text{труби}} \cdot \Phi'_{\text{н(в)}}}{\rho_{\text{рід}}}, \text{ мл}.$$

5. Визначити ряд об'ємів горючої рідини, які будуть вводиться в трубу, і відповідні їм концентрації, орієнтуючись на верхню і нижню концентраційну межу поширення полум'я.

Проведення досліду

1. Відміряти піпеткою розраховану кількість досліджуваної рідини і ввести її в трубу. Трубу підняти для рівномірного розтікання рідини, для усереднення концентрацій пари використати магнітну мішалку.

2. Після випаровування рідини подати іскровий розряд (іскровий розряд і запуск таймера відбуваються синхронно). Спостерігати за виникненням горіння і просуванням фронту полум'я в трубі.

3. По досягненні фронтом полум'я засувки спрацьовує кінцевий вимикач і таймер вимикається. Згідно показань таймера визначити час руху фронту полум'я τ , розрахувати швидкість поширення фронту полум'я $u_{\text{фп}}$.

4. Результат занести в таблицю:

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

№	Об'єм рідини $V_{\text{рід}}$, мл	Концентрація речовини φ , %	Час руху ФП, τ , с; ознаки горіння	Швидкість руху полум'я, $u_{\text{фп}}$, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$

5. Провентилювати трубу свіжим повітрям. Повторити дослід з іншим об'ємом рідини.

6. За підсумками дослідів побудувати графік залежності швидкості руху фронту полум'я від концентрації горючої речовини. Зробити висновок.

Контрольні запитання

1. Види кінетичного горіння. Визначення дефлаграційного та детонаційного горіння.

2. Фронт полум'я, його структура і характерні закономірності зміни температури та концентрації горючої речовини у фронті полум'я.

3. Дефлаграційне поширення фронту полум'я .

4. Умови протікання ланцюгових хімічних реакцій, розподіл активних центрів у фронті полум'я.

5. Перехід кінетичного дефлаграційного горіння в детонацію.
6. Тиск при вибуху, фактори, що впливають на максимальний тиск при вибуху.
7. Нормальна та лінійна швидкість поширення полум'я в газах.
8. Фактори, що впливають на нормальну швидкість поширення полум'я.

Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОГО ЗАЗОРУ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЛУМ'Я КРІЗЬ ВОГНЕПЕРЕШКОДЖУВАЧ ПІД ЧАС ГОРІННЯ ГАЗІВ

Теоретична частина роботи

Швидкість поширення полум'я по газоповітряній суміші залежить від енергії активації даної реакції горіння, концентрації речовин, що реагують, і температури. Енергія активації обумовлюється природою горючої речовини.

Швидкість поширення полум'я, як функція швидкості хімічної реакції, залежить від концентрацій горючої речовини та кисню. Згідно із законом діючих мас, швидкість хімічної реакції у повітряній суміші пропорційна концентрації горючого газу і кисню, взятих у степенях, що дорівнюють стехіометричним коефіцієнтам цих речовин у реакції горіння. Швидкість хімічної реакції також пов'язана з температурою: за законом

Ареніуса це експоненціальна функція: $v = v_0 \varphi_T^a \varphi_O^b e^{-\frac{E_{\text{акт}}}{RT}}$. Тобто, щоб зменшити швидкість поширення полум'я, потрібно зменшити температуру горючої суміші.

Із залежністю від температури пов'язана залежність від діаметра труби (а також зазору або просвіту), в якій відбувається горіння газу. Біля стінки труби суміш інтенсивніше охолоджується і швидкість поширення полум'я падає (фронт полум'я витягується півсферою по центру). Зі збільшенням діаметру труби відношення об'єму суміші до поверхні охолодження зростає (питома поверхня тепловіддачі), інтенсивність тепловтрат зменшується і швидкість поширення полум'я зростає. До діаметра труби 0,1–0,15 м швидкість зростає досить стрімко, у разі подальшого збільшення діаметра – менш помітно, а за певного граничного діаметру досягає максимуму і надалі вже не росте.

При зменшенні діаметру труби швидкість поширення полум'я знижується. Для кожної суміші існує діаметр, за якого полум'я вже не поширюється внаслідок перебільшення тепловтрат над тепловиділенням у горючій суміші. Такий діаметр називають критичним (вогнегасним) зазором. Він залежить від фізико-хімічних властивостей суміші, довжини та матеріалу труби.

На принципі розбивання горючої системи на малі об'єми, де критично зростає питома поверхня тепловтрат побудовано роботу вогнезахисних технічних пристроїв – вогнеперешкоджувачів, які запобігають проскоку через них полум'я. За принципом формування критичного зазору вони можуть бути: щілисті, насипні, перфоровані та сіткові. При конструюванні таких пристроїв виникає необхідність у визначенні критичного зазору для тієї горючої суміші, по якій необхідно запобігти поширенню полум'я. Визначення критичного зазору дозволяє встановити безпечний діаметр зазору, який гарантовано перешкоджає поширенню полум'я: $d_{\text{безп.}} = \frac{d_{\text{кр}}}{2,7}$, де 2,7 – статистичний коефіцієнт

безпеки. Зі значенням критичного зазору також пов'язаний такий параметр горючої речовини як «мінімальна енергія запалювання».

Для даних умов поширення горіння критичний зазор залежить від фізико-хімічних властивостей горючої суміші та може бути розрахований на підставі критерію Пекле (Pe , визначає співвідношення конвекційного та дифузійного механізмів переносу тепла у комірці сітки): $Pe_{\text{кр}} = \frac{u_{\text{н}} \cdot d_{\text{кр}} \cdot c \cdot P}{\lambda \cdot R \cdot T_0}$, де $u_{\text{н}}$ – нормальна швидкість поширення полум'я, м/с; λ , с, P_0, T_0 – теплопровідність, теплоємність, тиск, температура газової суміші; R – універсальна газова стала, $R = 0,0821 \text{ дм}^3 \text{ атм}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ (або $8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$).

Якщо виразити T_0 у К, λ – у кал/м·с·К, c – у кал/моль·К, $u_{\text{н}}$ – у м/с, P_0 – у атм., $d_{\text{кр}}$ – у мм і R – у $\text{дм}^3 \cdot \text{атм}/\text{моль} \cdot \text{К}$, то середнє значення $Pe_{\text{кр}}$ для сумішей вуглеводнів з повітрям при конструюванні щілистих та засипних вогнеперешкоджувачів у випадку латунної та мідної сіток $Pe = 6,2$ (для сіток з нержавіючої сталі він буде меншим). Отже, критичний зазор у випадку мідної чи латунної сітки можна розрахувати за формулою: $d_{\text{кр}} = \frac{6,2 \cdot R \cdot T_0 \cdot \lambda}{u_{\text{н}} \cdot c \cdot P}$.

Теплоємність і теплопровідність суміші газів визначають як середньомасові для компонентів: $c = \frac{(\varphi_1 \cdot c_1 + \varphi_2 \cdot c_2 + \dots)}{100}$, $lg\lambda = \frac{(\varphi_1 \cdot lg\lambda_1 + \varphi_2 \cdot lg\lambda_2 + \dots)}{100}$, де φ – вміст і-го газу у суміші, %; c , λ – теплоємність та теплопровідність і-го газу, Дж/моль·К.

На практиці частіше користуються експериментальними методами визначення критичного зазору. Під час конструювання *насипних* вогнеперешкоджувачів проводять випробування поширення полум'я у певній горючій суміші за умов дослідження в стандартних трубах, заповнених металевими або керамічними сферами різного діаметра. Під час конструювання *сіткових* вогнеперешкоджувачів критичний зазор визначають шляхом дослідження можливості гасіння факела полум'я даної речовини або суміші шляхом серії випробувань з послідовним підбором сітки з різним діаметром комірки за умов різної швидкості потоку газу.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Визначити критичний вогнегасний зазор за умов використання вогнеперешкодження латунною сіткою.

Опис лабораторної установки

Установку призначено для експериментального визначення критичного вогнегасного зазору при горінні газоповітряної суміші за умов використання вогнеперешкодження проти проскоку полум'я сіткою.

Установка складається з: компресора (1); фільтра для очистки повітря (2); газового балону (3); перемикача газового балону (4); стандартного манометру (5); ресиверу для зберігання повітря (6); запірною вентиля ресивера (7); запірною вентиля зі шкалою для вимірювання витрат повітря (8); запірною вентиля зі шкалою для вимірювання витрат газу (9); вмикача компресора(10); пристрою для утворення суміші (11); пропанового сопла (12); пускового реле компресора (13); повітропровідного патрубку (13); газопровідного патрубку (15).

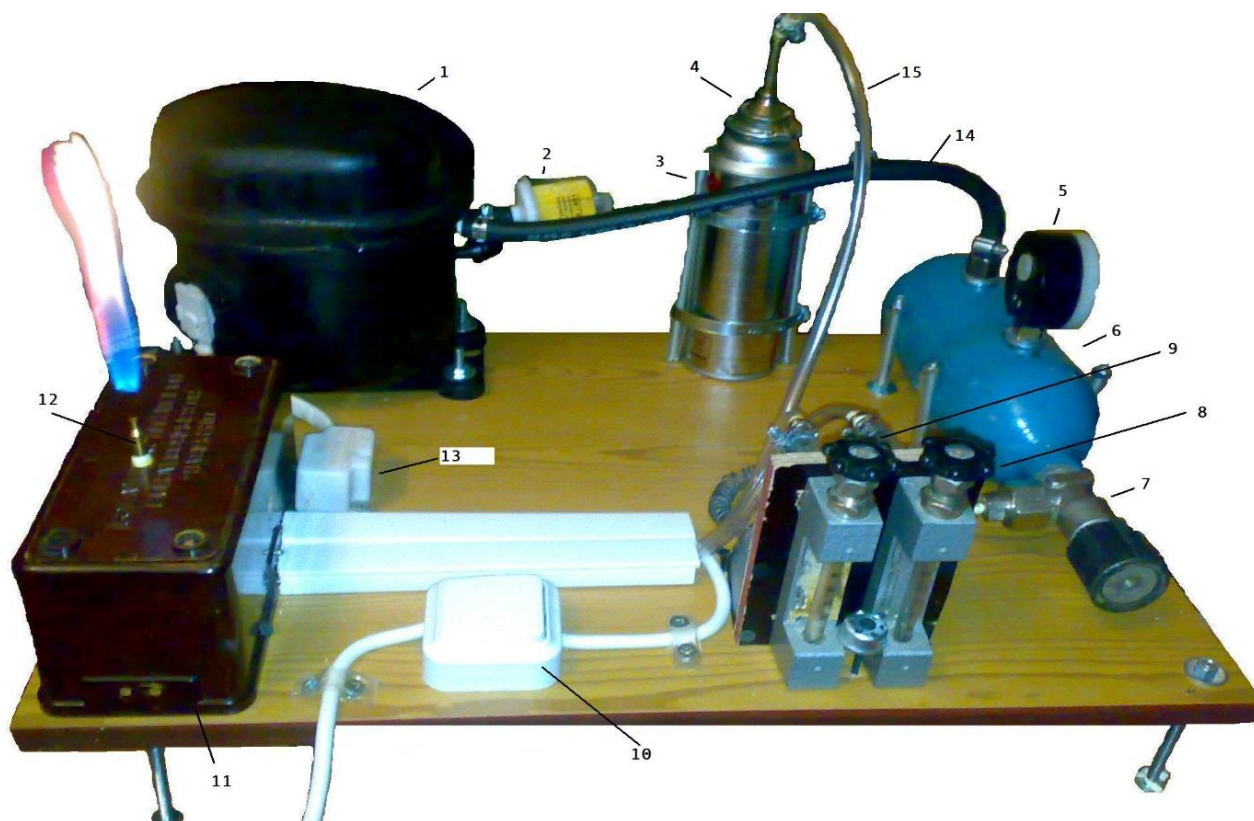


Рисунок 1.15 – Лабораторна установка для визначення критичного вогнегасного зазору за умов вогнеперешкодження сіткою

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення дослідів

У даній лабораторній роботі необхідно визначити критичний зазор для пропан-бутанової суміші за умов використання латунних сіток. Спочатку проводиться розрахункова оцінка даного параметру, що буде використано під час проведення дослідів для вибору сітки з певним діаметром комірки.

Під час проведення розрахунків для даної суміші приймаємо значення нормальної швидкості поширення полум'я $u_n = 0,43$ м/с; склад суміші, а також значення теплоємності та теплопровідності компонентів наведено у табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Теплофізичні характеристики компонентів горючої суміші

Газ	Вміст у суміші, мас.%	c , кал/моль·К	λ , кал/м·с·К
Повітря	84	6,97	$6,25 \cdot 10^{-3}$
Пропан	9	17,57	$6,57 \cdot 10^{-3}$
Бутан	7	23,29	$4,92 \cdot 10^{-3}$

Перед початком експерименту необхідно провести зовнішній огляд установки: цілісність установки; перевірити чи закриті всі запірні вентиля на установці; герметичність та міцність газової та повітряної ліній; цілісність патрубків та електричного дроту; міцність приєднання перемикача до газового балону. Металеві сітки не повинні бути пошкодженими.

Провести розрахунки теплоємності, теплопровідності суміші, критичного вогнегасного зазору:.

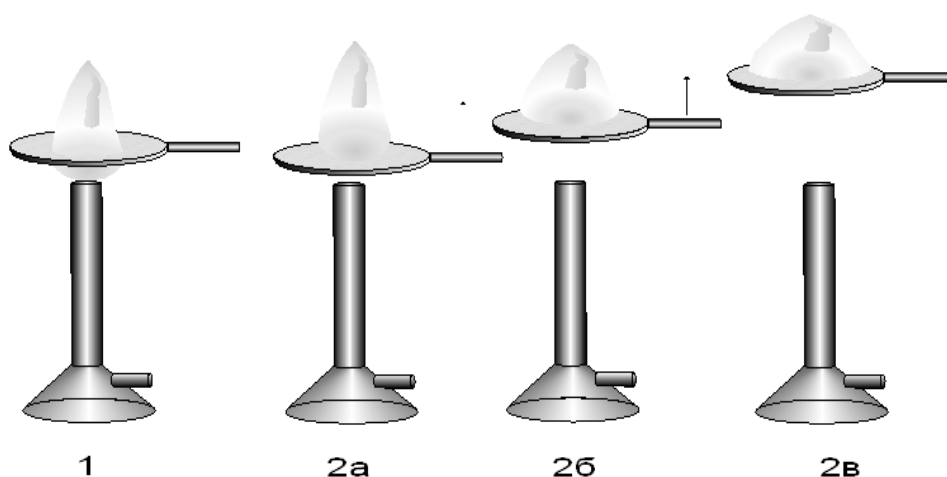
$$\text{теплоємність суміші газів: } c = \frac{(\varphi_1 \cdot c_1 + \varphi_2 \cdot c_2 + \dots)}{100} \text{ с, кал/моль}\cdot\text{К};$$

$$\text{теплопровідність суміші газів: } \lg \lambda = \frac{(\varphi_1 \cdot \lg \lambda_1 + \varphi_2 \cdot \lg \lambda_2 + \dots)}{100}, \quad \lambda = \dots \text{ кал/м}\cdot\text{с}\cdot\text{К};$$

$$\text{критичний вогнегасний зазор: } d_{\text{кр}} = \frac{6,2 \cdot R \cdot T_o \cdot \lambda}{u_H \cdot c \cdot P}, \text{ мм}$$

Проведення досліду

1. За допомогою компресора накачати в ресивер 5 атм. повітря.
2. Відкрити запірний вентиль ресивера з повітрям. Перемістити рукоятку газового балону з положення close в положення open.
3. Відкрити вентиль зі шкалою вимірювання витрат газу. Підпалити газ на виході з пропанового сопла.
4. Відкрити вентиль зі шкалою вимірювання витрат для повітря.
5. Відрегулювати полум'я вентилями з шкалами витрат так, щоб зазор між пропановим соплом і полум'ям складав 10-12 мм.
6. Заміряти лінійкою висоту факелу полум'я (мм).
7. Ввести у зону горіння між факелом полум'я і верхнім рівнем пропанового сопла металеву сітку з потрібним розміром комірки.
8. Повільно підіймати сітку угору від кромки пальника, немов відриваючи полум'я від пальника.
9. Повторити дослід 3 рази.



1 – є проскок полум'я; 2 – немає проскоку полум'я

Рисунок 1.16 – Можливі візуальні ефекти під час візуальної реєстрації проскоку полум'я крізь сітку

10. У разі наявності проскоку полум'я крізь сітку у наступному досліді обирають сітку з меншим діаметром комірки. У разі відсутності проскоку полум'я крізь сітку у наступному досліді обирають сітку з більшим діаметром комірки. Повторити дослід 3 рази з наступною сіткою.

11. Зафіксувати розміри сітки, які забезпечують відсутність проскоку полум'я та які не забезпечують; результати спостережень занести у таблицю.

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

с, кал/моль·К	λ, кал/м·с·К	Розрахований d _{кр} , мм	Розмір комірки сітки, мм				Похибка, мм / %
			0,450	0,400	0,160	0,063	

12. Розрахувати абсолютну та відносну похибку.

13. Порівняти значення критичного вогнегасного зазору для даної суміші газів, отримані за розрахунком та у досліді, розрахувати похибку розрахунку (у мм і %), Зробити висновок про значення критичного вогнегасного зазору для даної суміші газів за умови використання сіток, виготовлених з латуні.

Контрольні запитання

1. У чому полягає різниця між дефлаграційним і детонаційним горінням?
2. У чому полягає різниця між кінетичним і дифузійним горінням?
3. Яку товщину має фронт полум'я?
4. У якій зоні тиск найбільший: в зоні горіння, перед фронтом полум'я у свіжій суміші, за фронтом полум'я в продуктах горіння?
5. У якій зоні найбільша концентрація горючих речовин: в зоні горіння, перед фронтом полум'я у свіжій суміші, за фронтом полум'я в продуктах горіння?
6. Яке значення буде мати концентрація метану у продуктах горіння, якщо коефіцієнт надлишку повітря дорівнював 1,5?
7. Як пов'язані між собою нормальна і фактична швидкість поширення полум'я?
8. Які теорії пояснюють природу поширення полум'я, у чому полягає їх сутність?
9. Від яких факторів залежить швидкість поширення полум'я?
10. Як залежить швидкість поширення полум'я від діаметра труби, по якій воно розповсюджується?
11. Що називається критичного вогнегасного зазором і що називається безпечним зазором? Який з них має більшу величину?
12. Яке застосування знаходить явище критичного вогнегасного зазору в техніці?
13. Чим характеризується і коли спостерігається ламінарне полум'я?
14. Чим характеризується і коли спостерігається турбулентне полум'я?

1.7 Горіння рідин

Лабораторна робота ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ МЕЖ ПОШИРЕННЯ ПОЛУМ'Я РІДИН

Теоретична частина роботи

Для горіння рідин характерним є те, що температура їх кипіння завжди нижче за температуру самоспалахування. Внаслідок цього горіння рідин можливе тільки в паровій фазі. Згоряння пари, що утворилася, відбувається практично негайно після її утворення і змішування із навколишнім повітрям, тому швидкість горіння визначається лише швидкістю випаровування рідкої фази як найбільш повільним процесом.

Процес випаровування відбувається завдяки тепловому руху молекул рідини. Молекули, що мають кінетичну енергію більшу, ніж енергія міжмолекулярної взаємодії, долають сили поверхневого натягу рідини, вириваються з поверхневого шару рідини і переходять в газову фазу. При цьому витрачається певна кількість тепла, яка називається *теплотою випаровування* або *пароутворення*. Теплота випаровування залежить тільки від виду речовини. Цей параметр використовується для прогнозування аварійної ситуації (параметрів вибуху) при розливі рідин, а також при визначенні категорії приміщення за вибуховою і пожежною небезпекою. Рідини з низькою теплотою випаровування, прийнято називати *летючими рідинами*.

Процес випаровування характеризується наступними параметрами.

Швидкість випаровування – кількість рідини, що випарувалася з вільної поверхні в одиницю часу.

Інтенсивність випаровування – кількість рідини, що випарувалася з одиниці поверхні в одиницю часу. Інтенсивність випаровування залежить від: виду рідини (теплоти випаровування); початкової температури рідини; атмосферного тиску; швидкості руху повітря.

Чим менше теплота випаровування рідини, тим менше потрібно енергії для того, щоб перевести молекулу речовини із рідкого в газоподібний стан, а отже, тим інтенсивніше відбувається процес випаровування.

Чим вище температура рідини, тим більше швидкість руху молекул і тим більша кількість молекул має енергію, достатню для переходу в газову фазу.

Розрізняють статичне і динамічне випаровування. Статичне випаровування спостерігається, коли нерухома рідина випаровується у

нерухоме газове середовище, динамічне – у разі випаровування в газове середовище, яке рухається. Швидкість динамічного випаровування більше статичного за однакової температури.

Рідина може випаровуватися у відкритий або закритий простір. При випаровуванні в закритому просторі через деякий час встановлюється *динамічна рівновага* – стан системи, при якому кількість рідини, що випаровується, дорівнює кількості сконденсованої пари. Тобто скільки речовини випарується, стільки ж і перейде зворотно з газової фази в рідку. Відбувається насичення газової фази. Пару, що утворилася за динамічної рівноваги в системі, називають *насиченою*.

Якщо рідина знаходиться в незакритому об'ємі, то частина пари весь час дифундує в навколишній простір. При цьому кількість речовини, що випарувалася, буде більшою, ніж сконденсованої, динамічна рівновага не встановиться, пара буде *ненасиченою*, а випаровування буде тривати, поки вся рідина не випарується.

Молекули пари (насиченої і ненасиченої) мають певну кінетичну енергію, тому створюють тиск. Чим більше молекул знаходиться в пароподібному стані, тим більший тиск вони створюють. Кількість речовини, що випарувалася, а, отже, і тиск пари буде залежати від інтенсивності випаровування. Оскільки при збільшенні температури збільшується кількість рідини, що переходить в пароподібний стан, то зростають і концентрація пари і її тиск. За заданої температури *тиск насиченої пари* $P_{\text{нп}}$ (*парціальний тиск або пружність насиченої пари*) вище, ніж ненасиченої, оскільки при випаровуванні у відкритий простір частина пари рідини весь час буде дифундувати в довкілля.

Залежність між тиском і концентрацією насиченої пари описує співвідношення: $P_{\text{нп}} = \frac{\varphi_{\text{нп}} P_{\text{заг}}}{100}$, кПа, де $\varphi_{\text{нп}}$ – *концентрація насиченої пари*, %;

$P_{\text{заг}}$ – тиск у газовій системі над поверхнею рідини, кПа.

Тиск насиченої пари залежить від температури і властивостей рідини і не залежить від кількості рідини або площі її випаровування. Розрахувати тиск насиченої пари за даної температури можна за рівнянням Антуана: де $P_{\text{нп}}$ – тиск насиченої пари, кПа; A , B , C_a – константи Антуана [3]; t – температура рідини, °С.

Числові значення тиску насиченої пари використовуються під час розрахунку:

- кількості рідини, яка випарувалася і утворила пароповітряну хмару;

- температур для безпечного використання рідини в закритому обладнанні;
- під час визначення ступеню пожежної небезпеки насиченої пари горючих рідин.

Концентрація насиченої пари над поверхнею рідини пов'язана з температурою, що описує рівняння Антуана:

$$t = \frac{B}{A - \lg P_{\text{нас}}} - C_a = \frac{B}{A - \lg(0,01 P_{\text{заг}} \varphi_{\text{нас}})} - C_a, \quad ^\circ\text{C}.$$

За певних температур концентрація насиченої пари рідини дорівнює нижній або верхній концентраційній межі поширення полум'я (КМПП). Таким чином, пожежну небезпеку горючої рідини можна оцінювати не за концентрацією її пари, а за температурою самої рідини. Тому замість КМПП можна вказати температури рідини, за яких ці концентрації утворюється. Такі температури називають *температурними межами поширення полум'я* (ТМПП). Як і для КМПП, можна визначити нижню і верхню ТМПП рідини.

Температурні межі поширення полум'я (нижня або верхня) – це такі температури рідини, за яких над її поверхнею утворюється насичена пара в концентрації, рівній, відповідно, нижній або верхній концентраційній межі поширення полум'я, рис. 1.17.

За температур нижче нижньої температурної межі концентрація насиченої пари буде нижче нижньої концентраційної межі і, отже, буде безпечною.

За температури вище верхньої ТМПП рідина утворює насичену пару, яка в суміші з повітрям в закритому об'ємі загорітися не може, тобто кінетичного вибухового горіння не буде. Однак, якщо підпалити таку суміш насичених парів при виході з ємності у повітря, то вона може горіти в дифузійному режимі. Таким чином, така насичена пара є вибухобезпечною, але пожежонебезпечною.

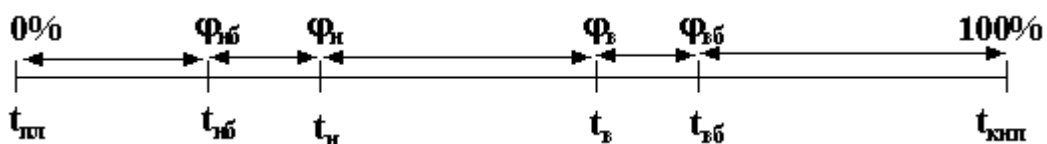


Рисунок 1.17 – Відповідність температурних меж поширення полум'я – концентраційним межим у температурному діапазоні існування рідкого стану

Для більшості рідин значення ТМПП знаходяться між температурами плавлення та кипіння. Але деякі речовини починають випаровувати у

вибухонебезпечних концентраціях ще з твердого стану (тобто – вони сублимують, наприклад: бензол, циклогексан тощо).

Температурні межі, так само як і концентраційні, не є постійними величинами і залежать від ряду чинників, основними з яких є: 1) потужність джерела запалювання; 2) концентрація окисника в окисному середовищі; 3) загальний тиск; 4) домішки негорючих парів і газів; 5) домішки негорючих рідин.

При збільшенні потужності джерела запалювання та концентрації кисню в окисному середовищі ТМПП розширюються (нижня межа зменшується, а верхня – зростає). Збільшення вмісту негорючих газів в паро-газовому середовищі (наприклад, введення в повітря вуглекислого газу) або домішки негорючих рідин до горючих звужують температурні межі поширення полум'я (нижня межа збільшується, верхня – зростає). При збільшенні загального тиску інтенсивність випаровування зменшується, а отже, зменшується концентрація пари. Тому для досягнення значень концентраційних меж потрібно збільшити інтенсивність випаровування за рахунок збільшення температури. Таким чином, при підвищенні загального тиску і нижня, і верхня температурні межі зростають. Тому, як і для газів, для горючих рідин існують характерні області концентрацій і температур та безпечні параметри експлуатації – *безпечні температурні межі*.

Тоді, як і для шкали КМПП (рис. 1.11), безпечними є температури зберігання, за яких концентрація пари є меншою за нижню безпечну ТМПП; вибухонебезпечними – якщо температура потрапила між нижньою і верхньою ТМПП; вибухобезпечними, але пожежонебезпечними, – якщо температура вища за верхню безпечну ТМПП; небезпечними за зміни зовнішніх умов – якщо температура знаходиться між нижньою безпечною і нижньою ТМПП, а також між верхньою безпечною і верхньою ТМПП.

Для забезпечення пожежної безпеки технологічних процесів з обертанням горючих рідин потрібно знати такі параметри, як ТМПП. Їх визначити можна як практично, провівши експериментальні дослідження, так і розрахунковим шляхом.

Методика експериментального визначення ТМПП передбачає випробування пари над поверхнею рідин на запалювання під час нагріву у температурному діапазоні існування рідкого стану [7].

Для розрахункового визначення ТМПП використовують декілька методів.

$$1. \text{ За рівнянням Антуана: } t_{H(B)} = \frac{B}{A - \lg(0,01P_{\text{заг}} \varphi_{H(B)})} - C_a, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2. За залежністю тиску насиченої пари від температури за методом

лінійної інтерполяції: $t_{н(в)} = t_1 + \frac{(t_2 - t_1)(P_{нпн(в)} - P_1)}{P_2 - P_1}$, °С, де t_1, t_2 –

температури рідини, °С; $P_{нпн(в)}, P_1, P_2$ – тиск насиченої пари, кПа, що

відповідає нижній або верхній КМПП, температурам рідини t_1, t_2 , який

розраховують за значенням КМПП, за формулою: $P_{нпн(в)} = \frac{\varphi_{н(в)} \cdot P_{заг}}{100}$, кПа,

значення P_1 і P_2 обирають за умовою: $P_1 < P_{нпн} < P_2$.

3. За значенням КМПП з використанням номограм, що описують попередній метод.

4. За будовою молекули для речовин: $t_{н(в)} = a_0 + a_1 t_{кип} + \sum a_j \cdot l_j$, °С, де a_0, a_1, a_j – коефіцієнти меж та хімічних зв'язків (додаток Є), l_j - число зв'язків j -го типу в молекулі речовини; $t_{кип}$ – температура кипіння рідини, °С.

5. За константами гомологічних рядів: $t_{н(в)} = k \cdot t_{кип} - l$, °С, де $t_{кип}$ – температура кипіння рідини, °С; k, l – константи для класів горючих рідин (додаток Ж).

6. Значення *нижньої і верхньої безпечної ТМПП* можна визначити за формулами:

$$t_{н,без} = 0,9(t_{н} - K_{без}) \quad (1.4)$$

$$t_{в,без} = 1,1(t_{в} + K_{без}) \quad (1.5)$$

де $K_{без}$ – коефіцієнт безпеки: для індивідуальних речовин і нафтопродуктів $K_{без} = 10,5$ °С; для технічних і реакційноздатих сумішей $K_{без} = 14$ °С.

Параметр ТМПП за сенсом дублює КМПП і для рідин є їх наслідком. Але використання ТМПП як показника пожежної небезпеки рідин значно спрощує визначення пожежної небезпеки, оскільки, на відміну від процесу вимірювання фактичної концентрації, не потребує застосування складних приладів.

Практичне значення ТМПП. На підставі значень ТМПП визначають:

- більш пожежонебезпечну рідину серед певного набору рідин;
- область вибухобезпечних температур під час експлуатації закритих ємностей: для забезпечення пожежної безпеки технологічних процесів: температурний режим роботи апаратів має бути таким, щоб робочі температури та концентрації пари знаходилися поза зоною небезпечних

областей; тобто – нижче нижньої безпечної або вище верхньої безпечної ТМПП: $t_{роб} < t_{нб}$ та $t_{роб} > t_{вб}$;

– ступінь пожежної небезпеки парів в ємностях і закритих технологічних апаратах за фактичної температури;

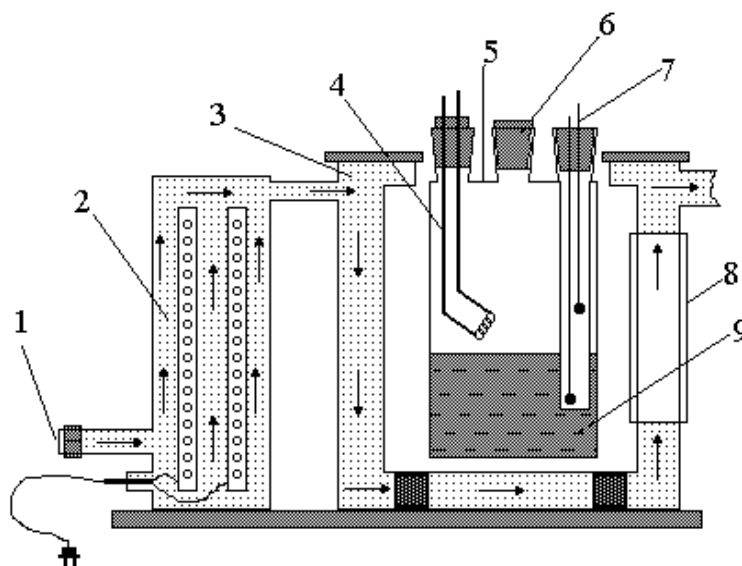
– найбільш вибухонебезпечний час року для зберігання рідини у закритій ємності за діапазоном ТМПП.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Визначити температурні межі поширення полум'я і ступінь небезпеки насиченої пари досліджуваної рідини за заданих умов.

Опис лабораторної установки

Для визначення дослідного визначення ТМПП використовують прилад ТМ-2.



1 – патрубок подачі повітря; 2 – трубчаста піч; 3 – повітряний термостат;
4 – електричне джерело запалювання; 5 – реакційна посудина; 6 – запобіжна пробка-клапан;
7 – термопара; 8 – оглядове віконце; 9 – досліджувана рідина

Рисунок 1.18 – Схема приладу ТМ-2 для визначення температурних меж поширення полум'я

Основою приладу є тригорла колба діаметром 65 мм, висотою 125 мм. В одну горловину вставлено дводіпазонну термопару (відстань між зонами вимірювання температур – 60 мм); у другу – джерело запалювання

(ніхромова спіраль із проволочки \varnothing 0,3 мм); у третю – запобіжний клапан для скидання тиску вибуху (*не щільно* розташована коркова пробка). Джерело живлення розігріває спіраль до 1000–1050 °С за 4–5 с. Для визначення ТМПП реакційну посудину розташовують або в охолоджувальну ванну, або у повітряний термостат (рис. 1.18), який має оглядове віконце для спостереження за можливим спалахом. Колба обдувається потоком гарячого повітря від електричного нагрівача ззовні термостату.

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення досліду

1. Приєднати електричну спіраль до джерела живлення, термопару до потенціометру. Перевірити роботу схеми вимірювання температури та вмикання запалювання.
2. Вставити джерело запалювання і термопару в отвори реакційної посудини, третю горловину нещільно прикрити корковою пробкою.
3. В залежності від розрахованих температурних меж поширення полум'я, підготувати до роботи термостат або охолоджувальну ванну.
4. Залити в колбу 70 мл досліджуваної рідини, помістити колбу в термостат.

Проведення досліду

Визначення нижньої ТМПП.

1. За допомогою термостату встановлюють температуру досліджуваної рідини на 10 °С менше розрахованого значення НТМПП.
2. Після встановлення заданої температури, очікують 15 хв для встановлення динамічної рівноваги між рідкою і газовою фазами. Різниця температур між рідкою і газовою фазами не повинна перевищувати 1 °С.
3. Проводять випробування на займання. Для цього подають живлення на джерело запалювання протягом 4–5 с. Включення спіралі на довший час може привести до її перегорання або до викривлення результатів досліду через прогрів та додаткове випаровування речовини. Фіксують візуальним спостереженням за оглядовим віконцем та корковою пробкою наявність «спалаху» або «відмови». Результати випробування заносять в лабораторний журнал.

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

№.	Температура, °С	Результат (спалах / відмова)

4. Незалежно від результату випробування, реакційну посудину продувають повітрям через отвір колби за допомогою гумового шлангу від компресора.

5. У разі «відмови» температуру рідини встановлюють на 5 °С вище, а при «спалаху» – на 5 °С нижче, і повторюють попередні операції вимірювання.

6. Знаходять два значення температур із різницею не більше 2 °С, при одному з яких відбувається «відмова», а при іншому «спалах». За отримане дослідним шляхом НТМПП приймають середнє значення не менше 3-х пар таких випробувань.

Визначення верхньої ТМПП.

7. Встановлюють температуру досліджуваної рідини на 10 °С вище розрахованого значення ВТМПП. Реакційну посудину продувають повітрям. Випробування проводять, як при дослідженні НТМПП.

8. У разі «відмови» температуру рідини встановлюють на 5 °С нижче, а при «спалаху» – на 5 °С вище. Випробування проводять, як при дослідженні НТМПП.

9. Знаходять два значення температур із різницею не більше 2 °С, при одному з яких відбувається «відмова», а при іншому «спалах». За отримані дослідним шляхом ТМПП приймають середнє значення не менше 3-х пар таких випробувань.

10. Після проведення досліду електричне живлення вимикають, температуру реакційної посудини доводять до кімнатної, досліджувану рідину зливають у ємність для зберігання.

Контрольні запитання

1. Випаровування рідин. Параметри випаровування.
2. Фактори, що впливають на інтенсивність процесу випаровування рідин.
3. Особливості випаровування рідин в закритий простір, насичена пара.
4. Температурні межі поширення полум'я. Вплив різних факторів на ТМПП.
5. Характеристика ступеня пожежної небезпеки на основі ТМПП.
6. Практичне значення ТМПП. Робочі температури технологічного процесу.
7. Експериментальні способи визначення ТМПП.

Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ СПАЛАХУ РІДИН В ЗАКРИТОМУ ТИГЛІ

Теоретична частина роботи

Виникнення горіння пари рідини від джерела запалювання може статися тільки тоді, коли концентрація пари досягне значення нижньої КМПП. Процес запалювання горючих рідин при випаровуванні у закритий та відкритий простір має відмінності. У закритому об'ємі при тривалому випаровуванні досягається *динамічна рівновага* між випаровуванням і конденсацією, утворюється насичена пара, пожежну небезпеку рідини визначають за ТМПП. При випаровуванні рідин у відкритий простір частина пари втрачається, динамічна рівновага не встановлюється, пара, що утворюється, є ненасиченою. Над поверхнею рідини концентрація пари поступово зменшується за висотою: безпосередньо над поверхнею вона дорівнює концентрації насиченої пари, а на деякій великій відстані – знижується до нуля. Ступінь пожежної небезпеки рідини, що випаровує у відкритий простір, залежить від інтенсивності випаровування, яку визначає природа речовини (теплота випаровування) і температура.

І на відкритому, і в закритому просторі при певній температурі досягається концентрація пари, що має значення нижньої КМПП, але на відкритому просторі така умова буде реалізується за дещо більших температур. Якщо до поверхні рідини, що випаровує у відкритий простір і утворила над своєю поверхнею таку концентрацію пари, піднести джерело запалювання, то пара спалахне.

Спалах – це швидке згоряння пароповітряної суміші з короткочасним світінням. Якщо за час згоряння не утвориться нова порція пари у кількості нижньої КМПП, то полум'я відразу згасне, відбудеться *однократний спалах*. Відповідну температуру рідини на відкритому просторі називають *температурою спалаху*. Для того, щоб за час згоряння пари утворилася нова аналогічна порція пари, температура рідини має бути на декілька градусів більшою за температуру спалаху. У цьому випадку виникне *стійке горіння*, рідина займається. Відповідну температуру рідини називають *температурою займання*. Займання для рідин завжди супроводжується появою полум'я, на відміну від твердих речовин, де можливе і тління.

Температура спалаху $t_{сп}$ – це найменша температура рідини, за якої в умовах спеціальних випробувань над її поверхнею утворюється пара,

здатна спалахувати в повітрі від джерела запалювання, але без стійкого горіння, оскільки $I_{\text{вип}} < I_{\text{виг}}$. Рідина, температура якої є нижчою за температуру спалаху, є пожежобезпечною у разі короточасного впливу джерела запалювання.

Температура займання – найменша температура рідини, за якої після дії джерела запалювання на пару виникає стійке горіння, оскільки вже $I_{\text{вип}} = I_{\text{виг}}$. Чим нижчою є $t_{\text{сп}}$ рідини, тим менше різниця між температурами займання і спалаху: для ЛЗР вона становить 1-5 °С, а для ГР ця різниця доходить до 35 °С.

За фактом досягнення нижньої КМПП температура спалаху та нижня ТМПП мають однакову небезпеку. Але, якщо рідина знаходиться у відкритій посудині, то частина пари буде весь час дифундувати у навколишній простір, і за тієї самої температури концентрація ненасиченої пари буде меншою, ніж насиченої. Тому для досягнення парою на відкритому просторі нижньої КМПП температура рідини має бути більшою за нижню ТМПП для збільшення інтенсивності випаровування і компенсації втрати пари за рахунок дифузії, рис. 1.19.

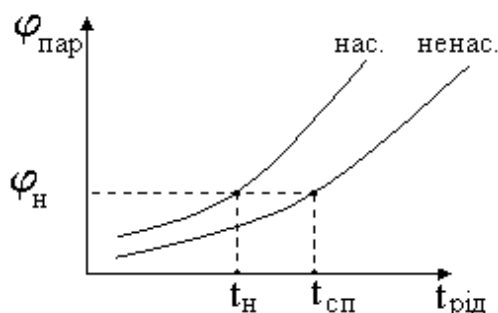


Рисунок 1.19 – Залежність концентрації насиченої і ненасиченої пари від температури рідини

Температуру спалаху взято за основу класифікації рідин за ступенем їх пожежної небезпеки. Залежно від $t_{\text{сп}}$ рідини поділяють на *легкозаймисті* (ЛЗР) та *горючі* (ГР). До горючих відносять рідини з $t_{\text{сп}}$ у закритому тиглі більше за 61 °С. Горючі рідини можуть спалахнути за короточасної дії джерела запалювання тільки за умов їх штучного нагріву. До легкозаймистих відносять рідини, що мають $t_{\text{сп}}$ у закритому тиглі 61 °С і нижче. Легкозаймисті рідини з $t_{\text{сп}}$ 28 °С і нижче відносять до особливо небезпечних рідин.

Температуру спалаху визначають як експериментально (в закритому і відкритому тиглі, на приладах ПВНЕ, Бренкена та ін.), так і

розрахунковим шляхом [3, 8]. Роль закритого тиглю полягає в тому, що на відміну від відкритого тигля пара під час накопичення не розсіюється в навколишній простір. Але в момент випробування у дослідній ємності відкривають віконце і випробують пару на запалювання ззовні. У відкритому тиглі для компенсації втрат пари його температура повинна бути більшою. Різниця може досягати десятків градусів.

Залежність величини $t_{\text{сп}}$ від умов викликає труднощі при створенні методу розрахунку. Тому різні методи дають дещо різні значення $t_{\text{сп}}$. Для розрахунку $t_{\text{сп}}$ індивідуальних рідин використовують наступні методики:

– за формулою Еллея, яка дає приблизний результат:
 $t_{\text{сп}} = t_{\text{кип}} - 18\sqrt{K_r}$, °С, де $t_{\text{кип}}$ – температура кипіння рідини, °С; K_r – коефіцієнт горючості Еллея: $K_r = 4C + H + 4S + N - 2O - 2Cl - 3F - 5Br$, де C, H, S, N, O, Cl, F, Br – число атомів даного виду в молекулі горючої речовини;

– за коефіцієнтами гомологічного ряду (додаток З): $t_{\text{сп}} = a + b t_{\text{кип}}$, °С, де a і b – константи гомологічного ряду; $t_{\text{кип}}$ – температура кипіння рідини, °С;

– за структурою речовини: $t_{\text{сп}} = a_0 + a_1 \cdot t_{\text{кип}} + \sum a_j \cdot l_j$, °С, де $a_0 = -73,14$ °С, $a_1 = 0,659$; a_j – коефіцієнти внеску структурних груп (додаток И), $t_{\text{кип}}$ – температура кипіння рідини, °С; l_j – число зв'язків j -го виду.

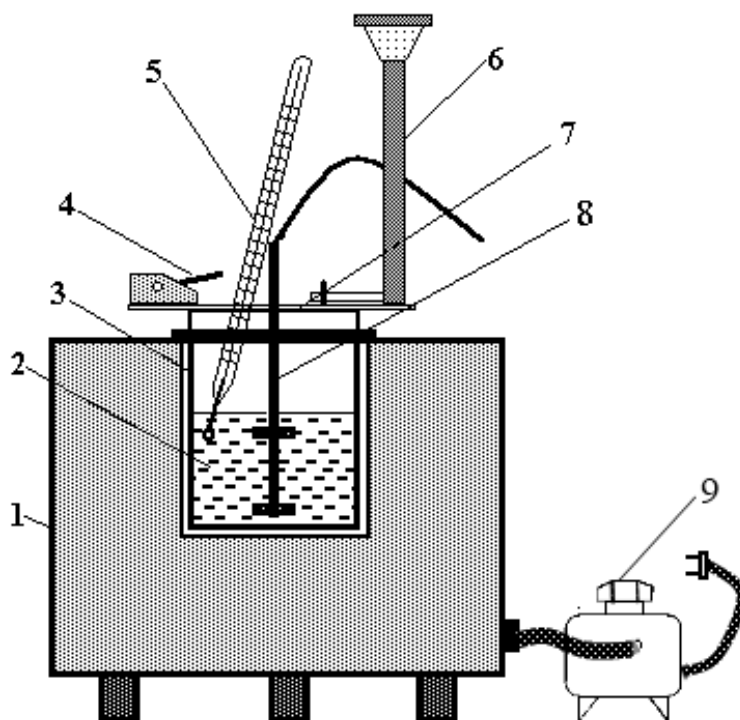
На практиці часто доводиться мати справу з сумішами рідин, які можуть бути утворені або лише з горючих рідин, або з горючих і негорючих. При змішуванні взаєморозчинних горючих рідин з негорючими температура спалаху суміші буде завжди вище за $t_{\text{сп}}$ горючої рідини в чистому стані. Для суміші двох горючих взаєморозчинних рідин $t_{\text{сп}}$ буде залежати від типу суміші. Якщо горючі рідини не утворюють азеотропної суміші, то температура спалаху такого розчину знаходиться між значеннями $t_{\text{сп}}$ чистих рідин, однак не підкоряється законам змішування, тобто змінюється не пропорційно вмісту компонентів. Навіть малі добавки ЛЗР до ГР можуть сильно збільшити пожежну небезпеку суміші, тобто зменшити $t_{\text{сп}}$. Азеотропні суміші можуть мати температуру спалаху нижче або вище температури спалаху чистих компонентів.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Встановити температуру спалаху в закритому тиглі і ступінь пожежної небезпеки досліджуваної рідини за заданої температури.

Опис лабораторної установки

Під час лабораторної роботи передбачається провести визначення температури спалаху рідини за допомогою приладу закритого типу ПВНЕ, рис. 1.20. Прилад призначено для визначення пожежної небезпеки рідин, що мають температуру спалаху у діапазоні 30 – 275 °С.



1 – нагрівальна піч; 2 – досліджувана рідина; 3 – латунний стакан; 4 – запалювальний пристрій; 5 – термометр; 6 – поворотний пристрій; 7 – кришка із засувкою; 8 – мішалка; 9 – лабораторний автотрансформатор

Рисунок 1.20 – Схема приладу ПВНЕ для визначення температури спалаху рідин у закритому тиглі

Досліджувану рідину поміщають в плоскодонний латунний стакан (тигель) з міткою за висотою, до якої слід наливати рідину, що залишає у стакані повітряний простір для накопичення пари рідини. Стакан має ручки для захвату та перенесення за допомогою рога. Зверху на латунний стакан надіта кришка, яка обладнана отвором з поворотною засувкою, запалювальною системою, мішалкою і гніздом для встановлення термометра. Стакан має пази на верхньому бортику для фіксованого розташування в посадочне місце нагрівальної печі.

Запалювальна система являє собою невеличку ємність для горючого мастила з «носиком», де можна запалити невеличке полум'я. У разі повертання ручки поворотного пристрою засувка кришки відкриває отвір, в

який автоматично опускається «носик» з гнітом (полум'ям). У такий спосіб випробується пара, яка накопичилася у закритому стані пристрою. Для досягнення очікуваної температури латунний стакан поміщають в нагрівальну піч, інтенсивність нагріву якої та температуру регулюють за допомогою автотрансформатора. Швидкість роботи мішалки в автоматичному режимі становить $90 \text{ об.} \cdot \text{хв}^{-1}$.

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення дослідів

1. Провести попередні розрахунки температури спалаху за формулою Еллея, за константами гомологічного ряду, за структурою молекули горючої речовини.

2. Згідно проведених розрахунків визначити ступінь та клас небезпеки досліджуваної рідини.

3. Перед початком проведення експерименту з визначення температури спалаху провести зовнішній огляд установки, перевіряють роботу поворотного механізму, чистоту поверхонь; діапазон роботи термометра повинен відповідати очікуваній температурі спалаху та не мати розривів у ртутному стовпчику; запалювальний пристрій має забезпечувати стійке полум'я.

4. Заповнити латунний стакан досліджуваною рідиною до мітки і вставити його в нагрівальну піч.

5. Закрити стакан кришкою. Вставити у гніздо кришки термометр, зафіксувати положення термометра гайкою. Заправити запалювальний пристрій горючим мастилом і запалити гніт (полум'я) сірником, електро- або газовою запальничкою з довгим носиком.

Проведення дослідів

1. Увімкнути нагрівальну піч; нагрівати досліджувану рідину з постійним перемішуванням. У разі випробування рідин з температурою спалаху до $50 \text{ }^\circ\text{C}$ нагрівання ведуть із швидкістю $1-1,5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{хв}^{-1}$, речовини із температурою спалаху більше $50 \text{ }^\circ\text{C}$ нагрівають із швидкістю $5-6 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{хв}^{-1}$. Випробування починають за температури на $10-17 \text{ }^\circ\text{C}$ нижче, ніж розрахована (довідкова або визначена в експрес-досліді). Речовини із температурою спалаху до $104 \text{ }^\circ\text{C}$ випробовують з інтервалом $1 \text{ }^\circ\text{C}$, інші – з інтервалом $2 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. У разі відсутності розрахункових або довідкових даних для рідини, що випробується, проводять попередню оцінку температури спалаху шляхом експрес-вимірювання. Нагрів здійснюють зі швидкістю $5-6 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{хв}^{-1}$. Кожні

4 °С випробують на запалювання пару, що утворюється над поверхнею рідини за допомогою обертання ручки поворотного пристрою. Потрібно зафіксувати найменшу температуру, за якої відбудеться спалах; прийняти її за орієнтовну температуру спалаху. Охолодити прилад до температури на 10-17 °С нижче.

3. Відкрити засувку на кришці латунного стакану та опустити гніт в отвір стакану за допомогою ручки поворотного пристрою. Через 2 с систему повертають у вихідне положення.

4. Якщо спалаху не сталося, вмикають мішалку і повторюють випробування на спалах після нагрівання речовини на 1 або 2 °С (за типом рідини). Випробування повторюють до тих пір, поки не станеться спалах. За ефект спалаху приймають температуру, яку показує термометр в разі появи полум'я над поверхнею отвору з проскоком повітряний простір стакану. За відповідної температури повторюють випробування ще 2 рази. Значення температури спалаху приймають як середнє значення трьох вимірювань.

5. Результати випробувань заносять у таблицю, фіксуючи температуру і результат випробування: «відмова» або «спалах».

Таблиця результатів дослідів (зразок оформлення)

№	Температура, °С	Результат (спалах/відмова)

6. Після проведення дослідів нагрівальну піч вимикають, латунний стакан із кришкою за допомогою рогаця витягують із печі і після охолодження рідину зливають в ємність.

7. Розходження між паралельними визначеннями температури спалаху для індивідуальних органічних рідин не повинне перевищувати 2 °С для $t < 50$ °С, 3 °С для $t > 50$ °С; 2 °С для нафтопродуктів з температурою спалаху до 104 °С і 6 °С – з температурою більшою за 104 °С.

8. Якщо атмосферний тиск ($P_{\text{атм}}$) відрізняється від стандартного (101,3 Па) більше ніж на 1,3 кПа, до знайденого у досліді значення температури спалаху застосовують поправку Δt : $\Delta t = 0,45 \cdot 10^{-6} (101325 - P_{\text{атм}})(273 + t_{\text{сп}})$; або у вигляді наближеного розрахунку: $\Delta t = 0,272 \cdot 10^{-3} (101325 - P_{\text{атм}})$.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняється спалах рідини від її спалахування?
2. Що називається температурою спалаху?
3. Які рідини відносяться до легкозаймистих?
4. Які явища сприяють поширенню полум'я по поверхні рідини?
5. По поверхні якої рідини полум'я буде поширюватися з більшою швидкістю і чому: по поверхні соняшникової олії чи по поверхні етилового спирту?

Лабораторна робота

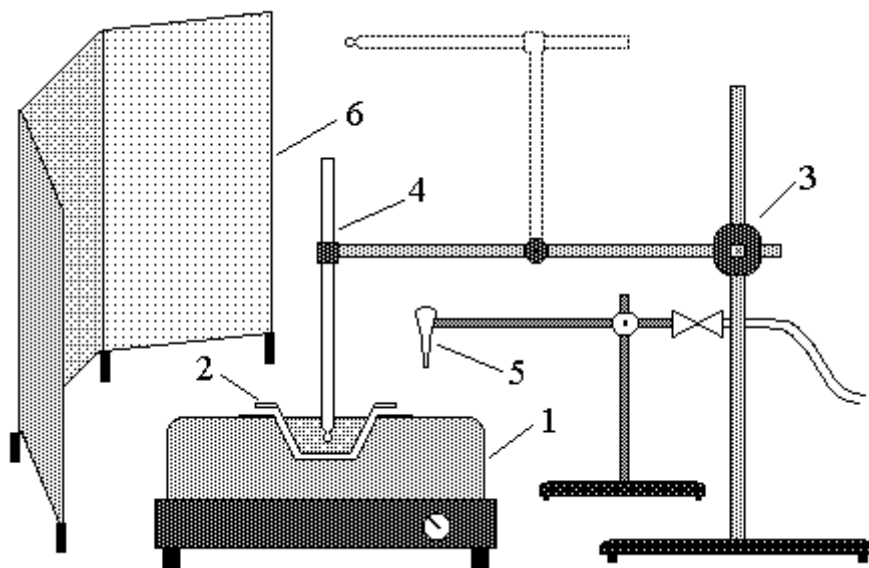
ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ СПАЛАХУ РІДИН У ВІДКРИТОМУ ТИГЛІ

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Встановити температуру спалаху в відкритому тиглі і ступінь пожежної небезпеки досліджуваної рідини за заданої температури.

Опис лабораторної установки

Установка для визначення температури спалаху у відкритому тиглі складається з нагрівальної печі, в посадочне місце якої розташовано тигель із внутрішнім покажчиком рівня заповнення досліджуваною речовиною. Швидкість нагріву печі повинна регулюватись в діапазоні $5-17\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{хв}^{-1}$. Термометр встановлено на штативі із поворотним пристроєм, що дає змогу вводити і виводити термометр із тигля за потреби. У якості джерела запалювання застосовано газовий пальник, що дає полум'я у формі сфери діаметром $4 \pm 0,5$ мм. Трисекційний екран встановлено для захисту процесу випаровування з тигля від потоків повітря.



1 – нагрівальна піч; 2 – тигель із досліджуваною рідиною; 3 – штатив; 4 – термометр;
5 – газовий пальник; 6 – екран

Рисунок 1.21 – Схема приладу для визначення температури спалаху у відкритому тиглі

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення дослідів

Провести попередній розрахунок температури спалаху за формулою Еллія. Згідно проведених розрахунків визначити ступінь небезпеки досліджуваної рідини.

Проведення дослідів

1. Встановити нагрівальну піч у затемненому місці (для полегшеної візуальної фіксації факту спалаху) та без помітного руху повітря.

2. Налити досліджувану речовину в тигель до мітки; тигель встановити на посадочне місце на піч; увімкнути нагрів.

3. Забезпечити швидкість нагріву $5-6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{хв}^{-1}$ для випробування рідин із очікуваною температурою спалаху до $79\text{ }^{\circ}\text{C}$, для інших – $14-17\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{хв}^{-1}$. Зменшити швидкість нагріву за $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ до очікуваної температури спалаху так, щоб з врахуванням теплової інерційності печі останні $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ до очікуваної температури спалаху швидкість нагріву становила $5-6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{хв}^{-1}$.

4. Зафіксувати по центру тигля термометр таким чином, щоб точка вимірювання температури знаходилась на відстані 6 мм від дна.

5. Запалити газовий пальник і встановити потрібний розмір полум'я.

6. Розпочати випробування на спалах по досягненні температури на 28 °С нижче очікуваної температури спалаху і повторювати кожні 2 °С.

7. Для проведення випробування пари на спалах рівномірно провести полум'ям газового пальника над поверхнею тигля в один бік від краю до краю, на відстані, не більшій 2 мм від краю тигля, за час не більше 1 с. Для наступного випробування газовий пальник проводять у зворотній бік. За температуру спалаху приймають температуру, яку показує термометр в момент появи полум'я над частиною чи всією поверхнею досліджуваної речовини.

8. Занести результати випробувань у таблицю; відмічати температуру і результат випробування: «відмова» або «спалах».

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

№	Температура, °С	Результат (спалах / відмова)

9. Після проведення досліду вимкнути нагрівальну піч і після охолодження злити рідину в ємність для зберігання.

Контрольні запитання

1. Фізико-хімічні процеси, що протікають при запалюванні рідин.
2. Температура спалаху і температура займання рідин, фактори, що впливають на ці температури.
3. Класифікація рідин за ступенем пожежної безпеки.
4. Механізм вигорання рідин. Масова швидкість вигорання рідин. Механізм утворення гомотермічного шару, спінювання, викид рідин з резервуара.
5. Параметри, що характеризують ступінь пожежної небезпеки рідин у відкритому та закритому просторі.
6. Дифузійне горіння рідин.

Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ МАСОВОЇ ШВИДКОСТІ ВИГОРЯННЯ РІДИН

Теоретична частина роботи

Під час горіння рідин на відкритому просторі полум'я може виникати на всій поверхні водночас – якщо температура рідини є більшою за температуру спалаху, або поширюватися від точки запалювання у горизонтальному напрямку по поверхні з певною швидкістю – якщо температура рідини є меншою за температуру спалаху. Одночасно з цими явищами починається прогрівання та вигоряння шарів рідини вглиб. Температура поверхні рідини під час вигоряння дорівнює температурі кипіння. Процес вигоряння горючої рідини у стані аварійного розливу або у ємності буде продовжуватись до повного вигоряння.

Після займання і поширення полум'я на всю поверхню рідини починається дифузійний режим вигоряння, який описують масовою і лінійною швидкостями вигоряння. *Масова швидкість вигоряння* v_m (інтенсивність вигоряння) – це маса рідини, що вигоряє за одиницю часу з одиниці площі поверхні, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$. Цей параметр використовують під час розрахунків теплоти та температури пожежі, критичного часу розвитку пожежі в огороженні.

Лінійна швидкість вигоряння (v_h) – це товщина шару рідини, що вигоряє за одиницю часу, $\text{см}/\text{с}$. Цей параметр використовують під час оцінки часу повного вигоряння рідини за відомого товщини її шару. Масова і лінійна швидкості вигоряння пов'язані між собою через густину рідини: $v_m = v_h \rho$.

Швидкість вигоряння рідини не є сталою величиною. Вона залежить від природи рідини та від умов масо- і теплообміну: від початкової температури, атмосферного тиску, діаметру резервуара або посудини, рівня наливання рідини відносно краю резервуара, швидкості вітру тощо.

Під час горіння індивідуальної рідини склад пари не відрізняється від складу рідини. Для суміш рідин за законом Коновалова газова фаза збагачується легкокиплячим компонентом, а у рідині його вміст зменшується; тому у першу чергу згоряють легкокиплячі фракції, поступово зростає густина рідини, в'язкість, температури спалаху та кипіння, а потім вже більш важкі фракції. Так йде вигоряння нафтопродуктів; для дизельного палива температура поверхні під час вигоряння зростає з 503 до 513 К, а для мазуту з 473 до 613 К.

Під час горіння суміші горючої рідини з водою є два варіанти розвитку подій: 1) якщо температура кипіння горючого компонента менша

за температуру кипіння води, то він випаровує більш інтенсивно, суміш поступово збагачується водою, в певний момент, горіння припиняється, суміш не догоряє; 2) якщо температура кипіння горючого компонента більша за температуру кипіння води, то горючий компонент випаровує менш інтенсивно, суміш поступово збагачується горючим компонентом та догоряє повністю без залишку.

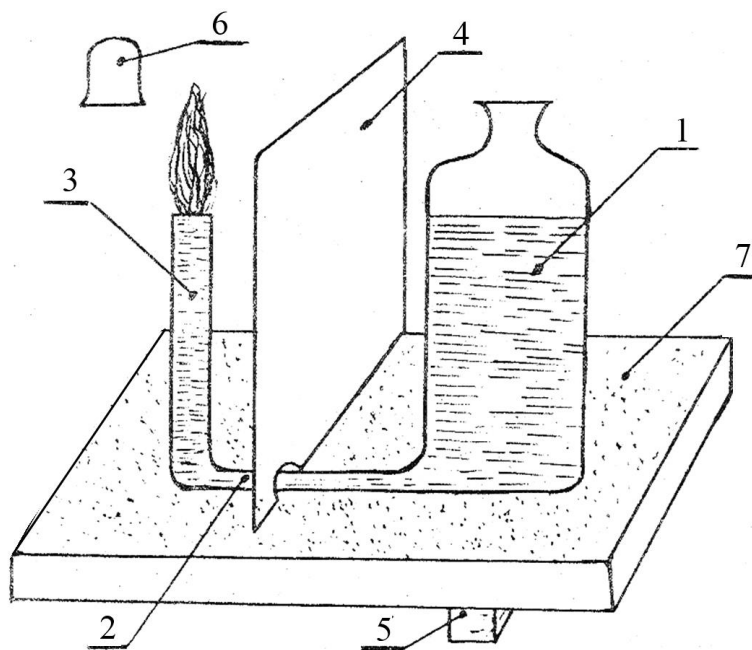
Точне визначення швидкості вигорання рідин проводять шляхом вільного горіння у модельному відкритому резервуарі діаметром 1,3–2,0 м. Однак цей метод потребує 100–200 л рідини для кожного досліду. В лабораторних умовах вимірюють зміну маси лабораторної модельної ємності з рідиною під час її горіння з врахуванням площі поверхні рідини.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Встановити масову швидкість вигорання досліджуваної рідини.

Опис лабораторної установки

Основною частиною установки з дослідження швидкості вигорання рідин є система сполучених посудів з термічно та хімічно стійкого скла, рис. 1.22. Дана система має резервуар ємністю 30–40 мл, який через перехідну трубку сполучено з вертикальним трубчатим пальником висотою 45 ± 2 мм, діаметром $10 \pm 0,2$ мм і товщиною стінки 1 мм. Перехідна трубка повинна бути вужчою, ніж пальник.



1 – резервуар; 2 – перехідна трубка; 3 – пальник; 4 – екран; 5 – підставка;
6 – ковпачок; 7 – деко з піском

Рисунок 1.22 – Установка для визначення швидкості вигорання рідин:

До складу установки входять: алюмінієвий екран, який розташовано між пальником та резервуаром для екранування від перегріву та запобігання займанню рідини в резервуарі; дерев'яна підставка для регулювання рівня рідини в пальнику (перед проведенням дослідів рівень рідини в пальнику має бути на 4,5 мм нижчим від верхнього краю пальника); металевий ковпачок для гасіння факела полум'я для призупинення або у разі закінчення дослідів; металевий деко із піском, у якому розташовують прилад під час проведення дослідів; ваги точністю 0,01 г для зважування приладу під час дослідження швидкості вигорання.

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення дослідів

1. Заміряти з точністю до 0,05 мм внутрішній діаметр пальника ($d_{\text{вн}}$) приладу.
2. Залити у резервуар 50–70 мм досліджуваної рідини до рівню на 3 мм нижче від верхнього краю пальника.
3. Зважити заповнений рідиною прилад на терезах.
4. Розташувати деко із піском у витяжну шафу; на пісок - прилад з рідиною й екран.

5. Точно відрегулювати підставкою рівень рідини в пальнику на 3 мм нижче від верхнього краю пальника.

Проведення досліду

1. Запалити рідину на пальнику.
2. Тримати горіння 3–10 хв., після чого нахилити пальник так, щоб частина рідини перетекла з нього в резервуар і рівень рідини в пальнику знизився.
3. Загасити пальник ковпачком. Витерти скляний прилад від піску.
4. Занести до таблиці значення діаметру пальника і досліджуваного об'єму рідини.
5. Зважити прилад на терезах із точністю до 0,02 г та занести результати зважування до початку та після закінчення досліду до таблиці.

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

Показник	Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3
Об'єм досліджуваної рідини, см ³			
Внутрішній діаметр пальника, мм			
Поверхня горіння, мм ²			
Маса приладу з рідиною до початку досліду, г			
Маса приладу з рідиною після досліду, г			
Маса рідини, що вигоріла, г			
Час горіння рідини, с			
Масова швидкість вигорання, г/мм ² с			

6. Занести до таблиці дані про час вигорання рідини.
7. Розрахувати і занести до таблицю значення маси рідини, що вигоріла, масової швидкості вигорання рідини. Сформулювати висновок.

Контрольні запитання

1. У скільки разів при проведенні вогневих робіт допустима вибухобезпечна концентрація речовини повинна бути меншою за нижню КМПП?
2. Чим відрізняється спалах рідини від її займання?
3. Що називається температурою спалаху?
4. Які рідини відносяться до легкозаймистих?
5. Що називається масовою швидкістю вигорання рідини?
6. Що називається лінійною швидкістю вигорання рідини?

7. Як зміниться склад суміші з 50 % метанолу (температура кипіння 65 °С) і 50 % додекану (температура кипіння 216 °С) після вигорання третини суміші?

8. Пояснити явища спінювання та викиду рідини при горінні нафтопродуктів.

1.8 Горіння твердих речовин та пилоповітряних сумішей

Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ПОШИРЕННЯ ПОЛУМ'Я ПО ПОВЕРХНІ ТВЕРДИХ ГОРЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ

Теоретична частина роботи

До твердих горючих матеріалів (ТГМ) відносять ті, які мають температуру плавлення або розкладання більше за 50 °С. З хімічної точки зору між горінням газоподібних, рідких та твердих матеріалів принципової різниці немає, оскільки основою процесу є швидка реакція окиснення. У разі полум'яного стаціонарного горіння ТГМ процес теж проходить у газовій фазі в дифузійному режимі так само, як і процес вигорання рідин або горіння газового факелу. Але ТГМ потребує для горіння більш складних та енергозатратних підготовчих процесів, ніж рідини, а тим більше газу. Для газів підготовчі процеси перед горінням передбачають необхідність сумішоутворення з окисником та нагрівання цієї суміші до критичної температури. Горіння рідин вимагає попереднього випаровування рідини, досягнення внаслідок дифузії пари вибухонебезпечних концентрацій у повітрі і, так само, нагрівання цієї суміші до критичної температури.

Для ТГМ існує декілька варіантів поведінки під час горіння. Всі ТГМ за поведінкою при нагріванні поділяють на два класи: 1) ті, що *газифікуються* (утворюють над поверхнею горючу газову фазу); *безгазові* (не утворюють над поверхнею газову фазу). До безгазових ТГМ відносяться: металургійний кокс, деревинне вугілля, антрацити, нелеткі метали, термітні суміші тощо. Ці речовини горять гетерогенно, тобто реакція окиснення проходить на поверхні.

Переважає більшість ТГМ відноситься до тих, що газифікуються, але вони також мають різну поведінку при нагріванні, тому їх поділяють на дві великі групи залежно від того, який процес обумовлює перехід у газоподібний стан.

ТГМ, які газифікуються через етап утворення рідкої фази (плавляться за умов нагрівання), відносять до ТГМ першого роду (ТГМ-1); процес їх горіння є схожим на горіння рідин і протікає тільки в гомогенному режимі (у вигляді полум'я). Більшу подібність до горіння рідин мають такі ТГМ-1, як парафіни, летючі метали тощо. Поліетилен та інші пластмаси, що плавляться, мають надто велику молекулу для переходу у пароподібний стан; тоді за умов нагрівання вони розкладаються з утворенням лише газоподібних продуктів. Плавлення ТГМ супроводжується розтіканням та краплепадінням, що поширює пожежу.

Інші ТГМ газифікуються шляхом сублімації або термічного розкладання (термодеструкція, піроліз) молекул без переходу в рідкий стан; їх відносять до ТГМ другого роду (ТГМ-2). ТГМ-2, що сублімують горять лише гомогенно. ТГМ-2, що розкладаються, можуть горіти як в гомогенному режимі для газоподібних продуктів розкладання, так і в гетерогенному – шляхом окиснення по поверхні твердого карбонізованого залишку, у вигляді жару або тління.

Як зазначалося, виникнення і розвиток горіння ТГМ, що газифікуються, є подібним до процесів горіння газів і рідин (для запалювання безгазових ТГМ необхідно лише нагріти їх до температури прискорення гетерогенного окиснення). Однак, крім спільних рис, існує ряд особливостей, зумовлених конденсованим станом і відмінностями у будові. Так, якщо горіння газів і рідин відбувається лише в гомогенному режимі, то горіння ТГМ може протікати за гомогенним, гомогенно-гетерогенним або тільки за гетерогенним механізмом.

За умови дії на ТГМ, що газифікуються, *джерела запалювання* протікають послідовні процеси протягом наступних етапів:

1. Попередній нагрів поверхневого шару до температури початку фізико-хімічних перетворень (плавлення або термічне розкладання ТГМ різної хімічної природи починається за різних температур, протікає з різною інтенсивністю, йде з поглинанням енергії і зміною хімічної структури) та випаровування вологи (за наявності); тривалість етапу – до 80 % часу займання; здатність матеріалу чинити опір нагріву без зміни хімічної структури називається *термічною стійкістю матеріалу* (за часом займання);

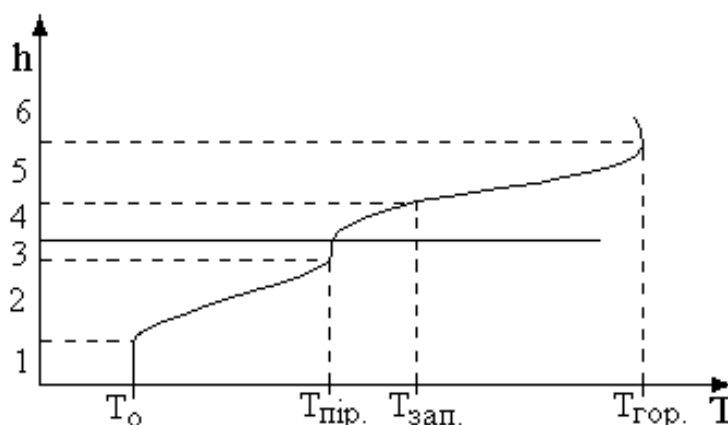
2. Подальший нагрів ініціює та інтенсифікує фізико-хімічні перетворення з виділенням летючих продуктів (плавлення та нагрів розплаву до температури кипіння або розкладання для ТГМ-1; піроліз або сублімація для ТГМ-2);

3. Утворення горючої газоповітряної суміші в момент накопичення летючих продуктів над поверхнею ТГМ у кількості нижньої КМПП;

4. Нагрів газоповітряної суміші до температури запалювання $T_{\text{зап}}$;

5. Запалювання газоповітряної суміші у кінетичному режимі (спалах або вибух) із подальшим дифузійним полум'ям горінням на поверхні ТГМ, утворюється фронт полум'я, де виділяється основна частка теплової енергії, спостерігаються максимальна температура і світлове випромінювання.

Таким чином, горіння ТГМ, що газифікуються, як і для рідин починається з гомогенного режиму, має високу швидкість поширення, потужні конвекційні та променисті потоки. Але при горінні рідин тепловий потік полум'я йде лише на нагрів поверхні та випаровування, а для ТГМ-1 необхідні додаткові витрати на плавлення та розкладання. Під час поширення полум'я по поверхні можна виділити температурні зони, рис. 1.23, де йдуть описані етапи змін у ТГМ.



T_0 , $T_{\text{пір.}}$, $T_{\text{зап}}$, $T_{\text{гор}}$ – температури початкова, піролізу, запалювання, горіння;
1 – вихідний матеріал; 2 – етап 1; 3 – етап 2; 4 – етапи 3 та 4; 5 – етап 5;
6 – зона змішування продуктів горіння з повітрям, де вони охолоджуються

Рисунок 1.23 – Розподіл температури у зразку ТГМ і над його поверхнею під час горіння

Існує *час займання* – від початку дії джерела запалювання на горючу речовину до появи горіння. Для ТГМ, що газифікуються, він визначається швидкістю утворення над поверхнею матеріалу летючих горючих компонентів в концентрації, що перевищує нижню КМПП. Час займання включає в себе час, який витрачається на нагрів зразка до температури початку газифікації $\tau_{\text{нагр}}$ і час протікання газифікації $\tau_{\text{газиф}}$ до моменту

досягнення критичної концентрації горючих газоподібних продуктів розкладання φ_n : $\tau_{\text{займ}} = \tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{газифік}}$.

Кількість і склад летючих продуктів залежить від виду ТГМ, часу теплового впливу джерела запалювання і його потужності. Чим більша інтенсивність теплового впливу, тим швидше йде процес піролізу, вище інтенсивність виділення летючих речовини, отже, менше час займання.

Після запалювання ТГМ від місця дії джерела запалювання відбувається переміщення фронту полум'я по поверхні матеріалу. Поширення горіння протікає за рахунок передачі тепла від полум'я до сусідніх ділянок ТГМ за механізмами випромінювання, конвекції і теплопровідності. Співвідношення їх внеску у прогрів ТГМ залежить від умов горіння. Тому швидкість поширення полум'я по поверхні ТГМ сильно залежить від умов горіння. Кількісною характеристикою поширення полум'я по поверхні, як і для рідин, є *лінійна швидкість поширення полум'я* v_l – відстань, яку проходить фронт полум'я за одиницю часу.

Швидкість поширення полум'я по поверхні ТГМ визначають фактори:

- хімічна природа (фізико-хімічні властивості, густина, термічна стійкість, кількість та інтенсивність утворення летючих горючих продуктів);
- особливості ТГМ (насипна щільність у подрібненому стані, пористість, кількість повітря у порах, а також – властивості матеріалу підкладки);
- вологість матеріалу;
- орієнтація зразка в просторі;
- швидкість і напрям повітряних потоків;
- початкова температура матеріалу;
- геометричні розміри зразка (фізична товщина, ступінь подрібнення).

Зі збільшенням вологості матеріалу лінійна швидкість поширення полум'я v_l знижується внаслідок збільшення втрат тепла на випаровування вологи, що уповільнює процес розкладання. Для матеріалів рослинного походження стадія сушки є найбільш тривалою і досягає 55 % часу запалювання. У разі вологості 14 % полум'яне горіння деревини припиняється.

На відміну від рідин поверхня ТГМ може знаходитися під різними кутами нахилу, відповідно змінюється і швидкість поширення полум'я. При зростанні від'ємних кутів нахилу (рух полум'я зверху вниз) швидкість

поширення полум'я слабо зменшується. При збільшенні додатних кутів нахилу (рух полум'я знизу вгору) понад 15° швидкість поширення полум'я різко зростає. Це пояснюється збільшенням густини теплового випромінювання від зони горіння до поверхні ТГМ та додавання прогріву за механізмом конвекційної теплопередачі.

Слабкий вітер у будь-якому напрямку прискорює полум'я внаслідок інтенсифікації надходження повітря (кисню); відбувається більш інтенсивне змішування горючих продуктів піролізу (випаровування) з окисником, швидше відбувається утворення горючої суміші, що прискорює поширення полум'я.

При збільшенні швидкості *вітру в напрямку поширення полум'я* швидкість полум'я зростає, що працює схожим чином до додатного кута нахилу: полум'я нахилиється та наближується до поверхні ТГМ.

При збільшенні швидкості *вітру проти руху полум'я* більше за $4 \text{ м}\cdot\text{хв}^{-1}$ полум'я відхиляється від поверхні холодного ТГМ (зменшується інтенсивність прогрівання), інтенсифікується охолодження поверхні перед фронтом полум'я, v_l буде знижуватися аж до зриву полум'я.

Суттєво впливає на v_l товщина зразка. Розрізняють *термічно товсті* і *термічно тонкі зразки* залежно від співвідношення фізичної і термічної товщини. (товщина прогрітого шару ТГМ на момент поширення горіння на цю ділянку). Якщо фізична товщина більше термічної, то зразок називають *термічно товстим* (не встигає прогріватися наскрізь), якщо менше – *термічно тонким* (встигає прогріватися наскрізь). Збільшення товщини термічно тонких зразків знижує v_l внаслідок додаткових тепловтрат вглиб на прогрівання нових шарів матеріалу. Для термічно товстих зразків v_l не залежить від їх товщини.

Відмітною особливістю горіння ТГМ є наявність умов, за яких поширення горіння може припинитися внаслідок значної енергоємності підготовчих процесів, які протікають під час запалювання. Більшість матеріалів рослинного походження у вигляді термічно товстих зразків на повітрі за нормальної температури не здатні до самостійного поширення полум'я (для паперу товщиною більше $0,7 \text{ мм}$ поширення горіння зверху вниз вже не відбувається).

Одночасно з поширенням полум'я по поверхні ТГМ починається вигорання вглиб. Визначають лінійну та масову швидкість вигорання: *лінійна швидкість* (v_h) – це товщина шару, що вигоряє за одиницю часу, $\text{см}/\text{с}$; *масова швидкість* (v_m) – це маса ТГМ, що вигоряє в одиницю часу з одиниці поверхні, $\text{кг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$; вони пов'язані через густину: $v_m = v_h \rho$.

На відміну від рідин в ТГМ площа поверхні горіння є більшою за площу розташування пожежі, оскільки горять й бокові поверхні. Тому визначають коефіцієнт поверхні: $K_{\text{п}} = F_{\text{п.г.}}/F_{\text{п}}$, $F_{\text{п.г.}}$ – площа поверхні горіння; $F_{\text{п}}$ – площа пожежі. Для ТГМ $K_{\text{п}} > 1$, а для рідин $K_{\text{п}} = 1$. Тоді масова швидкість вигорання ТГМ зростає у відповідну кількість разів: $v_{\text{м}} = v_{\text{м}}^{\circ} K_{\text{п}}$.

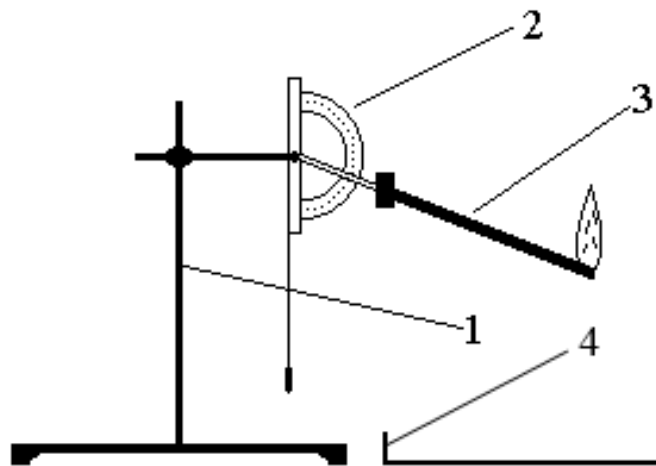
Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Дослідити залежність лінійної швидкості поширення полум'я по поверхні ТГМ від кута нахилу зразка.

Опис лабораторної установки

Визначення швидкості поширення фронту полум'я по поверхні ТГМ проводять на установці, яка складається з лабораторного штативу з лапкою і кутомірного пристрою із затискачем для зразків досліджуваного матеріалу.

На установці можна вимірювати швидкість поширення полум'я по поверхні ТГМ, в залежності від виду матеріалу, величини питомої поверхні зразка, кута нахилу, вологості, температури та інших факторів.



1 – лабораторний штатив; 2 – кутомір із затискачем (лапкою); 3 – зразок досліджуваного матеріалу; 4 – деко для залишків ТГМ після горіння

Рисунок 1.24 – Схема лабораторної установки для дослідження лінійної швидкості поширення полум'я по поверхні ТГМ

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення досліду

1. Для дослідження беруть соснові бруски однакового розміру з поперечним перетином до 8×8 мм і довжиною до 150–200 мм; або смужки картону аналогічної довжини.
2. Зразки деревини потрібно попередньо висушити у сушильній шафі за температури 120 °С протягом 2-х годин.
3. На підготовлених зразках нанести риски на відстані 2 см від кінців: для закріплення у затискачі та для розпалювання.
4. Середню частину зразка поділити на три рівні відрізки.
5. Кути нахилу для дослідження окремими слухачами задає викладач; передбачається отримати зі зведених даних загальну залежність зміни швидкості поширення полум'я від кута нахилу зразка.
6. Розташувати під затискачем деко.

Проведення досліду

1. Зразок деревини встановити в куті на заданий кут і закріпити затискачем.
2. За допомогою газового пальника запалити зразок з вільного кінця.
3. Після проходження фронтом полум'я нульової точки (2 см від вільного краю зразка) увімкнути секундомір і заміряти час проходження фронтом полум'я кожної ділянки досліджуваного зразка.
4. Недопалки викидати у відро із водою.
5. Дослід повторити із іншими заданими кутами нахилу.
6. Розрахувати швидкість поширення полум'я по кожній ділянці і середню швидкість поширення полум'я по поверхні зразка. Побудувати графік залежності швидкості поширення полум'я по поверхні даного твердого горючого матеріалу при даному куті нахилу від часу горіння.
7. Результати занести в таблицю результатів досліду.

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

№	Кут нахилу, град	Довжина ділянки, см	Час проходження фронтом полум'я ділянки, с			Швидкість поширення горіння на ділянці, см·с ⁻¹			Середня швидкість, см·с ⁻¹

8. На основі результатів дослідів групи для різних кутів нахилу зразка скласти зведену таблицю для значень середньої швидкості поширення полум'я і побудувати графік залежності швидкості поширення полум'я від кута нахилу зразка. Методом дотичних (до початкової та кінцевої точки

графіку) встановити кут, починаючи з якого до механізму прогріву зразка ТГМ тепловим випромінюванням під час поширення полум'я додається конвекційний теплообмін.

9. Зробити висновок про вплив матеріалу зразка і кута його нахилу на швидкість поширення полум'я.

Контрольні запитання

1. За якими механізмами може відбуватися горіння твердих речовин? Навести приклади.

2. З яких основних речовин складається деревина?

3. За якої температури починається піроліз деревини (геміцелюлози) з виділенням негорючих газів?... горючих газів?

4. За якої температури починається розкладання головної складової деревини – целюлози?

5. Які стадії проходять при нагріванні термопласти?

6. Що приймається за температуру займання твердої речовини?

7. Який механізм горіння реалізується під час тління?

8. Як класифікують метали за режимом горіння виходячи зі співвідношення їх температури кипіння та температури плавлення їх оксидної плівки?

9. Чи буде утворюватися дим під час горіння горінні алюмінієвої пудри?

10. Від яких факторів залежить швидкість поширення полум'я по поверхні твердої речовини?

11. Чому по вертикальній поверхні (вгору) полум'я поширюється швидше, ніж по горизонтальній?

12. Що таке термічно тонкий матеріал?

13. Як співвідносяться між собою і в яких одиницях вимірюються лінійна і масова швидкість вигорання твердого матеріалу?

14. Чим відрізняються поняття «поверхня горіння» і «площа пожежі»? Що таке коефіцієнт поверхні?

Лабораторна робота

ВИЗНАЧЕННЯ ГРУПИ ГОРЮЧОСТІ ТВЕРДИХ РЕЧОВИН І МАТЕРІАЛІВ

Теоретична частина роботи

Важливою складовою запобігання виникненню та розвитку надзвичайних ситуацій є підтримання пожежної безпеки на виробництві та в побуті. Пожежна небезпека – це можливість виникнення та розвитку пожежі, що залежить від агрегатного стану речовини, умов у середовищі. Речовини та матеріали, властивості яких сприяють виникненню або розвитку пожеж, відносять до пожежонебезпечних.

Під час визначення пожежонебезпечності речовин і матеріалів виділяють чотири *агрегатні стани*. До *газів* відносять речовини, тиск насиченої пари яких за стандартних умов (25 °С, 101,3 кПа) перевищує 101,3 кПа та критична температура яких < 50 °С або тиск насиченої пари за температури 50 °С більше за 300 кПа. До *рідин* відносять речовини, тиск насиченої пари яких за стандартних умов < 101,3 кПа, а температура плавлення або краплепадіння яких < 50 °С. До *твердих* відносять речовини з температурою плавлення, краплепадіння або розкладання > 50 °С, а також ті, що не мають цих температур (карбонізовані залишки ТГМ та інші). До *аерозолів* відносять дисперговані у повітрі тверді речовини, а також рідини, з розміром частинок < 850 мкм.

Виділяють 4 групи показників пожежонебезпечності речовин залежно від агрегатного стану: 1) показники горючості; 2) показники схильності речовин до самозаймання або займання від джерела тепла; 3) показники здатності речовини до поширення полум'я та утворення вражаючих наслідків горіння (утворення диму, токсичних продуктів горіння тощо); 4) показники засобів пожежогасіння.

Показник горючості визначають для речовин у будь-якому стані; речовини і матеріали поділяють на три групи: 1) *негорючі* – не здатні горіти на повітрі, але серед них є пожежо- та вибухонебезпечні – окисники (калію перманганат, нітратна кислота тощо), речовини, що виділяють горючі продукти під час реакцій з водою, одна з одною або іншими сполуками (кальцію карбід з водою, азот з металами за нагрівання тощо), вибухонебезпечні (які не здатні горіти, але можуть розкладатися з вибухом); 2) *важкогорючі* – здатні горіти в повітрі разом з іншими речовинами або за умов безперервної дії джерела запалювання, але вони не здатні горіти

самостійно; 3) *горючі* – здатні самозайматися, самоспалахувати, займатися під впливом джерела запалювання та надалі самостійно горіти.

Горючість визначають розрахунковими та експериментальними методами. Розрахункові – дають орієнтовне значення показника. Більш точні дані отримують шляхом випробувань. Горючість речовин може змінюватися залежно від умов: температури, тиску, концентрації окисника в окисному середовищі тощо. Встановлення групи горючості застосовують під час класифікації речовин і матеріалів за горючістю, визначення категорії приміщень за вибухо- та пожежонебезпечністю, розробці заходів щодо забезпечення пожежної безпеки.

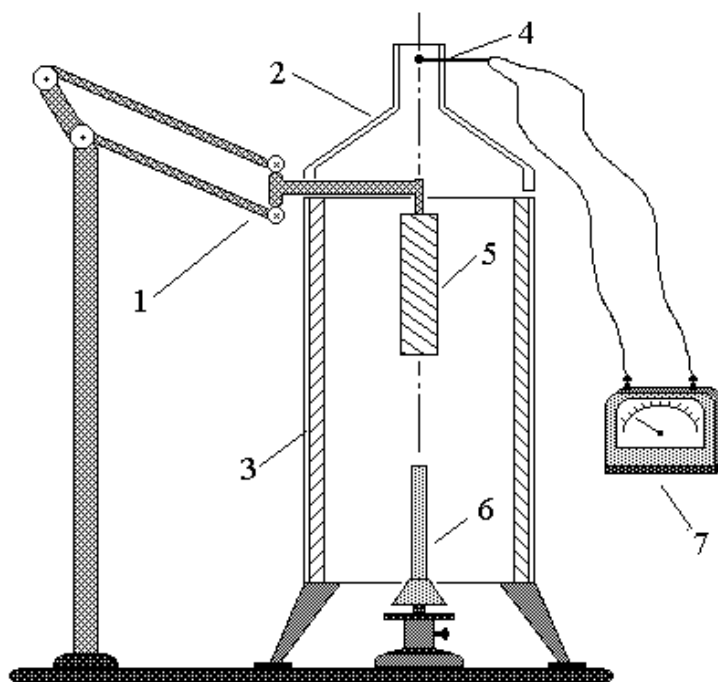
Горючість за повною методикою визначають шляхом послідовного визначення можливості віднесення матеріалу до горючих, важкогорючих, негорючих. Найпростішим методом оцінки горючості є метод вогневої труби.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Визначити групу горючості для твердих матеріалів за поведінкою під час нагрівання.

Опис лабораторної установки

Метод керамічної труби є методом випробування твердих неплавких матеріалів для визначення групи горючості: горючі, важкогорючі або негорючі. Головним елементом установки є керамічна реакційна камера прямокутної форми (88×88 мм в основі, висотою 295 мм), встановлена на підставці.



1 – тримач зразка; 2 – зонтик; 3 – реакційна камера; 4 – термопара; 5 – досліджуваний зразок; 6 – газовий пальник; 7 – мілівольтметр

Рисунок 1.25 – Схема лабораторної установки для визначення групи горючості твердих неплавких матеріалів:

Внутрішня поверхня реакційної камери (керамічної труби) покрита алюмінієвою фольгою в два шари. В нижній частині реакційної камери встановлено газовий пальник з діаметром отвору 7,0 мм. Досліджуваний матеріал за допомогою тримача розташовують у верхній частині по центру реакційної камери. Зверху камера прикрита зонтом, у центрі якого закріплено термопару для реєстрації температури газів, що виходять. Спрощеним варіантом методу є метод вогневої труби.

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення дослідів

1. Для випробування готують зразки матеріалу довжиною 60 мм, висотою 150 мм і фактичною товщиною не більше 30 мм.
2. До проведення випробувань зразки витримують у сушильній шафі за температури 60 °С протягом доби, охолоджують, не виймаючи із шафи.
3. Перед проведенням дослідів зразки зважують із похибкою не більше $\pm 0,1$ г.

Проведення дослідів

Дослід 1. Метод керамічної труби

1. Закріпити зразок матеріалу вертикально в тримачі.
2. Запалити газовий пальник, відрегулювати витрату газу таким чином, щоб температура газів, що виходять протягом 3-х хвилин, становила 200 ± 5 °С.
3. Підняти зонт; розташувати зразок досліджуваного матеріалу по центру реакційної камери; опустити зонт.
4. Якщо під час випробування температура газів не перевищує 260 °С, випробування проводять протягом 5 хв. Фіксувати температуру газів, що виходять через зонт.
5. Після завершення випробування вимкнути пальник.
6. Після охолодження досліджуваного зразка до кімнатної температури взяти його з реакційної камери та зважити із похибкою не більше $\pm 0,1$ г.
7. Якщо під час випробування температура газів перевищує 260 °С, випробування проводять до досягнення максимальних значень температури газів, що виходять через зонт; реєструють час її досягнення.
8. Завершують дослід відповідно до п. 5 та 6.
9. Результати випробувань заносять в таблицю.

Таблиця результатів дослідів (зразок оформлення)

№	Матеріал зразка	Максимальна температура, t_{\max} , °С	Час досягнення t_{\max} , τ , с	Маса зразка, г	
				вихідна, $m_{\text{п}}$	після дослідів, $m_{\text{к}}$

10. Після кожного випробування очищують від сажі спай термопари (точка, якою вимірюють температуру).

11. Розрахувати величину максимального приросту температури під час випробувань: $\Delta t_{\max} = t_{\max} - t_0$, °С, де t_{\max} – максимальна температура газів, що виходять, °С; t_0 – початкова температура випробування, 200 °С.

12. Розрахувати втрату маси зразка під час випробувань:

$$\Delta m = \frac{m_{\text{п}} - m_{\text{к}}}{m_{\text{п}}} \cdot 100, \%, \text{ де } m_{\text{п}}, m_{\text{к}} - \text{маси зразка до та після випробування, г.}$$

13. Зробити висновок про клас горючості випробуваного зразка ТГМ:

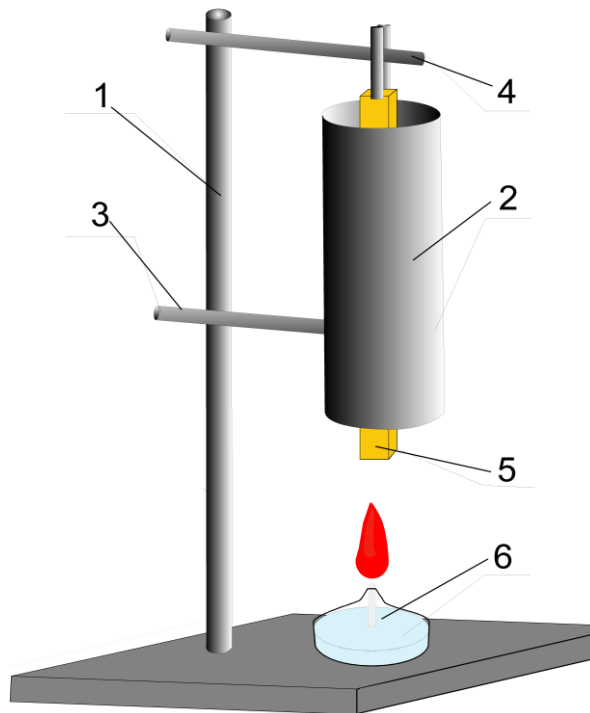
– за максимальним приростом температури і втратою маси: *важкогорючі*, якщо $\Delta t_{\max} < 60$ °С, $\Delta m < 60\%$, *горючі*, якщо $\Delta t_{\max} \geq 60$ °С, $\Delta m \geq 60\%$;

- за часом досягнення максимальної температури: *важкозаймисті* – $\tau > 4$ хв.;
- *середньозаймисті*, якщо $0,5 \leq \tau \leq 4$ хв.; *легкозаймисті*, якщо $\tau < 0,5$ хв.

Дослід 2. Метод вогневої труби

Опис лабораторної установки

Метод вогневої труби є експрес-методом випробовування для визначення горючості твердих неплавких матеріалів, рис. 1.26. Основною частиною установки є вогнетривка труба, закріплена у штативі вертикально. По центру труби розташовують зразки ТГМ, виготовлені за довжиною труби. Під трубу розташовують джерело запалювання – спиртовий пальник – так, щоб полум'я торкалось середини нижнього краю зразка.



- 1 – штатив; 2 – вогнева труба; 3 – утримувач труби; 4 – утримувач зразка;
5 – досліджуваний зразок; 6 – спиртівка

Рисунок 1.28 Установка для дослідження горючості твердих неплавких матеріалів

Проведення досліду

1. Зважити зразки, виготовлені за довжиною труби, з точністю до 0,1 г.
2. Прикріпити зразок до утримувача зразка; підняти трубу так, щоб пальник або спиртівка знаходились під нею; вставити зразок вертикально у центр труби так, щоб нижній край зразка виступав із труби на 5 мм.
3. Запалити пальник (спиртівку).
4. Підвести полум'я під зразок так, щоб воно діяло на середину нижнього краю зразка; зафіксувати час початку досліду.
5. Через 2,5 хвилини дії полум'я джерело підпалювання відвести та загасити.
6. Заміряти тривалість самостійного горіння зразку; якщо горіння триває довше за 80 с – зразок загасити.
7. Після припинення горіння зважити залишки зразка.
8. Розрахувати втрату маси зразка: $\Delta m = \frac{(m_{\text{поч}} - m_{\text{зал}})100}{m_{\text{поч}}}$, %, де $m_{\text{поч}}$, $m_{\text{зал}}$ – початкова маса зразка і маса залишків зразка; результати занести у таблицю.

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

№	Матеріал зразка	Початкова маса, г	Маса після горіння, г	Втрата маси	
				г	%

9. Якщо втрата маси зразка більша за 20 %, матеріал відносять до горючих; якщо менша за 20 % або зразок самостійно горить менше ніж 60 с, то матеріал досліджують за методом керамічної труби.
10. Зробити висновок про горючість досліджуваного матеріалу.

Контрольні запитання

1. Класифікація ТГМ.
2. Умови запалювання і горіння ТГМ.
3. Механізм поширення полум'я по поверхні ТГМ.
4. Фактори, що впливають на швидкість поширення полум'я по поверхні ТГМ.
5. Горіння целюлозовмісних матеріалів ЦВМ.
6. Особливості горіння полімерів.
7. Горіння металів.
8. Тління, як особливий вид горіння ТГМ.
9. Способи зниження горючості ТГМ.

10. Що таке пожежна небезпека?
11. Тиск насиченої пари пентану при температурі 36 °С складає 760 мм рт. ст. До газів чи до рідин відноситься ця речовина?
12. Температура плавлення (краплепадіння) нонадекану складає 32 °С. До рідин чи до твердих речовин відноситься цей вуглеводень?
13. У чому полягає оцінка пожежної небезпечності речовин та матеріалів?
14. Для речовин якого агрегатного стану визначається такий показник, як горючість?
15. На які групи поділяють речовини за їх горючістю?
16. Які рідини відносяться до легкозаймистих, а які – до особливо небезпечних?
17. Яку величину має критичний критерій горючості за формулою Елея?
18. Яка величина теплоти згоряння речовин прийнята за межу їх горючості?
19. Яку температуру горіння стехіометричної суміші речовини з повітрям можна вважати критичною при визначенні горючості речовин за температурою горіння?

Лабораторна робота
ВИЗНАЧЕННЯ НИЖНЬОЇ КОНЦЕНТРАЦІЙНОЇ МЕЖІ
АЕРОЗОЛЮ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ СТУПЕНЯ
ПОЖЕЖОВИБУХОНЕБЕЗПЕКИ ПИЛУ

Теоретична частина роботи

Пил це дисперсна система, що складається з твердої дисперсної фази яка знаходиться в газоподібному дисперсійному середовищі. Властивостями пилу, що визначають його пожежну небезпеку є: дисперсність (ступінь подрібнення матеріалу), хімічна активність, адсорбційна здатність, схильність до електризації. Визначальною властивістю серед них є дисперсність. Із зростанням дисперсності зростає хімічна активність, адсорбційна здатність і схильність до електризації.

За параметром дисперсності пил поділяють: за станом дисперсної фази на *монодисперсний* – з частинок однакового розміру (лікоподій – спори водоростей) та *полідисперсний* – з частинок різного розміру (промисловий пил); за дисперсністю: 1) *дрібнодисперсний* пил з розміром частинок $d < 10^{-7}$ м не осаджується, має велику реакційну поверхню, хімічну активність, адсорбційну здатність, схильність до електризації, 2) *крупнодисперсний* (або

середньодисперсний) – з розміром частинок $4\cdot 5\cdot 10^{-5}$ м краще поширює горіння; 3) *грубодисперсний* пил з $d > 10^{-4}$ м – навпаки.

В залежності від способу знаходження дисперсної фази у дисперсійному середовищі розрізняють: *аерозоль* – тверді або рідкі частинки у завислому стані в повітряному середовищі; *аерогель* – тверді частинки в осілому стані.

Горіння аерогелю подібне до горіння твердого горючого матеріалу, з якого цей пил отримано, однак у зв'язку із збільшенням дисперсності речовини горіння аерогелю має деякі особливості. Основними параметрами, що характеризують пожежну небезпеку аерогелю, є температури запалювання і самоспалахування.

Швидкість процесу розкладання аерогелю вище ніж у ТГМ, що пояснюється розвиненою поверхнею матеріалу у подрібненому стані, більшою хімічною активністю та адсорбційною здатністю, меншою теплопровідністю. Це зумовлює менший період індукції до запалювання, більшу швидкість поширення полум'я, а також підвищену схильність до самозаймання, у порівнянні з вихідним матеріалом.

Важливою особливістю аерогелю є його здатність переходити у завислий стан внаслідок механічної дії (струшування), дії повітряних потоків, збільшення інтенсивності горіння шару пилу (посилюються конвекційні потоки біля полум'я).

Завдяки адсорбції повітря частками пилу в товщі відкладень пилу може виникати тління. Процес тління пилу становить велику небезпеку, оскільки горючі продукти розкладання, що виділяються, можуть накопичуватися в закритих об'ємах, і горіння з дифузійного може перейти в кінетичне у вигляді вибуху; осередок тління також може викликати вибух у разі переходу аерогелю в аерозоль.

Аерозолі за властивостями займають проміжне положення між аерогелем і гомогенною газоповітряною сумішшю. Так само, як і аерогелі, аерозолі є гетерогенними дисперсними системами з твердою фазою, властивостями якої визначається процес горіння. З газоповітряними сумішами аерозолі схожі тим, що горіння більшості з них протікає з вибухом, і тому їх пожежна небезпека характеризується параметрами, типовими для газових сумішей, а саме: КМПП, мінімальною енергією запалювання, максимальним тиском вибуху.

Особливості горіння аерозолу, у порівнянні із горінням газів, наступні:

1. Аерозоль – це гетерогенна система, що потребує на два порядки більшої енергії для запалювання, ніж для газів, через необхідність витрат на розкладання;

2. Хоча можливість поширення горіння на весь об'єм аерозолі, як і для газів, відбувається у випадку, коли його концентрація знаходиться в межах КМПП, але вибухонебезпечність аерозолі визначають лише за нижньою КМПП, оскільки великі концентрації, властиві верхній КМПП, самостійно у повітрі не зависають внаслідок злипання частинок і осадження; тому актуальним питанням є можливість досягнення НКМПП і більш пожежо- та вибухонебезпечним приймають аерозоль з меншою НКМПП;

3. Від джерела запалювання фронт полум'я поширюється на весь об'єм аерозолі, але якщо у газових сумішах це зумовлено прогріванням холодної горючої суміші шляхом теплопровідності, то в пилоповітряних сумішах це відбувається за рахунок прогрівання наступної частинки променистим потоком від фронту полум'я: якщо наступна частинка потрапляє в зону теплового впливу («вогненну сферу») частинки, що горить, то енергії, яка передається виявляється достатньою для протікання підготовчих процесів, виникає «естафетний» механізм поширення горіння – від частинки до частинки.

4. Можливі поетапні вибухи: первинний вибух відбувається в малій хмарі аерозолі або за концентрації незначно більшої за НКМПП, помірна ударна хвиля підіймає в повітря осілий пил у значно більшій концентрації, тому другий вибух має більшу потужність, що призводить до руйнувань.

Вибухонебезпеку пилоповітряних систем залежить від ряду чинників: дисперсність пилу, кількість летючих продуктів під час розкладання, вологість пилу, наявність адсорбованих горючих або негорючих газів, а також повітря, зольність матеріалу, потужність джерела запалювання.

Всі фактори, що сприяють збільшенню швидкості хімічної реакції і інтенсифікації тепловиділення, зменшують величину НКМПП пилу.

При класифікації пилу горючих речовин за ступенем пожежної небезпеки враховують, що у стані аерозолі пил може горіти в кінетичному режимі, тобто з вибухом, тому за основний параметр пожежної небезпеки беруть НКМПП з врахуванням значення надлишкового тиску вибуху. В осілому стані пил може самоспалахувати або самозайматися, тому для оцінки пожежонебезпечних властивостей аерогелю використовують температуру самоспалахування.

За ступенем небезпеки горючий пил поділяють на дві групи і чотири класи:

Перша група – вибухонебезпечний пил: здатний до кінетичного горіння, має нижню концентраційну межу поширення полум'я до 65 г/м^3 включно, а також надлишковий тиск вибуху якого більше або дорівнює 5 кПа .

- 1 клас – найбільш вибухонебезпечний пил з НКМПП $15 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ і нижче;
- 2 клас – вибухонебезпечний пил з НКМПП від 15 і до $65 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$;

Друга група – пожежонебезпечний пил.

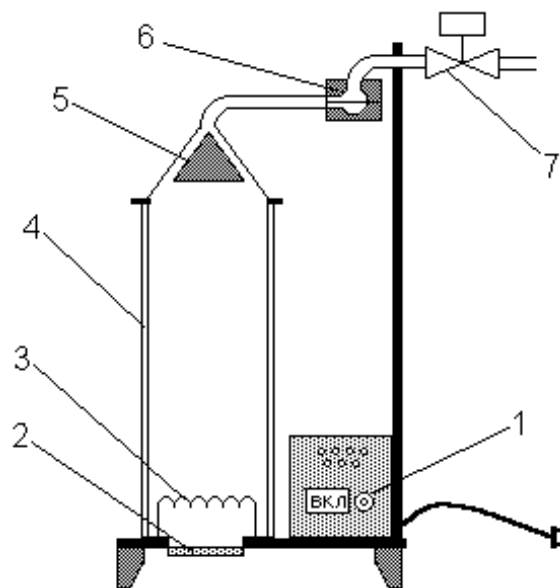
- 3 клас – найбільш пожежонебезпечний пил з T_{cc} аерогелю менше за $250 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 4 клас - пожежонебезпечний пил з T_{cc} аерогелю вище за $250 \text{ }^\circ\text{C}$.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Встановити ступінь небезпеки пилу досліджуваної речовини; визначити фактори, що впливають на пожежовибухонебезпеку пилу.

Опис лабораторної установки

Установка призначена для дослідного вимірювання нижньої концентраційної межі поширення полум'я (НКМПП) пилу у повітрі.



- 1 – джерело живлення; 2 – запобіжний клапан; 3 – електричне джерело запалювання;
 4 – вибухова труба; 5 – розпилювач; 6 – форкамера; 7 – кран подачі стиснутого повітря від компресора

Рисунок 1.25 – Схема лабораторної установки для визначення нижньої концентраційної межі поширення полум'я аерозолі

Основними частинами установки є реакційна посудина (вибухова труба) у вигляді скляного циліндру діаметром 105 мм і висотою 425 мм і

контрольною міткою на висоті 300 мм. Реакційна посудина закріплена між нижнім і верхнім металевими фланцями. На нижньому фланці знаходиться запобіжний клапан, через який скидається надлишковий тиск у разі запалювання пилу. До верхнього фланця приєднаний конусний розпилювач, з'єднаний із форкамерою, в яку поміщають наважку досліджуваної речовини перед дослідом. До форкамери приєднано магістраль стиснутого повітря з регулюванням подачі. Час відкриття магістралі має бути близько 0,5 с. Стиснуте повітря під тиском 300 ± 10 кПа подається в магістраль із ресивера.

Джерело запалювання являє собою ніхромову спіраль із проволочи діаметром 0,8 мм довжиною 50 мм. Час виходу спіралі на робочу температуру (1050 ± 50 °С) не більше 8 ± 1 с. Спіраль розташована на відстані (150 ± 5) мм від нижнього фланцю.

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення дослідів

1. Провести попередній розрахунок НКМПП пилу виданої речовини.

1.1 Розрахувати об'ємну НКМПП пилу для газоподібного стану з урахуванням хімічного складу речовини (додаток І). Для зручності – заповнити таблицю, значення теплоти утворення досліджуваної речовини взяти із довідника [3].

Тип j-го атому	Число атомів, m_j	Внесок атому, h_j

1.2 Розрахувати масову НКМПП пилу:

для крупнодисперсного пилу: $\varphi'_H = 0,164 \cdot \mu \cdot \varphi_H$, $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$;

для дрібнодисперсного пилу: $\varphi'_H = 0,41 \cdot \mu \cdot \varphi_H$, $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$,

де μ – молярна маса речовини пилу, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

1.3 Розрахувати масову НКМПП за формулою Шоневальда:

$\varphi'_H = a + \frac{b \cdot 10^6}{Q'_H}$, $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$, де a і b – константи для типу горючого матеріалу

(додаток І); Q'_H – масова теплота згоряння пилу, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, для індивідуальних речовин об'ємну теплоту згоряння розраховують за законом Гесса та перераховують у масову:

$$Q_{\text{гор}} = \left| \sum_i n_i \cdot H_{\text{фшт}}^{\circ} - H_{\text{фт}}^{\circ} \right|, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}, \quad Q'_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{гор}} \cdot 1000}{\mu}, \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

Для складних речовин (багатокомпонентні або не мають загальної хімічної формули, наприклад, вугілля) Q'_H розраховують за елементним складом:

$$Q'_H = 339,4 \cdot \varphi_C + 1256,8 \cdot \varphi_H + 108,9 (\varphi_S - \varphi_O - \varphi_N) - 25,1(9 \cdot \varphi_H + W), \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1},$$

де $\varphi_C, \varphi_H, \varphi_S, \varphi_O, \varphi_N$ – масовий вміст атомів карбону, гідрогену, сульфуру, кисню, нітрогену в речовині пилю, %; W – вміст вологи у речовині, %.

2. На основі масової НКМПП визначити ступінь пожежної небезпеки пилю.

3. Розрахувати масу наважки пилю: $m_{\text{пилю}} = \varphi'_H \cdot V_{\text{рп}}$, г, де φ'_H – масова НКМПП пилю, $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$; $V_{\text{рп}}$ – об'єм реакційної посудини (вибухової труби), м^3 .

4. Розтерти досліджувану речовину у фарфоровій ступці, відсіяти частинки розміром менше 50 мкм для металів і менше 100 мкм для інших речовин.

5. Накачати повітря в ресивер, перевірити роботу електричного клапана імпульсного подавання повітря. Калібрують прилад за контрольною речовиною.

Речовина	Розміри частинок, мкм	НКМПП, $\text{г} \cdot \text{м}^{-3}$
Бензойна кислота	менше 100	20,0±3,0
Порошок титану	менше 50	45,0±2,5

Проведення досліду

- Зважити наважку досліджуваної речовини із точністю 0,01 г.
- Помістити наважку у форкамеру. Для цього слід викрутити її нижню частину і помістити досліджувану речовину у напівсферичну лунку.
- Увімкнути джерело запалювання, після досягнення робочої температури (припинення зміни кольору розжареної спіралі) увімкнути електромагнітний клапан і провести розпилювання наважки за час не довший 0,5 с.
- Візуально фіксують «спалах» або «відмову». За результат «спалах» приймають дослід з поширенням полум'я по всьому об'єму реакційної посудини до контрольної мітки. «Окремі іскри, окремі прояви

полум'я, спалах по об'єму, який не досяг контрольної мітки» – приймають за «відмову»

5. Повторюють дослід шляхом зміни маси наважки на 10 %. Перед кожним наступним випробуванням очищують реакційну посудину від решток пилу і продуктів згорання.

6. Результати дослідів занести в таблицю. Розрахувати концентрації пилу у дослідах, виходячи з маси наважки та об'єму реакційної посудини. За експериментально отримане значення НКМПП приймають дослід, у якому був спалах на весь об'єм реакційної посудини до контрольної мітки.

Таблиця результатів дослідів (зразок оформлення)

№	Маса наважки, г	Концентрація пилу, г·м ⁻³	Результат

7. Зробити висновок щодо значення НКМПП пилу, класу його небезпеки, факторів, що могли вплинути на значення цього показника, отримані у досліді.

Контрольні запитання:

1. Пил, та його класифікація.
2. Властивості пилу, що обумовлюють його пожежну небезпеку.
3. Особливості горіння аерозолі у порівнянні із газами.
4. Особливості горіння аерогелю у порівнянні із ТГМ.
5. Фактори, що впливають на ступінь пожежної небезпеки пилу.
6. Класифікація пилу за ступенем пожежної небезпеки.

РОЗДІЛ 2 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ РОЗВИТКУ ПОЖЕЖ ТА ПОЖЕЖОГАСІННЯ

2.1 Пожежа її розвиток, параметри; тепломасообмін пожежі в огороженні

Лабораторна робота ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛО- ТА МАСООБМІНУ ПОЖЕЖІ В ОГОРОДЖЕННІ

Теоретична частина роботи

Пожежа – це неконтрольоване горіння проза спеціального осередку, що розвивається в просторі та часі та завдає моральні, матеріальні, екологічні збитки. Найголовнішими параметрами пожежі в приміщенні, які змінюються з часом, є: пожежна навантага, лінійна швидкість поширення пожежі, масова швидкість вигорання пожежної навантаги, площа пожежі, температура пожежі, інтенсивність газообміну та задимлення на пожежі, висота нейтральної зони.

Пожежна навантага $R_{\text{пож}}$ – це кількість теплоти, що може виділитися під час пожежі з одиниці площі підлоги, $\text{кДж}\cdot\text{м}^{-2}$. Іноді пожежну навантагу виміряють як масу всіх горючих і важкогорючих матеріалів, що приходить на одиницю площі підлоги приміщення, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$.

Лінійна швидкість поширення пожежі v_l – відстань, яку проходить фронт пожежі за одиницю часу, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$.

Масова швидкість вигорання (інтенсивність) v_m – кількість речовини, що вигоряє в одиницю часу з одиниці площі горіння, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

Площа пожежі $S_{\text{пож}}$ – площа проекції зони горіння на горизонтальну або вертикальну площину.

Температура пожежі в огороженні – середньооб'ємна температура газового середовища в приміщенні, в якому відбувається пожежа.

Інтенсивність газообміну I_g – кількість повітря, що притікає в одиницю часу до одиниці площі пожежі, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

Густина задимлення – кількість диму в одиниці об'єму приміщення, $\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$.

Теплота пожежі $Q_{\text{пож}}$ – кількість тепла, що виділяється в зоні горіння в одиницю часу: $Q_{\text{пож}} = \eta \cdot v_m \cdot S_{\text{пож}} \cdot Q_H'$, $\text{кДж}\cdot\text{с}^{-1}$, де η – коефіцієнт повноти згорання; v_m – масова швидкість вигорання, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$; $S_{\text{пож}}$ – площа пожежі, м^2 ; Q_H' – робоча масова теплота згорання, $\text{кДж}\cdot\text{кг}^{-1}$.

Ці параметри пожежі можна вимірювати, прогнозувати їх зміну за допомогою розрахунків, досліджувати у лабораторних умовах.

Зміну температури пожежі в часі називають *температурним режимом пожежі*. Температура пожежі в огороженні залежить від: об'єму приміщення; часу розвитку та площі пожежі; кількості пожежної навантаги; виду горючої речовини (теплоти згоряння, масової швидкості вигорання, лінійної швидкості поширення горіння); інтенсивності газообміну; тепловтрат на нагрівання конструкцій; температури повітря, що надходить в приміщення тощо.

Кількість тепла, що виділяється на пожежі та температура пожежі сильно залежать від параметрів газообміну між приміщенням і зовнішнім середовищем. Виходячи з умов газообміну, пожежі в огороженні поділяють на: 1) пожежі, що регулюються вентиляцією, 2) пожежі, що регулюються пожежною навантагою.

Пожежі, що регулюються вентиляцією (ПРВ) – відбуваються за умов нестачі кисню в газовому середовищі приміщення і надлишку пожежної навантаги. Параметри пожежі визначаються інтенсивністю газообміну, оскільки окисника не вистачає для повного згоряння речовин.

Пожежі, що регулюються пожежною навантагою (ПРН) – відбуваються за умов надлишку повітря в приміщенні, тому розвиток пожежі залежить від наявності та розташування пожежної навантаги. За своїми параметрами такі пожежі схожі з пожежами на відкритому просторі. За таких умов досягається більша температура пожежі, а час розвитку менший, ніж для ПРВ.

Базовою зоною пожежі є *зона горіння*. Продукти неповного згоряння утворюються незалежно від коефіцієнта надлишку повітря, оскільки у верхній частині дифузійного полум'я завжди існує нестача кисню. За умов пожежі в приміщенні тепло- і масообмін обмежені огорожуючими конструкціями, тепло і дим накопичуються, тому утворюються та поширюються зона теплового впливу і зона задимлення. *Зона задимлення* має знижений вміст кисню, підвищений – токсичних речовин, містить тверді та рідкі частинки, що обмежує видимість. Ці явища є небезпечним для людини і заважають проведенню аварійно-рятувальних робіт. *Зона теплового впливу* має критичну температуру, що створює небезпеку для людини або за спричиняє суттєві зміни фізичних властивостей будівельних матеріалів. З розвитком пожежі настає момент, коли все приміщення охоплено впливом цих зон і перебування людей в приміщенні стане неможливим. Час досягнення такого стану називають *критичним часом розвитку пожежі*.

Під час пожежі виникають *первинні (загальні)* та *другорядні (окремі явища)*. Загальні – горіння, масо- та теплообмін – бувають на кожній пожежі. Окремі – є наслідком наявності загальних явищ: вибухи, подавання вогнегасних речовин, загибель людей, хімічне або радіаційне забруднення тощо.

Критичний час розвитку пожежі – це період від моменту виникнення горіння до зростання температури у приміщенні або до зменшення концентрації кисню поза критичні значення. Цей час залежить від об'єму приміщення, площі пожежі, теплоти згорання, масової швидкості горіння.

Якщо площа пожежі стала (як для пожеж класу В, коли горять рідини), час до моменту досягнення критичної температури розраховують за формулою:

$\tau_{кр}^t = \frac{V_{прим} c_p (t_{кр} - t_o)}{(1 - k) \eta Q'_H S_{пож} v_m}$, с, де $V_{прим}$ – об'єм приміщення,

m^3 ; t_o – початкова температура в приміщенні, $^{\circ}C$; $t_{кр}$ – критична температура, $^{\circ}C$; c_p – теплоємність повітря, $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$; k – коефіцієнт тепловтрат за часткою тепла пожежі, що витрачається на нагрівання конструкцій приміщення та горючої речовини;

Якщо прийняти $k = 0,21$, $c_p = 1,29 kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, $t_{кр} = 70^{\circ}C$ (для людини без засобів захисту), а $t_o = 20^{\circ}C$, то *критичний час розвитку пожежі за температурою* розраховують за формулою:

$$\tau_{кр}^t = 81,9 \frac{V_{прим}}{\eta Q'_H S_{пож} v_m}, \text{ с.} \quad (2.1)$$

Одночасно зі зростанням температури під час пожежі в огороженні відбувається зниження вмісту кисню у повітрі (від 21 % у чистому повітрі): вже за 17 % людина втрачає свідомість, а за концентрацій нижче 14–15 % в організмі людини відбуваються незворотні процеси, і може наступити смерть. Швидкість зниження вмісту кисню в приміщенні під час пожежі залежить від потреби у повітрі для повного згорання горючої речовини, від площі горіння, від масової швидкості вигорання, від об'єму приміщення. Відповідно, *критичний час розвитку пожежі за вмістом кисню* розраховують за формулою:

$$\tau_{кр}^{O_2} = \frac{0,33 V_{прим}}{\eta S_{пож} v_m v_{п}^O}, \text{ с,} \quad (2.2)$$

де $v_{\text{п}}^{\circ}$ – теоретичний об'єм повітря для повного згорання 1 кг горючої речовини.

Під час пожежі класу А в приміщенні (горять ТГМ), площа пожежі з часом зростає та визначається радіусом розвитку пожежі, який, у свою чергу, залежить від квадрату лінійної швидкості поширення горіння та квадрату часу розвитку пожежі; температура в приміщенні буде залежати від теплоти пожежі, умов газообміну та часу розвитку пожежі, тобто $T_{\text{пож}} = (q, \alpha, \tau)$, де α – коефіцієнт надлишку повітря; τ – проміжок часу від виникнення пожежі до моменту виявлення; q – густина теплового потоку на огорожуючих конструкціях.

Густину теплового потоку є функцією теплоти пожежі:

$$q = \frac{\eta v_{\text{п}} Q_{\text{н}} S_{\text{пож}}}{S_{\text{огор}}}, \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (2.3)$$

де $S_{\text{огор}}$ – площа огорожуючих конструкцій, м^2 .

На підставі обробки експериментальних даних залежності для зміни густини теплового потоку, температури пожежі та коефіцієнту надлишку повітря сформовано у вигляді номограм (додатки Й, К).

Визначення коефіцієнта надлишку повітря за номограмою (додаток Й) проводять після визначення № кривої (за співвідношенням площі припливного отвору і площі пожежі $S_{\text{припл}}/S_{\text{пож}}$) та виду кривої (суцільна або пунктирна – за співвідношенням площі пожежі і площі підлоги $S_{\text{пож}}/S_{\text{підл}}$). Під час розрахунку площі припливних отворів враховуємо, що у разі розташування отворів на різних рівнях на приплив повітря працюють нижні отвори, а на виток продуктів горіння – верхні; якщо отвори знаходяться на одному рівні, то на приплив повітря працює 1/3 площі цих отворів. Далі, виходячи з довідкового або розрахункового значення питомого теоретичного об'єму повітря $v_{\text{п}}^{\circ}$ на згорання одиниці маси даної горючої речовини, визначають коефіцієнт надлишку повітря α .

Для визначення температури пожежі за номограмою (додаток К) на даний момент часу розвитку пожежі використовують розраховані значення густини теплового потоку та коефіцієнта надлишку повітря.

Під час пожежі у приміщенні за наявності відкритих отворів – дим не заповнює весь його об'єм, а накопичується від стелі до якогось рівня від підлоги. Нижній рівень диму описують поняттям «висота нейтральної зони». Механізм цього явища наступний. Над осередком горіння виникають

конвекційні потоки гарячих продуктів горіння, за наявності огорожуючих конструкцій вони накопичуються під стелею, тоді у верхній частині приміщення відбувається певне збільшення тиску. Холодне повітря підсмоктується в нижній частині димогазової колонки, тоді в нижній частині приміщення відбувається певне зниження тиску. На певній висоті від рівня підлоги є рівень, де тиск дорівнює атмосферному тиску назовні; таку площину рівних тисків називають *нейтральною зоною*. На цій висоті вже немає гарячих продуктів горіння, тобто, цей параметр рівноваги тисків показує нижній рівень диму у приміщенні.

Нейтральна зона - це уявна площина в приміщенні, рівнобіжна підлозі, на рівні якої тиск продуктів горіння дорівнює зовнішньому тиску повітря.

Якщо газообмін у приміщенні здійснюється через отвори на різних рівнях, їх можна розділити на нижні – припливні (через які надходить повітря) та верхні – вихідні (через які продукти згорання виходять назовні). Нейтральна зона буде розташовуватись за висотою між центром нижнього та верхнього отворів:

$$h_{\text{нз}} = \frac{H}{\left(\frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{вих}}}\right)^2 \frac{T_{\text{пож}}}{T_{\text{п}}} + 1} + 0,5h_{\text{прип}}, \text{ м}, \quad (2.4)$$

де H – висота між центрами припливного і вихідного отворів, м; $S_{\text{прип}}$, $S_{\text{вих}}$ – площі припливного і вихідного отворів, м²; $T_{\text{п}}$, $T_{\text{пож}}$ – температура повітря та пожежі, К; $h_{\text{прип}}$ – висота припливного отвору, м.

При газообміні через один отвір (двері, вікно або декілька отворів на одному рівні), процес підсосу повітря і викиду продуктів горіння здійснюється безпосередньо в тому самому отворі. Тоді на приплив працює нижня частина отвору, на виток диму – верхня, а нейтральна зона розташовується в площині цього отвору – приблизно посередині його висоти. У цьому випадку для розрахунку положення нейтральної зони можна скористатись формулою, яка враховує можливість розташування цього отвору не від підлоги:

$$h_{\text{нз}} = \frac{h}{1 + 3\sqrt{\frac{T_{\text{пож}}}{T_{\text{п}}}}} + h_{\text{пор}}, \text{ м}, \quad (2.5)$$

де h – висота відкритого отвору, м; $h_{\text{пор}}$ – висота порогу або підвіконня (за наявності), від якої буде відштовхуватися положення нейтральної зони, м.

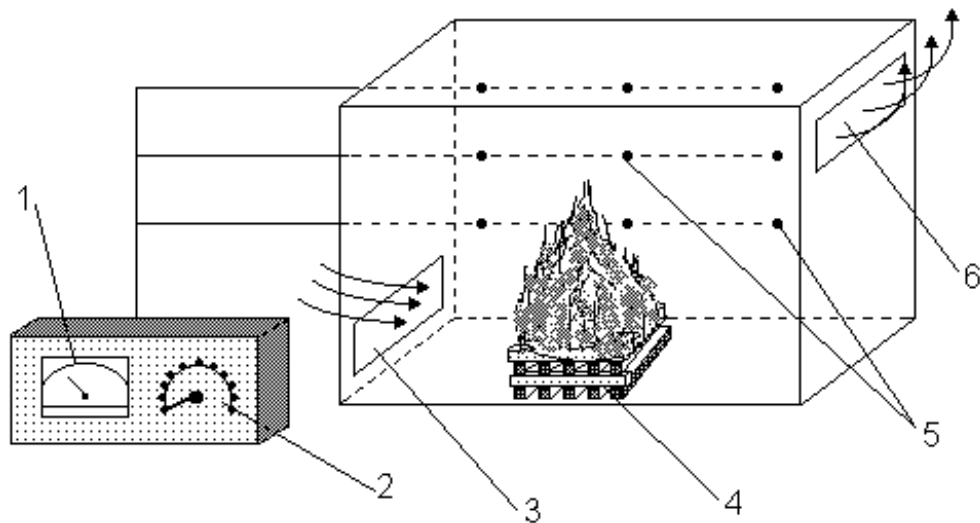
Під час розвитку пожежі – зростання температури призводить до опускання нейтральної зони. Якщо забезпечити високий рівень нейтральної зони (наприклад, відкриттям верхніх отворів або розташування у їх площині димососів) – гарячих продуктів горіння у приміщенні буде менше і температура буде зростати повільніше. Положення нейтральної зони буде тим вище, чим менший тиск продуктів горіння під стелею і більший тиск свіжого повітря, що надходить в приміщення, що використовують для регулювання її висоти, що на певний час подовжує можливість життєдіяльності людей.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Дослідити зміну температури пожежі та висоти нейтральної зони в модельному приміщенні в залежності від часу розвитку пожежі та умов газообміну.

Опис лабораторної установки

Основною частиною лабораторної установки для дослідження параметрів пожежі в огороженні є модель приміщення прямокутної форми. Передня стінка виготовлена з жаротривкого скла у сталевому каркасі; бокові, задня стінка, дно і кришка – з азбоцементного листа. Осередок пожежі класу А або В розташовують у центр підлоги для відповідності інтегральній моделі розрахунку, який супроводжує дослід. В об'ємі модельного приміщення вимірюють температуру у середній вертикальній площині вздовж задньої стінки приміщення. Для визначення середньої температури в цій площині використано 9 термопар, які заведено крізь задню стінку. Перемикаючи по черзі термопари, вимірюють температуру в різних частинах приміщення. Газообмін в модельному приміщенні регулюють за допомогою верхнього та нижнього отворів, які розміщено на бічних стінках і які мають засувки для зміни їх площі (ширини). Нейтральну зону можна спостерігати на холодному склі, оскільки з продуктів горіння, які накопичуються вище нейтральної зони, конденсується пірогенетична вода.



1 – потенціометр; 2 – перемикач термопар; 3 – припливний отвір; 4 – осередок пожежі;
5 – термопари; 6 – витяжний отвір

Рисунок 2.1 – Схема лабораторної установки для дослідження температурного режиму та газообміну пожежі в огороженні

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення дослідів

1. Виписати параметри горіння горючої речовини: нижчу теплоту згорання Q'_H , масову швидкість вигорання v_m , коефіцієнт повноти згорання η , об'єми повітря $v^o_{п}$ і продуктів згорання $v^o_{пг}$ на одиницю маси горючої речовини [3, 8].

2. Заміряти габарити модельного приміщення. Викладач задає схему зміни розмірів припливного і витяжного отворів у різні моменти пожежі.

3. Скласти із дерев'яних брусків осередок пожежі (або налити горючу рідину у відкриту ємність), заміряти розміри, визначити коефіцієнт поверхні і розмістити в середині підлоги модельного приміщення.

4. Розрахувати критичний час розвитку пожежі за температурою і вмістом кисню за формулами (2.1 та 2.2).

5. Розрахувати густину теплового потоку q , $\text{кВт}\cdot\text{м}^{-2}$, за формулою (2.4).

6. За допомогою номограми з додатку 14 визначити коефіцієнт надлишку повітря α , а за допомогою номограми з додатку 15 визначити температуру пожежі.

7. Розрахувати висоту нейтральної зони в модельному приміщенні з урахуванням часу розвитку та умов газообміну, формули (2.4 та 2.5).

Проведення дослід

1. Виставити задані розміри верхнього та нижнього отворів. Осередок пожежі розміщувати не ближче 8 см від скла для запобігання його розтріскування.

2. Запалити осередок пожежі в модельному приміщенні. Після того як полум'я охопить основну частину горючої речовини, увімкнути секундомір.

3. Зняти показання з усіх термопар і візуально за допомогою лінійки заміряти висоту нейтральної зони. Розрахувати температуру пожежі як середнє значення.

4. Повторити дослід для кожного з визначених моментів часу з іншими розмірами верхнього та нижнього отворів.

5. Результати розрахунків та дослідів заносять в таблицю, будують графіки зміни температури пожежі і висоти нейтральної зони від часу розвитку пожежі.

Час пожеж, хв.	Ширина отвору, м		Площа отвору, м ²		α	$t_{\text{пож}}, ^\circ\text{C}$		$h_{\text{нз}}, \text{м}$	
	нижній	верхній	нижній	верхній		розр.	факт.	розр.	факт.

6. Зробити висновок про залежність температури пожежі і висоти нейтральної зони від часу розвитку пожежі та умов газообміну; порівняти прогнозовані за інтегральною моделлю параметри пожежі та отримані у досліді.

Контрольні запитання

1. Пожежа, класифікація пожеж.
2. Загальні і окремі явища на пожежі.
3. Характеристика зон пожежі.
4. Параметри пожежі.
5. Періоди розвитку пожежі.
6. Температура пожежі, фактори, що її визначають.
7. Нейтральна зона, фактори, що її визначають.
8. Способи регулювання нейтральної зони.

2.2 Теплова теорія, способи та засоби припинення горіння

Основні поняття пожежогасіння.

Існує два прийоми подавання вогнегасних речовин на гасіння: 1) *в об'єм* горючої системи – для її розбавлення, охолодження або гальмування хімічної реакції. 2) *на поверхню* речовини для її охолодження або ізолювання.

Існує два методи гасіння пожеж: 1) зменшення тепловиділення процесу горіння, для цього – охолоджують поверхню горючої речовини; ізолюють один з компонентів горючої системи від зони горіння; розбавляють горючу суміш інертною речовиною; збільшують енерговитрати на початок хімічної реакції шляхом додавання *інгібіторів*; 2) збільшення тепловтрат від зони горіння, це досягають охолодженням зони горіння речовинами з низькою температурою (тверда вуглекислота) або з великою теплою фазового переходу (вода); проводять зрив полум'я газовим потоком з великою швидкістю або за допомогою вибуху; вводять у зону горіння негорючі порошки для інтенсифікації тепловтрат на їх нагрів та випромінюванням; збільшують площу тепловіддачі шляхом використання *вогнеперешкоджувачів* (металеві стружки, сітки).

Існує чотири способи гасіння пожеж: 1) охолодження зони горіння до температури погасання розпиленою водою або поверхні речовин до температури меншої за температуру спалаху або піролізу компактним струменем води, водними розчинами, рідким азотом, твердим CO_2 ; 2) розбавлення горючої суміші або зони горіння інертними газами – CO_2 , N_2 , пара H_2O ; водою водорозчинних рідин; 3) ізолювання горючої речовини або окисника від зони горіння – пінами, азбестовою ковдрою, порошками спеціального призначення; зони горіння від горючої суміші зривом полум'я, наприклад, гасіння газових фонтанів вибухом; інгібування – гальмування хімічної реакції горіння за рахунок введення у зону полум'яного горіння інгібіторів – хладонів, порошоків загального призначення, вогнегасних аерозолей.

Вибір засобів пожежогасіння визначається вимогами до них та обмеженнями у застосуванні. Вимоги до вогнегасних засобів: висока вогнегасна ефективність, безпечність для людей, природи, обладнання, простота та зручність подачі в осередок пожежі, можливість тривалого зберігання без зміни властивостей, економічність, дешевизна, доступність та великі запаси.

Забороняється застосовувати вогнегасний засіб якщо він реагує у зоні гасіння: з горючою речовиною та підтримують горіння (CO_2 з металами); з

горючою речовиною з утворенням вибухонебезпечних продуктів (N_2 з металами); з негорючими речовинами з утворенням горючих (вода + карбід \rightarrow ацетилен).

Визначальною умовою вибору вогнегасного засобу є клас пожежі: клас А (тверді речовини) – підходять всі види вогнегасних речовин, але краще краще вода або водні розчини; клас В (рідини) – ізолювання піною, можливо – розбавлення, інгібування, охолодження об'єму полум'я; клас С (горючі гази) – розбавлення зони горіння або інгібування, можливе гасіння розпорошеною водою; клас D (метали) – краще ізоляція порошками спеціального призначення.

Для визначення показників роботи підрозділів під час гасіння пожеж (або під час досліджень процесів гасіння), правильності вибору вирішального напрямку та вогнегасного засобу, прийомів і способів його подавання використовують основні параметри процесу гасіння пожежі: час гасіння, вогнегасна ефективність вогнегасної речовини, інтенсивність подавання, питома та загальна витрата.

Час гасіння $\tau_{\text{гас}}$ – від початку подачі вогнегасної речовини до гасіння пожежі.

Вогнегасна ефективність E – обернена до *вогнегасної концентрації*; чим ця концентрація менша, тим більша ефективність вогнегасної речовини: $E = \frac{1}{\Phi_{\text{вогн}}}$. Чим менша вогнегасна ефективність, тим більше час гасіння і витрата речовини.

Загальна кількість вогнегасної речовини m – це кількість вогнегасної речовини, що подається за час гасіння пожежі, [л], [м³], [кг].

Загальна витрата G – це кількість вогнегасної речовини, що витрачено на гасіння пожежі на одиницю параметра пожежі: $G = \frac{m}{\Pi_{\text{пож}}}$ [л·м⁻²] або [л·м⁻³].

Питома витрата g – це кількість вогнегасної речовини, що витрачено в одиницю часу пожежі: $g = \frac{m}{\tau_{\text{гас}}}$, [л·с⁻¹] або [кг·с⁻¹].

Інтенсивність подавання I – це кількість вогнегасної речовини, що подається в одиницю часу на одиницю розрахункового параметра пожежі (фронт, площі пожежі або об'єму приміщення, в якому відбувається пожежа); розрізняють лінійну, л·м⁻¹·с⁻¹, поверхневу, л·м⁻²·с⁻¹, об'ємну, л·м⁻³·с⁻¹.

¹: інтенсивність подавання $I = \frac{m}{\Pi_{\text{пож}} \tau_{\text{гас}}}$, де $\Pi_{\text{пож}}$ – величина параметра

пожежі (периметр Π [м], площа $S_{\text{пож}}$ [м²], об'єм приміщення $V_{\text{прим}}$ [м³]).

Між параметрами пожежогасіння існує взаємозв'язок: $G = I\tau_{\text{гас}}$,
 $g = I \cdot \Pi_{\text{пож}}$.

Типову залежність параметрів пожежогасіння від інтенсивності подавання для будь-яких вогнегасних речовин можна представити у вигляді графіків:

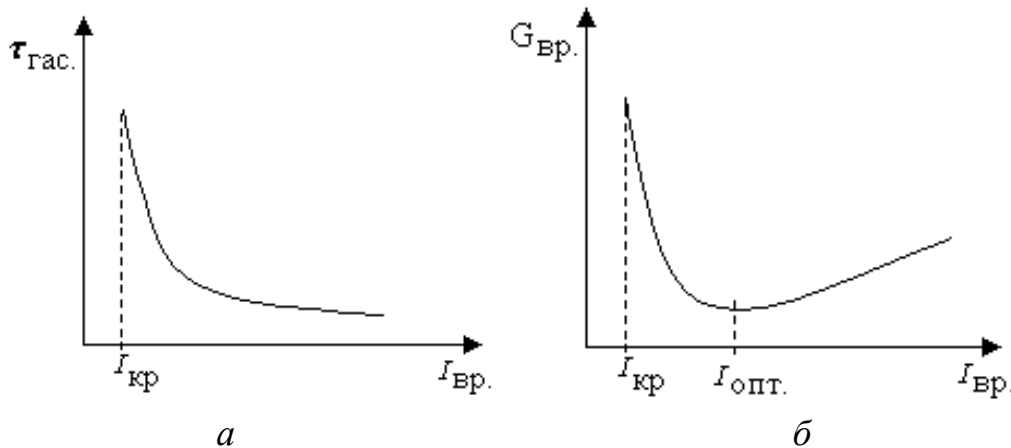


Рисунок 2.1 – Залежності часу гасіння *а* та витрати вогнегасної речовини *б* від інтенсивності її подавання

Витрата вогнегасного засобу залежить від часу гасіння і інтенсивності його подавання. У разі малої інтенсивності подавання час гасіння збільшується, за зростання інтенсивності подавання – зменшується. Існує така мала *критична інтенсивність подавання*, за якої гасіння досягнуто не буде. Для всіх вогнегасних засобів встановлюють значення *оптимальної інтенсивності подавання*, за якої витрата вогнегасного засобу G буде мінімальною. Крім того, час гасіння τ має бути не більше допустимого. Інтенсивність подавання вогнегасного засобу визначають під час теоретичного аналізу умов припинення горіння, дослідним шляхом і розрахунком, під час аналізу гасіння пожеж.

Інтенсивність подавання вогнегасного засобу, яка отримана шляхом аналізу теоретичних умов припинення горіння, називають *теоретичною*.

За аналізом результатів гасіння пожеж отримано рекомендовані значення інтенсивності подавання, які наведені у нормативних документах і довідниках [8] під назвою «*нормативна інтенсивність подавання*».

Для аналізу ефективності гасіння визначають *коефіцієнт використання вогнегасного засобу* як відношення теоретичної

інтенсивності подавання до фактичної $K_{\text{вик.}} = \frac{I_{\text{теор.}}}{I_{\text{факт.}}}$; та коефіцієнт втрат

$K_{\text{вик.}} = \frac{I_{\text{факт.}}}{I_{\text{н.}}}$ – як відношення фактичної інтенсивності подавання

вогнегасного засобу до нормативної:.

Лабораторна робота ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ ОХОЛОДЖЕННЯМ

Теоретична частина роботи

Гасіння пожежі передбачає зниження температури зони горіння до температури погасання $T_{\text{пог}}$, при цьому в системі виникає нестійка теплова рівновага, за якої найменше зниження температури призводить до зрушення теплового балансу у бік охолодження. Реакція горіння при цьому припиняється.

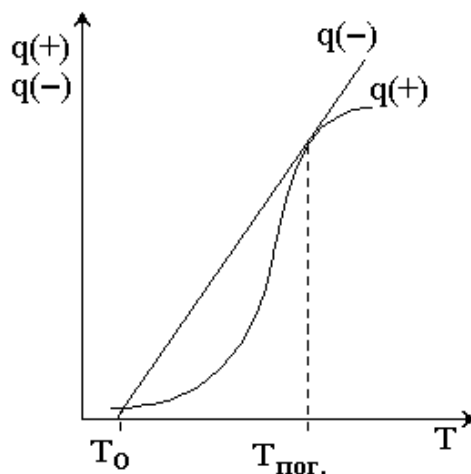


Рисунок 2.2 – Графік зміни інтенсивності тепловиділення $q(+)$ і тепловіддачі $q(-)$ від температури системи T за критичної умови погасання

Досягнути критичну умову погасання можна двома методами: або зменшити інтенсивність тепловиділення $q(+)$ або збільшити інтенсивність тепловіддачі $q(-)$.

Необхідну інтенсивність тепловідводу від зони горіння описують виразом: $q_{\text{відв}} > \sum c_{\text{рпгi}} g_{\text{пгi}} (T_{\text{гор}} - T_{\text{пог}})$, де $g_{\text{пгi}}$ – витрата утворення кожного з продуктів згоряння, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; $c_{\text{рпгi}}$ – теплоємність продуктів горіння, $\text{кДж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$.

Для більшості вуглеводнів температура дифузійного горіння становить близько 1500 К. Якщо початкова температура горючої системи становила 300 К, то температура системи зростає на 1200 К. На це підвищення температури з урахуванням тепловтрат у навколишнє середовище витрачається близько 60 % нижчої теплоти згорання Q'_H . Температура погасання більшості вуглеводнів становить 1200–1300 К. Тоді для припинення горіння методом охолодження зони горіння потрібно знизити температуру полум'я приблизно на 200 °С, що становить відносно температури погасання $(200/1200) \cdot 100\% = 17\%$. Тоді для припинення горіння від зони реакції потрібно відвести тепла:

$$q_{\text{відв}} = 0,17 \cdot 0,6 \cdot Q'_H \approx 0,1 \cdot Q'_H.$$

На практиці охолодити безпосередньо зону горіння до погасання важко. Тому використовують інший метод – охолоджують поверхню конденсованої речовини, що горить, нижче критичної температури.

У разі дифузійного горіння горючої рідини для припинення горіння від її поверхні необхідно відвести те тепло, що підводиться до неї випромінюванням, а також відібрати від поверхні вже накопичений запас тепла за рахунок теплоємності рідини. Для цього потрібно охолодити поверхневий шар до температури, меншої за температуру спалаху $t_{\text{сп}}$. Це різко знижує інтенсивність надходження горючих парів в зону горіння, їх концентрація стає меншою за нижню КМПП і горіння припиняється.

Для припинення гомогенного дифузійного горіння (полум'яне горіння) твердих горючих матеріалів, які газифікуються, умовою припинення їх горіння є відбір тепла для зниження температури поверхневого шару ТГМ до температури, яка менше, ніж температура початку піролізу $t_{\text{пір}}$ (або $t_{\text{сп}}$ для деяких ТГМ).

Охолоджуюча вогнегасна речовина буде поглинати тепло $Q_{\text{погл}}$ шляхом її нагрівання до температури фазового переходу $Q_{\text{нагр1}}$, витрат на фазовий перехід $Q_{\text{фп}}$ та подальшого нагрівання пари $Q_{\text{нагр2}}$: $Q_{\text{погл}} \approx Q_{\text{нагр1}} + Q_{\text{фп}} + Q_{\text{нагр2}}$, кДж.

Найбільш поширеним охолоджуючим засобом є вода. Потрапляючи в зону горіння або на поверхню горючої речовини, вода віднімає велику кількість тепла за рахунок власного нагріву і часткового випаровування. Водночас пара, що утворюється, розбавляє зону горіння та повітря. Крім того, вода розтікається по поверхні матеріалу, що ізолює (екранує) її від випромінювання. А також перешкоджає виходу горючих газів, що утворюються за перегріву ТГМ.

Переваги води як вогнегасного засобу: екологічна чистота; доступність і дешевизна; простота зберігання і застосування; легкість транспортування і доставки в зону горіння; термічна стійкість до 2200 °С; здатність поглинати теплове випромінювання; адсорбційна здатність, осадження диму.

Недоліки води як вогнегасного засобу:

- висока реакційна здатність води перешкоджає її використанню для гасіння приміщень, де є речовини, з якими вода реагує;
- температура горіння металів перевищує температуру розкладання води, тому гасіння металів водою може супроводжуватися водневим вибухом;
- висока електропровідність води (за наявності навіть малих кількостей домішок) обмежує її використання для гасіння електроустановок під напругою;
- мала в'язкість води обумовлює її швидке стікання з поверхонь, що знижує ефективність їх охолодження під час гасіння;
- високий коефіцієнт поверхневого натягу ускладнює проникнення води углиб матеріалу;
- компактний струмінь води слабо охолоджує полум'я;
- замерзання ускладнює використання води за від'ємних температур;
- вода має більшу густину, ніж більшість горючих рідин, що обумовлює занурення води під поверхню водонерозчинної горючої рідини;
- вогнегасна ефективність води суттєво залежить від способу її подачі в осередок пожежі (суцільним або розпиленним струменем).

Кількість тепла, що поглинає 1 кг води під час гасіння пожежі, якщо вода проходить описані вище стадії у зоні горіння, визначається закономірністю:

$$q_{\text{погл}} = q_{\text{наг}}^{\text{рід}} + \Delta H_{\text{вип.}} + q_{\text{наг}}^{\text{пар}} = c_p^{\text{рід}}(t_{\text{кип}} - t_o) + \Delta H_{\text{вип.}} + c_p^{\text{пар}}(t_{\text{гор}} - t_{\text{кип}}), \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1},$$

де $q_{\text{наг}}^{\text{рід}}$ – кількість тепла, що йде на нагрів 1 кг води від початкової температури до температури кипіння, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$; $\Delta H_{\text{вип.}}$ – теплота випаровування води, $2260 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, $q_{\text{наг}}^{\text{пар}}$ – кількість тепла, що йде на нагрів 1 кг пари від температури кипіння до температури зони горіння, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$; $c_p^{\text{рід}}$ – теплоємність води, $4,19 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ K}^{-1}$; $c_p^{\text{пар}}$ – теплоємність пари води, $1,96 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ K}^{-1}$;

Якщо прийняти початкову температуру води 20 °С, а температуру полум'я 1200 °С, то 1 кг (1 л води) теоретично поглинає наступну кількість тепла: $q_{\text{погл}} = 4,2 \cdot (100 - 20) + 2260 + 1,9 \cdot (1200 - 100) = 4465 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

На практиці в зону горіння попадає не більше за 80% води, нагрівається до температури кипіння біля 90%, переходить в пару не більше за 75%, а в зоні горіння залишається і нагрівається до температури погасання близько 75% пари. Тоді кількість енергії, що поглинається водою під час гасіння, можна оцінити з врахуванням коефіцієнтів втрат:

$$q_{\text{погл}} = 0,7c_p^{\text{рід}}(t_{\text{кип}} - t_o) + 0,55\Delta H_{\text{вип.}} + 0,4c_p^{\text{пар}}(t_{\text{гор}} - t_{\text{кип}}), \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (2.6)$$

Гасіння відбудеться за умови перевищення кількості теплоти, яку поглинула вода в процесі охолодження зони горіння, – потреби у тепловідводі від цієї зони горіння: $q_{\text{погл}} \geq q_{\text{відв}}$.

Питома теоретична витрата вогнегасного засобу для припинення горіння становить: $g_{\text{теор}} = \frac{q_{\text{відв}}}{q_{\text{погл}}}$. Якщо охолоджується зона горіння, то з урахуванням тепловтрат та необхідності знизити T на 200 К, питома витрата води дорівнює:

$$g_{\text{теор}} = \frac{0,1Q_{\text{н}}'}{q_{\text{погл}}}, \text{ л} \cdot \text{кг}^{-1}. \quad (2.7)$$

З урахуванням масової швидкості вигорання горючої речовини та збільшення коефіцієнта поверхні для твердих речовин розраховують теоретично необхідну інтенсивність подавання охолоджуючої вогнегасної речовини на гасіння даної горючої речовини:

$$I_{\text{теор.}} = \frac{v_m K_{\text{п}} g_{\text{теор}}}{60}, \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \quad (2.8)$$

де v_m – масова швидкість вигорання, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}$; $g_{\text{теор}}$ – питома теоретична витрата води на гасіння, $\text{л} \cdot \text{кг}^{-1}$; $K_{\text{п}}$ – коефіцієнт поверхні горіння (відношення площі, що горить, до площі пожежі); 60 – застосовують, якщо v_m взято у $[\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{хв}^{-1}]$.

Коефіцієнт використання води на пожежі $K_{\text{вик.}} = \frac{I_{\text{теор.}}}{I_{\text{факт.}}}$ за умови її

подавання в осередок горіння компактним струменем не перевищує 10 %.

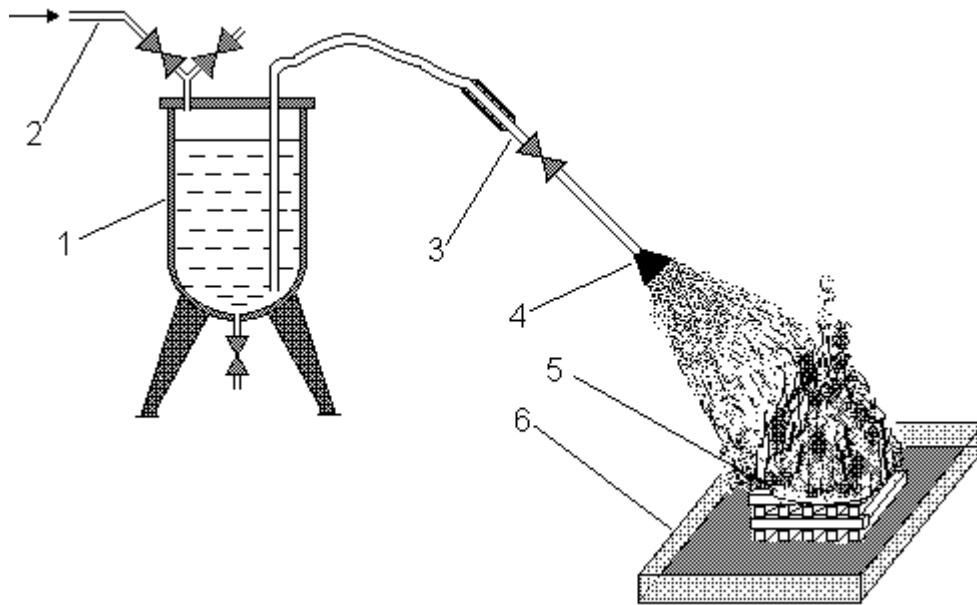
Для *підвищення вогнегасної ефективності води* застосовують два методи: зміна фізичних характеристик водяних струменів та хімічна модифікація водних розчинів. Ці методи реалізують наступними способами: 1) *розпилений струмінь* має більшу поверхні контакту води з нагрітим середовищем, тому вода швидше випаровує та залишається в зоні гасіння; 2) додавання *змочувачів* знижує поверхневий натяг, що підвищує здатність води проникати в пори горючого матеріалу, а під час розпилювання забезпечує утворення більш дрібних краплин (додають незначну кількість піноутворювача); 3) додавання *згушувачів* гальмує стікання води і збільшує дальність компактних струменів (карбоксиметилцелюлоза, поліакрилова кислота тощо); 4) додавання *антифризів* знижує температуру замерзання (мінеральні солі, гліколі); 5) додавання *інгібіторів* горіння, наприклад NaCl (розпилена вода випаровує у полум'ї і замість неї утворюється негорюча пара з вогнегасним аерозолем; 6) просочення целюлозовмісних ТГМ водними розчинами *антипіренів*, які напрямок розкладання речовини у бік меншої кількості або негорючих продуктів розкладання; 7) попереднє нагрівання води прискорює її випаровування і вона залишається у зоні гасіння.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Дослідити механізм припинення горіння охолодженням, визначити способи підвищення вогнегасної ефективності води.

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається із герметичного резервуара, приєднаного до компресора, та магістралі подавання води на гасіння з форсункою. У резервуар поміщають 1 л води або води зі змочувачем. Подавання води на гасіння здійснюється шляхом створення у резервуарі тиску від компресора, що витискає воду на гасіння модельного осередку пожежі класу А. Вода подається через змінну насадку, за допомогою якої формують компактний або розпилений струмінь. Модельний осередок пожежі розміщують на деко, в якому збирається відпрацьована вода.



1 – ємність із водою (або водним розчином); 2 – магістраль подавання стиснутого повітря; 3 – магістраль подавання води; 4 – змінна насадку; 5 – осередок пожежі класу А; 6 – деко

Рисунок 2.3 – Схема лабораторної установки для дослідження механізму припинення горіння охолодженням

Порядок проведення лабораторної роботи Підготовка до проведення дослідів

1. Розрахувати теоретичну інтенсивність подавання води.

1.1 Із довідника керівника гасіння пожежі [8] виписати для заданої горючої речовини значення масової швидкості вигорання v_m , нижчої теплоти згорання Q'_n , нормативної інтенсивності подавання води I_n , температури горіння $t_{гор}$. Викладач допомагає визначити коефіцієнт поверхні K_n для підготовленого модельного осередку пожежі.

1.2 Розрахувати питому теоретичну охолоджуючу здатність води з урахуванням втрат за формулою (2.6).

1.3 Розрахувати питому теоретичну витрату води на гасіння за формулою (2.7).

1.4 Розрахувати теоретичну інтенсивність подавання води за формулою (2.8).

2. Скласти три ідентичних осередки пожежі класу А, визначити площу пожежі для кожного з них.

3. Відміряти і залити в ємність 1 л води. Для першого дослідів на магістралі подавання води встановити насадку для формування компактного струменя.

Проведення досліду

1. Розмістити осередок пожежі на деко і розпалити його. Після охоплення полум'ям всієї поверхні горючої речовини подати стиснуте повітря в ємність із водою.

2. Відкрити кран подавання води і здійснити гасіння пожежі, не залишаючи осередків тління. Час гасіння фіксувати за допомогою секундоміру.

3. Після припинення горіння вимкнути секундомір, закрити кран подавання води, перекрити кран подавання стиснутого повітря і відкрити кран у верхній частині ємності для зменшення надлишкового тиску.

4. Через кран у нижній частині ємності злити залишок води в мірну ємність і визначити кількість води, яка була витрачена на гасіння.

5. Повторити дослід із насадкою для розпиленого струменя; повторити попередні досліди за умов гасіння модельного осередку 2% розчином піноутворювача. Результати занести в таблицю.

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

№	Вогнегасна речовина	$S_{\text{пож}}, \text{ м}^2$	$\tau, \text{ с}$	$V, \text{ л}$	$G, \text{ л} \cdot \text{ м}^{-2}$	$g, \text{ л} \cdot \text{ с}^{-1}$	$I_{\text{факт}}, \text{ л} \cdot \text{ м}^{-2} \cdot \text{ с}^{-1}$	$K_{\text{вик}} = \frac{I_{\text{теор}}}{I_{\text{факт}}}$	$K_{\text{втр}} = \frac{I_{\text{факт}}}{I_{\text{н}}}$

6. Розрахувати для проведених дослідів параметри пожежогасіння: загальну та питому витрати води під час гасіння, фактичну інтенсивність подавання, коефіцієнт використання, коефіцієнт втрат.

7. У висновку проаналізувати вплив різних способів подавання води на ефективність гасіння пожежі класу А та шляхів збільшення вогнегасної здатності води.

Контрольні запитання

1. Механізм припинення горіння охолодженням.
2. Параметри припинення горіння шляхом охолодження зони горіння і поверхні горючої речовини.
3. Характеристики охолоджуючих вогнегасних засобів.
4. Особливості води як охолоджуючого вогнегасного засобу.
5. Шляхи підвищення вогнегасної здатності води.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ ІЗОЛЮВАННЯМ

Теоретична частина роботи

Одним із методів припинення горіння є зниження тепловиділення в зоні реакції. Зниження тепловиділення можна досягти за рахунок зменшення концентрацій компонентів горючої суміші в зоні горіння. Одним із способів досягнення цього є ізоляція горючої речовини або окисника від зони реакції. Принципово, для припинення горіння достатньо знизити швидкість надходження одного з компонентів до рівня, при якому тепловиділення, внаслідок хімічної реакції, стане менше тепловіддачі в навколишнє середовище.

У практиці пожежогасіння для припинення горіння використовуються наступні *види ізолюючих вогнегасних речовин*: рідкі (піна, в деяких випадках вода, гелі); газоподібні (продукти вибуху при гасінні газонафтових фонтанів); тверді листові матеріали (азбоцементні листи, повстяні й інші покривала з негорючих тканин); тверді сипучі (пісок, вогнегасні порошки спеціального призначення).

Найчастіше для пожежогасіння використовують повітряно-механічні піни. Пінам властива агрегативна і термодинамічна нестійкість, що призводить до їх руйнування. Переважно це пов'язано із руйнівною дією сил поверхневого натягу. Тому однією з умов стійкого піноутворення є зменшення поверхневого натягу рідкої фази за рахунок додавання поверхнево-активних речовин (ПАР).

Молекули ПАР мають, рис. 2.4, довгу неполярну частину (**a**, гідрофобна, нерозчинна у воді) і коротку полярну (**b**, гідрофільна, розчинна у воді). Полярна частина розташовується у воді, а неполярна частина – виштовхується у газове середовище (наприклад, у повітря). Тому молекули ПАР у водному розчині накопичуються на поверхнях між водою та газовим середовищем з утворенням мономолекулярного шару (гідрофобна частина молекули розташовується над поверхнею води, гідрофільна – у воді і забезпечує зниження її поверхневого натягу). Частина молекул ПАР залишається у розчиненому стані в об'ємі води.

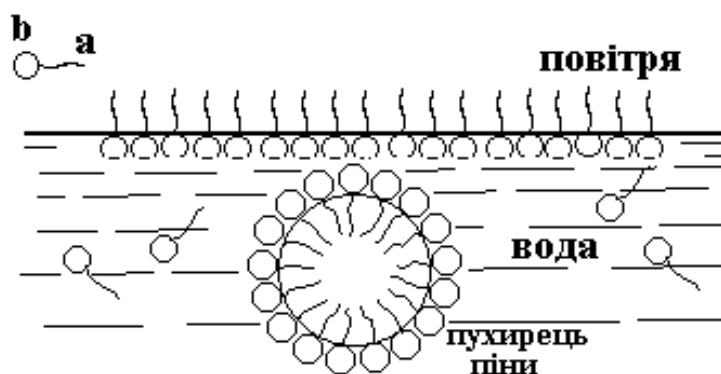


Рисунок 2.4 – Утворення мономолекулярного шару з молекул ПАР на межі повітря-вода

У разі пропускання газів (наприклад, повітря) через водний розчин ПАР полярні молекули накопичуються і на поверхні бульбашок за аналогічним принципом з утворенням мономолекулярного шару: вуглеводнева частина молекули ПАР виштовхується всередину повітряного пухирця, а гідрофільна група залишається у воді. Тоді повітряні пухирці, знаходячись у воді, оточені подвійним шаром молекул ПАР з прошарком між ними водного розчину.

Піна – це колоїдна система з газоподібної дисперсної фази у рідкому дисперсійному середовищі. Для підвищення стійкості пін в умовах пожежогасіння вводять стабілізуючі добавки, згущувачі, інші спеціальні добавки. Такі складні розчини називають *піноутворювачами* (ПУ). Але властивості піни залежать не тільки від якості піноутворювача, але і від способу її утворення.

Важливими властивостями піни є: кратність, стійкість, ізолююча здатність, дисперсність, в'язкість (здатність розтікатися по поверхні). На ці властивості піни впливають природа горючого матеріалу і піноутворювача, властивості води, способи отримання і подачі піни, умови під час розвитку пожежі.

Кратність піни К – відношення об'єму піни $V_{\text{п}}$ до об'єму розчину, з якого її отримано $V_{\text{розч}}$: $K = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{розч}}}$. Розрізняють піни низької кратності (до

20), середньої – (20–200) та високократні (більше за 200). Кратність піни, утвореної з одного і того ж розчину, в залежності від способу отримання може відрізнятися на кілька порядків. Піна однакової кратності може мати різну структуру, яка залежить від дисперсності піни і товщини плівок рідини між пухирцями піни.

Дисперсність піни – величина, обернено пропорційна діаметру

пухирців: $D = 1/d_{\text{сер}}$. Чим вище дисперсність, тим краще піна, тим більше її стійкість і вище вогнегасна ефективність. Дисперсність піни залежить від умов її отримання.

Стійкість піни S – здатність піни зберігати первинні властивості, вона характеризує опір піни руйнуванню. Стійкість оцінюють за часом напіврозпаду піни, тобто за часом, протягом якого об'єм піни зменшиться наполовину. Стійкість піни обернена до інтенсивності руйнування $I_{\text{руйн}}$:

$$S = \frac{1}{I_{\text{руйн}}}, S = \frac{V_{\text{п}} \cdot \Delta\tau}{V_{\text{руйн}}}, \text{ де } V_{\text{п}} - \text{початковий об'єм піни; } V_{\text{руйн}} - \text{об'єм піни, що}$$

зруйнувався за час $\Delta\tau$. Стійкість піни залежить від її кратності, виду піноутворювача, його концентрації в розчині і структури піни (для звичайних ПУ стійкість піни максимальна за кратності 80–150). Фторовані ПУ нового покоління утворюють низьократну піну, яка майже не руйнується на поверхні вуглеводнів.

Ізолююча здатність піни – здатність піни перешкоджати випаровуванню горючої рідини; виражається часом, протягом якого пара рідини проходить крізь шар піни певної товщини і утворює над цим шаром горючу пароповітряну суміш у концентрації нижньої КМПП. Ізолюючу здатність також можна визначити як найменшу товщину шару піни, над поверхнею якої вже не утворюється ця концентрація, а тому досягається пожежогасіння. Ізолююча здатність піни залежить від її фізико-хімічних властивостей, структури, товщини шару, а також від природи горючої рідини та температури її поверхні.

В'язкість піни – здатність піни розтікатися по певній поверхні. В'язкість піни залежить від її структури і властивостей ПУ, наявності згущувача й інших добавок. В'язкість і вогнегасна здатність піни зростають із збільшенням вмісту згущувача, однак різке збільшення в'язкості піноутворюючих розчинів призводить до погіршення параметрів піноутворення і до зростання енерговитрат на її подавання. Тому оптимальна концентрація згущувача в розчині – 0,1–0,5 %.

Вогнегасні піни найбільш широко використовуються для гасіння пожеж класу В (рідин). Вогнегасна здатність піни обумовлена передусім її здатністю перешкоджати надходженню в зону горіння горючої пари за рахунок того, що коефіцієнт дифузії парів через водяні плівки піни значно менший, ніж у повітрі. Наприклад, швидкість випаровування бензину під шаром піни товщиною 5 см зменшується в 30-40 разів. Крім ізолювання виходу горючих парів, піна надає охолодження поверхні рідини, перешкоджає передачі тепла від факелу полум'я до поверхні горючої

рідини. Однак домінуючим чинником у пожежогасінні пінами є їх ізолююча дія, тому що в більшості випадків гасіння полум'я настає за температури горючої рідини більш високої, ніж їх температура спалаху.

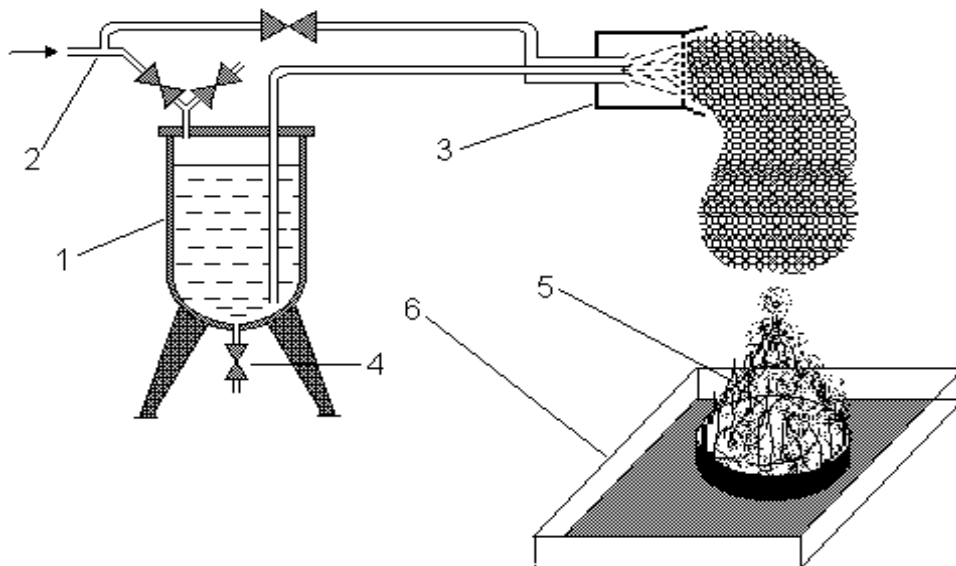
Другим важливим чинником дії піни, особливо для гасіння важкокиплячих рідин, під час горіння яких утворюється гомотермічний прогрітий шар, істотне значення має охолодження поверхні рідини водою, яка складає основну масу піни. Охолодження зменшує швидкість випаровування рідини, концентрацію пари в зоні горіння, швидкість хімічної реакції та її тепловиділення. Кінцевим результатом загальної дії піни є зниження температури зони горіння до температури погасання. Більшу охолоджуючу дію має низькократна піна з високим вмістом води, меншу – легка високократна піна з малим вмістом води.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Дослідити механізм припинення горіння ізолюванням, визначити вплив інтенсивності подавання повітряно-механічної піни на ефективність гасіння.

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається з резервуара місткістю 1 л, приєднаного до компресора, і магістралей подавання повітря та розчину з лабораторним генератором піни. Повітря від компресора водночас подається на резервуар та на генератор піни, витискає розчин піноутворювача з резервуара у піногенератор, де на дрібній сітці утворюється піна. Магістралі подавання повітря обладнані кранами для регулювання подавання повітря в резервуар та на піногенератор. На кришці резервуара розташовано також кран для зменшення надлишкового тиску після проведення досліду. В нижній частині резервуара розташовано кран для зливання залишку розчину піноутворювача після проведення досліду. Регулюючи подачу стиснутого повітря у резервуар і піногенератор, змінюють інтенсивність подавання і кратність піни. Модельний осередок пожежі розміщують на деку, в який може потрапляти частина відпрацьованого розчину піноутворювача.



1 – ємність із розчином ПУ; 2 – магістраль подачі повітря; 3 – піногенератор; 4 – зливний кран; 5 – осередок пожежі; 6 – деко

Рисунок 2.5 – Схема лабораторної установки для дослідження механізму припинення горіння ізолюванням

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення дослідів

1. Підготувати розчин піноутворювача у кількості 1 л у нормативній концентрації і залити в резервуар.

2. В ємність, яка імітує осередок пожежі, налити воду рівнем 3-4 см. Вільний борт повинен бути достатньої висоти (не менше 5 см), щоб вмістити піну для припинення горіння (осередок пожежі слід розміщувати в деко).

3. Визначити площу пожежі за площею «дзеркала» ємності з горючою рідиною.

4. Перевірити працездатність системи на утворення піни. Шляхом регулювання подачі стиснутого повітря, домогтися стійкого піноутворення, після чого частину піни набрати в ємність відомого об'єму для визначення стійкості і кратності. Стійкість піни визначають за часом напіврозпаду, час за який об'єм піни зменшується наполовину; кратність піни – за співвідношенням об'єму піни до об'єму розчину піноутворювача, який виділиться після повного руйнування піни.

5. Після перевірки працездатності системи злити розчин піноутворювача в мірну ємність, в разі необхідності – долити, заповнити заново резервуар для вогнегасної речовини визначеним об'ємом розчину піноутворювача.

6. На випадок нештатної ситуації підготувати допоміжні засоби пожежогасіння (наприклад, кришку, яка відповідає ємності з горючою рідиною, і вогнегасник).

Проведення досліду

1. В ємність, яка моделює осередок пожежі, на підготовлений шар води долити 40-50 мл водонерозчинної горючої рідини з густиною, меншою, ніж у води, (наприклад, бензин), і відразу запалити.

2. Увімкнути подачу стиснутого повітря і провести гасіння піною модельного осередку пожежі. Зареєструвати час гасіння від моменту подавання піни до моменту припинення горіння на всій площі осередку пожежі. Спостерігати за руйнуванням піни під час гасіння на поверхні рідини та біля стінок ємності.

3. Після припинення горіння вимкнути подачу стиснутого повітря, злити розчин піноутворювача, що залишився, визначити його витрату. Повторити дослід, змінюючи інтенсивність подавання піни шляхом регулювання кранів на магістралях подавання повітря від компресора. Результати занести в таблицю.

4. Розрахувати параметри пожежогасіння: загальну та питому витрати розчину піноутворювача, фактичну інтенсивність подавання, коефіцієнт використання, коефіцієнт втрат. Результати занести в таблицю.

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

№	Вогнегасна речовина	S _{пож} , м ²	τ, с	V, л	g, л·с ⁻¹	G, л·м ⁻²	I _{факт.} , л·м ⁻² ·с ⁻¹	K _{втр} = $\frac{I_{\text{факт}}}{I_{\text{н}}}$

5. За результатами дослідів побудувати графік залежності часу гасіння від інтенсивності подачі піни і графік залежності витрати розчину піноутворювача від інтенсивності подавання повітряно-механічної піни.

6. Зробити висновок про фактори, що впливають на ефективність гасіння пожежі повітряно-механічною піною, оптимальні та критичні режими пожежогасіння.

Контрольні запитання

1. Класифікація ізолюючих вогнегасних засобів.
2. Механізм припинення горіння методом ізолювання.
3. Механізм припинення горіння порошками спеціального призначення.

4. Фізико-хімічні основи утворення стійких пін.
5. Роль поверхнево-активних речовин в утворенні пін.
6. Механізм припиненні горіння повітряно-механічними пінами.
7. Класифікація вогнегасних пін.
8. Способи утворення вогнегасних пін.
9. Властивості вогнегасних пін.
10. Процеси, які відбуваються під час припинення горіння повітряно-механічними пінами.
11. Область застосування вогнегасних пін, переваги піни над водою, як вогнегасним засобом.
12. Ізолююча здатність піни, чинники, що її визначають.
13. Кратність піни, вплив кратності на ізолюючу здатність піни.
14. Стійкість повітряно-механічної піни, чинники, що її визначають.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ МЕТОДОМ РОЗБАВЛЕННЯ

Теоретична частина роботи

Одним із методів припинення полум'яного горіння є метод розбавлення зони горіння негорючими газами. Якщо до горючої суміші додавати негорючий газ, то концентрація горючої речовини й окисника буде зменшуватись. Це призведе до зниження швидкості реакції окиснення:

$$\omega_{\text{хр}} = k\varphi_{\text{гр}}^m\varphi_{\text{ок}}^n \exp\left(-\frac{E_{\text{акт}}}{RT}\right),$$

що, у свою чергу, зменшує інтенсивність

тепловиділення, а тому і температуру в зоні горіння: $q_{\text{ТВ}} = V_{\text{Гс}} Q_{\text{Н}}\omega_{\text{хр}}$, де $V_{\text{Гс}}$ – об'єм горючої системи; $Q_{\text{Н}}$ – теплота згоряння; $\omega_{\text{хр}}$ – швидкість хімічної реакції. За критичної концентрації розріджувача температура в зоні горіння зменшиться до температури погасання, що приведе до припинення горіння. Така суміш не займається навіть від потужного джерела запалювання.

Розріджувач можна подавати і в горючу речовину. Наприклад, під час гасіння водорозчинних рідин – кетонів, спиртів і ефірів – можна використати метод їх розведення водою до негорючих концентрацій.

Для об'ємного пожежогасіння частіше використовують *газові негорючі розріджувачі* – діоксид карбону CO_2 , азот N_2 , аргон Ar , водяну пару H_2O , а також димові або вихлопні гази. На перебіг реакції горіння у такій газовій суміші, крім концентрації негорючого газу, великий вплив надають його теплофізичні параметри – теплоємність і теплопровідність: негорючий газ, крім зниження концентрації компонентів горючої суміші,

забезпечує також втрати тепла від зони горіння та охолоджує її. Частина тепла зони горіння йде на нагрівання негорючих газів від початкової температури T_0 до температури зони горіння $T_{гор}$ пропорційно їх теплоємності: $Q_{нагр} = V_{нг} \rho_{нг} c_{р\ нг} (T_{гор} - T_0)$, кДж, де $V_{нг}$, $\rho_{нг}$ – об'єм, m^3 , густина, $кг \cdot m^{-3}$, $c_{р\ нг}$ – масова теплоємність негорючого газу, $кДж \cdot кг^{-1} \cdot K^{-1}$. Чим вище теплоємність c_p негорючих газів, тим більшу кількість тепла вони можуть поглинути, а, отже, тим вище буде їх загальна вогнегасна дія і меншу кількість негорючих газів необхідно вводити для гасіння.

Крім відбору тепла за рахунок теплоємності газу, температура може змінюватися за рахунок теплопровідності суміші, що визначає рівняння Фур'є: $q = -\lambda \frac{dT}{dx}$. Підвищення коефіцієнта теплопровідності λ посилює

тепловідвод від зони реакції горіння, як, наприклад, у разі застосування гелію. Однак, збільшення коефіцієнта теплопровідності прискорює прогрів підготовчої зони фронту полум'я, тому швидкість поширення полум'я і температура зони горіння при цьому зростають, а вогнегасна дія негорючого газу знижується.

У такому разі комплексним теплофізичним параметром, що характеризує вогнегасну ефективність негорючих газів, є *показник ефективності* $N_{ef} = C_p / \lambda$. Чим вище значення N_{ef} , тим вище вогнегасна ефективність негорючого газу.

Отже, у разі введення негорючих газів в зону горіння відбувається одночасно зменшення інтенсивності тепловиділення за рахунок зменшення швидкості хімічної реакції та збільшення інтенсивності тепловіддачі внаслідок поглинання тепла масою введених газів. При певному розбавленні температура зони горіння стає меншою за температуру погасання $T_{пог}$, суміш стає негорючою, горіння припиняється.

При гасінні пожеж методом розбавлення газу-розріджувачі можна застосовувати кількома способами; негорючі газу подають:

- у повітряний простір – для флегматизації і припинення горіння в закритих технологічних апаратах і приміщеннях малих і середніх об'ємів;
- у зону горіння – для гасіння речовин, що горять на відкритому просторі.
- у горючу речовину – для зниження інтенсивності та температури горіння при підготовці гасіння іншим методом або для запобігання запалювання продукту, що виходить із технологічної установки.

Не рекомендується застосовувати газове пожежогасіння для волокнистих, сипучих пористих і матеріалів, всередині яких можливе

тління; для пірофорних матеріалів; для речовин, здатних окиснюватися без доступу повітря. Внаслідок високої температури горіння металів – для гасіння пожеж класу D з типових негорючих газів застосовують лише Ar; а CO₂ підтримує горіння горючих металів з утворенням карбідів; N₂ взаємодіє з горючими металами (Mg, Al, Li тощо) з утворенням нітридів та азидів – речовин, що розкладаються з вибухом (наприклад, азид свинцю – ініціююча вибухова речовина).

Негорючі гази використовують не тільки для припинення горіння, але і для запобігання горінню в замкнених об'ємах. Запобігання утворення горючого середовища в газовому просторі за допомогою розріджувачів або інгібіторів горіння називають *флегматизацією*. Флегматизацію широко застосовують для забезпечення безаварійної роботи обладнання, під час пуску та зупинки апаратів, де можуть виникнути вибухонебезпечні концентрації горючих речовин.

Запобігання пожеж і вибухів в устаткуванні з горючими газами, пилом, горючими рідинами засновано на створенні всередині апаратів або приміщень середовища, що не підтримує горіння. При введенні в газоповітряну суміш негорючих газів область запалювання звужується – нижня КМПП зростає, а верхня знижується. За деякої кількості флегматизатора верхня і нижня межі сходяться біля значення стехіометричної концентрації, створюючи точку флегматизації. Таку концентрацію негорючого газу називають флегматизуючою, рис. 2.6.

Флегматизуюча концентрація – це найменша концентрація негорючого газу в суміші з горючою речовиною та киснем, за якої суміш стає нездатною до поширення полум'я при будь-якому співвідношенні горючого й окисника. Флегматизуючу концентрацію розраховують на підставі теплоти утворення ΔH_f^0 та внесків хімічних елементів горючої речовини:

$$\varphi_{\text{фл}} = 100 \cdot \frac{h_f' \cdot \Delta H_f^0 + h_{\text{ф}}' + \sum h_j' \cdot m_j}{h_{\text{ф}}'' - 1 + \sum h_j'' \cdot m_j}, \% \quad (2.9)$$

де j , m_j – вид та кількість атомів даного виду в молекулі горючої речовини ГР; h_j' і h_j'' – коефіцієнти j -го типу атома ГР для даного флегматизатора, додаток Л.

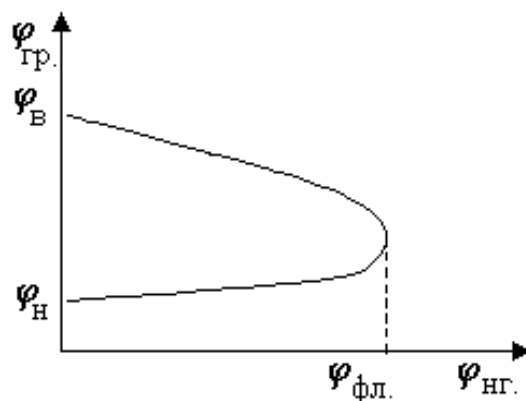


Рисунок 2.6 – Залежність концентраційних меж поширення полум'я від концентрації негорючого газу

Виходячи із величини флегматизуючої концентрації, можна розрахувати *мінімальну вибухонебезпечну концентрацію кисню* $\varphi_{\text{МВКК}}$:

$$\varphi_{\text{МВКК}} = \frac{100 - \varphi_{\text{фл.}}}{4,84}, \% . \quad (2.10)$$

Але за зміни умов (збільшення потужності джерела запалювання, підвищення температури чи тиску в системі) мінімальна вибухонебезпечна концентрація кисню може зменшуватися, тому для забезпечення гарантованих умов пожежовибухобезпеки розраховують *безпечну концентрацію кисню* $\varphi_{\text{без}}$:

$$\varphi_{\text{без}} = 1,2\varphi_{\text{МВКК}} - 4,2 , \% . \quad (2.11)$$

Чим більш ефективним є вогнегасний засіб, тим менше значення мінімальної флегматизуючої концентрації, а отже при більш високому значенні концентрації кисню не може виникнути горіння.

Флегматизація – один із широко застосовуваних методів запобігання виникнення процесу горіння. Значення флегматизуючих концентрацій використовують для розрахунку запасів вогнегасної речовини для протипожежного захисту об'єктів. Негорючі газу знаходять широке застосування при гасінні пожеж в приміщеннях. При розрахунку параметрів гасіння пожежі з допомогою негорючих газів вирішують дві задачі: 1) за допустимим часом гасіння визначають необхідну витрату вогнегасного засобу; 2) за витратою негорючих газів визначають час гасіння – на створення вогнегасної концентрації в об'ємі, що захищається.

На практиці горіння припиняється за *вогнегасної концентрації* – найменшої концентрації негорючого газу, достатньої для припинення горіння. Вогнегасна концентрація залежить від природи негорючого газу, виду горючої речовини, умов гасіння, часу розвитку пожежі. Оскільки вогнегасна концентрація завжди менша, ніж флегматизуюча концентрація, то в розрахунках зручніше використовувати саме флегматизуючу концентрацію.

Для розрахунку часу гасіння за заданої витрати подавання негорючого газу та з урахуванням витікання негорючого газу з приміщення даного об'єму через нещільності використовують формулу:

$$\tau_{\text{гас}} = \frac{V_{\text{прим}}}{g_{\text{нг}}^{\text{под}}} \ln \frac{100}{100 - \varphi_{\text{вогн}}}, \text{ с.}$$

На підставі часу гасіння для даної витрати

подавання розраховують необхідний об'єм або масу негорючого газу для гасіння пожежі в даному приміщенні:

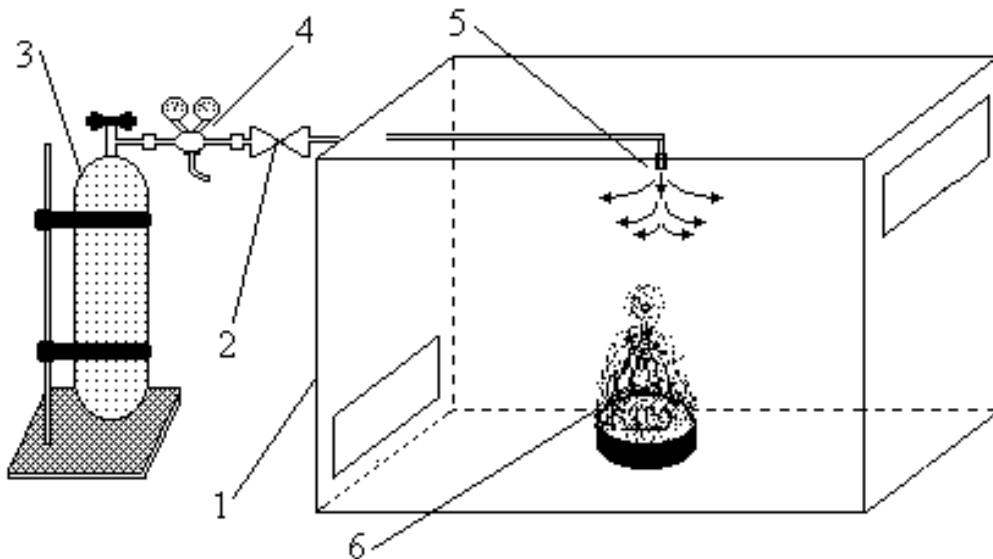
$$V_{\text{нг}} = g_{\text{нг}}^{\text{под}} \cdot \tau_{\text{гас}} = V_{\text{прим}} \ln \frac{100}{100 - \varphi_{\text{вогн}}}, \text{ м}^3; m_{\text{нг}} = V_{\text{прим}} \rho_{\text{нг}} \ln \frac{100}{100 - \varphi_{\text{вогн}}}, \text{ кг. (2.12)}$$

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Дослідити механізм припинення горіння негорючими газами, визначити вплив параметрів подачі негорючого газу на ефективність гасіння.

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається із модельного приміщення в якому у верхній частині розташовано магістраль подавання негорючого газу від балону (зазвичай – з CO₂), яка обладнана краном і вихідною насадкою. Тиск в системі подачі негорючого газу регулюють за допомогою редуктора на підставі показань манометрів. Установка передбачає можливість під'єднання газоаналізаторів для реєстрування зміни вмісту у повітряному середовищі модельного приміщення CO, CO₂, O₂ – внаслідок пожежі та подавання негорючого газу.



1 – модельне приміщення; 2 – кран подачі негорючого газу; 3 – балон із негорючим газом; 4 – редуктор; 5 – вихідна насадка; 6 – осередок пожежі

Рисунок 2.7 – Схема установки для дослідження механізму припинення горіння розведенням

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення дослідів

Підготовка до проведення дослідів передбачає проведення розрахунку основних параметрів пожежогасіння з використанням негорючого газу в даному модельному приміщенні з отриманням очікуваного часу гасіння.

1. Розрахувати флегматизуючу концентрацію для заданого флегматизатора за формулою (2.9); величину теплоти утворення горючої речовини ΔH_f^0 обрати за довідником [3]; для зручності заповнити таблицю (за додатком 16):

Вид атому, j	Число атомів, m_j	Значення коефіцієнтів	
		h'_j	h''_j

2. Розрахувати мінімальну вибухобезпечну концентрацію кисню (формула (2.10)).

3. Розрахувати безпечну концентрацію кисню за формулою (2.11).

4. Визначити об'єм модельного приміщення і розрахувати об'єм флегматизатора, що необхідний для гасіння пожежі в ньому за відсутності відкритих отворів (газообмін кризь нещільності) за формулою (2.12).

5. Розрахувати питому масову витрату флегматизатора $g_{\text{НГ}}^m$ в залежності від діаметру трубопроводу, тиску в з врахуванням питомої газової сталої:

$$R_{\text{пит}} = \frac{R}{\mu_{\text{НГ}}}, \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}; \quad g_{\text{НГ}}^m = S_{\text{отв}} \cdot P \cdot \sqrt{\frac{1}{R_{\text{пит}} T} \cdot \frac{2k}{k+1} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1},$$

де R – універсальна газова стала, $\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; $\mu_{\text{НГ}}$ – молярна маса негорючого газу, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$; k – коефіцієнт адіабати негорючого газу; $S_{\text{отв}}$ – діаметр вихідного отвору, м^2 ; P – тиск в системі подачі негорючого газу, Па ; T – температура, К .

6. Розрахувати густину флегматизатора за даних умов:

$$V_{\mu} = 22,4 \cdot \frac{101,3 \cdot T}{273 \cdot P} \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1}, \quad \rho = \frac{\mu_{\text{НГ}}}{V_{\mu}}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

7. Розрахувати теоретичний час гасіння: $\tau_{\text{гас}} = \frac{V_{\text{НГ}} \cdot \rho}{g_{\text{НГ}}^m}, \text{ с}.$

8. Зважити балон із негорючим газом і приєднати до магістралі подавання.

Проведення досліду

1. В ємність, яка моделює осередок пожежі, спочатку налити воду – рівнем

3-4 см, а зверху 30-40 мл горючої рідини. Осередок пожежі поміщають в модельне приміщення у центр підлоги і негайно запалюють. Увага! У разі затримання запалювання в модельному приміщенні може утворитись вибухонебезпечна концентрація парів горючої речовини.

2. Закрити всі отвори в модельному приміщенні, відкрити вентиль балону з негорючим газом, за допомогою редуктора встановити заданий тиск в системі подачі газу, відкрити кран подачі газу і запустити секундомір. Під час гасіння можна вимірювати зміну концентрації CO , CO_2 , O_2 .

3. В момент припинення горіння зупинити секундомір, зафіксувати фактичний час гасіння $\tau_{\text{гас факт}}$.

4. Закрити кран подачі негорючого газу. Від'єднати балон, зважити на технічних вагах із точністю ± 1 г і визначити фактичну масу негорючого газу, яка витрачена на гасіння $m_{\text{нг факт}}$.

5. Наступні досліди здійснюють, змінюючи значення тиску в системі подачі негорючого газу. Для повторного проведення досліду витягують осередок горіння із модельного приміщення, приміщення вентилують, в разі необхідності доливають горючу рідину.

6. По закінченні дослідів розраховують фактичну масову і об'ємну вогнегасну концентрацію негорючого газу в приміщенні на підставі фактичного часу гасіння та розрахованої масової витрати газу на гасіння, а також за результатами зважування балона за формулами:

$$\varphi'_{\text{факт}} = \frac{m_{\text{нг факт}}}{V_{\text{прим}}}, \text{Г}\cdot\text{М}^{-3}, \varphi_{\text{факт}} = \varphi'_{\text{факт}} \frac{V_{\mu}}{10\mu_{\text{нг}}}, \%$$

7. Зробити висновок про вплив параметрів подачі негорючого газу на ефективність гасіння пожежі; обґрунтувати можливу різницю у розрахованому та фактичному часі гасіння, флегматизуючої концентрації негорючого газу та вогнегасної; охарактеризувати зміну концентрацій CO, CO₂, O₂ у газовому середовищі модельного приміщення під час гасіння пожежі.

Контрольні запитання

1. Механізм припинення горіння негорючими газами.
2. Механізм флегматизації газового простору.
3. Флегматизуюча та вогнегасна концентрації негорючого газу.
4. Вогнегасна ефективність флегматизаторів, показник ефективності вогнегасної дії різних флегматизаторів
5. Фактори, що впливають на ефективність флегматизації.
6. Параметри газового пожежогасіння, флегматизуюча концентрація.
7. Переваги та недоліки використання флегматизаторів.
8. Особливості застосування газоподібних флегматизуючих засобів
9. Типи флегматизуючих вогнегасних засобів.
10. Обмеження застосування флегматизуючих вогнегасних засобів.

Лабораторна робота

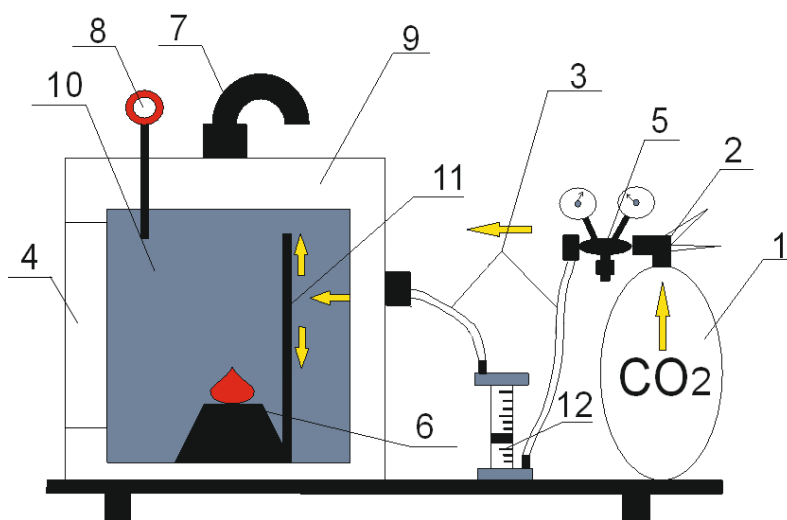
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ В ОГОРОДЖЕННІ НЕГОРЮЧИМ ГАЗОМ

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Дослідити процес гасіння пожежі в огороженні негорючим газом, визначити вплив параметрів газообміну на ефективність гасіння.

Опис лабораторної установки

Установка призначена для дослідження механізму гасіння пожежі в огороженні негорючими газами за умови різних параметрів газообміну, рис. 2.8. Основною частиною установки є камера горіння (модельне приміщення) з системою відводу продуктів горіння та магістраллю подавання флегматизатора, а також отворами з засувками, які можуть працювати на приплив повітря та відвід продуктів горіння, що дозволяє змінювати інтенсивність газообміну в камері під час моделювання пожежі. Установка працює наступним чином: з ємності під тиском до камери з осередком полум'яного горіння надходить флегматизатор, що регулюється редуктором. Передня стіна камери виконана з вогнетривкого скла для можливості спостережень за процесом гасіння. В камеру вмонтовано термопару для контролю температури пожежі.



1 – балон з флегматизатором; 2 – вентиль; 3 – трубопровід; 4 – отвір для притоку повітря із засувкою; 5 – редуктор; 6 – горюча речовина; 7 – отвір для відводу продуктів горіння; 8 – датчик температури; 9 – камера горіння; 10 – термостійке скло; 11 – екран; 12 – ротаметр

Рисунок 2.8 – Установка для дослідження гасіння пожежі в огороженні методом флегматизації (стрілки показують подавання негорючого газу)

Установка дозволяє використовувати в якості флегматизатора – діоксид карбону, азот, аргон тощо. Під час введення негорючого газу в зону горіння, крім зниження концентрації компонентів горючої суміші, відбувається також втрата частини тепла на нагрівання цього розріджувача від початкової температури до температури зони горіння.

Проведення дослідів

У даній лабораторній роботі використано найбільш ефективний газ-флегматизатор діоксид карбону CO_2 . У якості осередку полум'яного передбачено застосовувати парафінову свічку. Досліджується припинення горіння за витрати подавання CO_2 60, 80 та 100 л/хв, а також удвох режимах газообміну: 1) усі отвори закриті; 2) усі отвори відкриті. Швидкість подавання негорючого газу встановлюється за показаннями ротаметру. Зміну температури фіксують за допомогою мультиметру DT-838 у комплекті з термопарами. Під час досліджень реєструють час з моменту початку подавання CO_2 в модельне приміщення до моменту припинення горіння. Додатково реєструють максимальну температуру в камері та температуру в момент гасіння. Для отримання достовірних результатів передбачено проводити по 2 паралельні дослідів.

Обробка результатів досліджень

Результати проведених досліджень представити у вигляді графічних залежностей часу гасіння від зміни інтенсивності надходження газу-флегматизатора як для ізольованого приміщення, так і за наявності газообміну з навколишнім середовищем.

Зробити висновки про те який вплив чинять відкриті отвори на процес гасіння пожежі в огороженні негорючим газом; як змінюється час гасіння при збільшенні швидкості надходження флегматизаторів в об'єм приміщення; яка динаміка зміни температури пожежі під час гасіння. Наприклад, робиться висновок, що припинення горіння у разі закритих вентиляційних отворів (режим газообміну № 1) відбувається швидше ніж у разі відкритих отворів (режим газообміну № 2).

Контрольні запитання

1. Механізм припинення горіння негорючими газами?
2. Вогнегасна ефективність флегматизаторів, показник ефективності вогнегасної дії різних флегматизаторів?
3. Фактори, що впливають на ефективність флегматизації?
4. Параметри газового пожежогасіння, флегматизуюча концентрація?
5. Переваги та недоліки використання флегматизаторів?

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ МЕТОДОМ ХІМІЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ РЕАКЦІЇ

Теоретична частина роботи

В процесі полум'яного горіння вуглеводнів взаємодія між горючою речовиною й окисником відбувається за розгалуженим ланцюговим механізмом через стадію утворення *активних центрів полум'я* (АЦП) – це атоми, молекули чи радикали, які мають енергію більшу, ніж енергія активації хімічної системи. Розгалуженими є такі реакції, в яких при взаємодії одного активного центра з валентнонасиченою молекулою утворюється два і більше нових АЦП. Внаслідок протікання таких реакцій, концентрація АЦП різко збільшується, швидкість реакції зростає, дифузія АЦП у холодну горючу суміш ініціює поширення горіння. АЦП при взаємодії один з одним, з нейтральними частинками, з поверхнями можуть втрачати енергію і ставати неактивними. У цьому випадку відбувається обрив ланцюга і зниження швидкості ланцюгової реакції. Тому загальна швидкість ланцюгової реакції має три складових: $\omega_{л.р.} = \omega_{ініціації} + \omega_{розгалуж.} - \omega_{обриву(загибелі\ АЦП)}$.

Якщо швидкість обриву ланцюга стане більшою за швидкість утворення АЦП, сумарна швидкість ланцюгової реакції почне зменшуватися, знизиться й інтенсивність тепловиділення, а температура в зоні горіння стане менше за температуру погасання. Цього можна досягти, якщо в зону реакції ввести *інгібітори* – речовини, які взаємодіють з АЦП, і при цьому утворюються неактивні продукти, що мають велику енергію активації. Але процеси горіння, які протікають не за радикальним механізмом, а за механізмом прямого окиснення (гетерогенне горіння карбону або металів), не інгібуються.

Кількість інгібітора, яку необхідно ввести в зону реакції для припинення горіння, дуже мала – 2–3 %. Отже концентрації компонентів горючої суміші, теплофізичні параметри суміші (теплоємність і теплопровідність) при цьому практично не змінюються і можна вважати, що інтенсивність тепловіддачі залишається постійною. Тому з точки зору теплової теорії погасання припинення горіння під дією інгібуючих вогнегасних засобів відбувається внаслідок різкого зниження інтенсивності тепловиділення за рахунок збільшення енергії активації системи, що призводить до різкого зменшення швидкості реакції горіння.

Інгібуючі вогнегасні засоби можуть бути газоподібними, рідкими (хладони), твердими дисперсними (вогнегасні порошки, аерозолеутворюючі вогнегасні склади). Всі вони використовуються для об'ємного пожежогасіння.

Хладони (галони) – це галогенпохідні насичених вуглеводнів, в яких атоми гідрогену заміщені повністю або частково атомами галогенів; їх вогнегасна ефективність підвищується при заміщенні в них атома гідрогену на атом галогену в наступній послідовності: $F \leq Cl \ll Br < I$.

Враховуючи дефіцитність і високу вартість йодпохідних, на практиці застосовують бромпохідні вуглеводнів. При введенні фтору в молекулу хладону його стабільність навпаки – зростає, знижуються горючість, токсичність і корозійна активність. Більш ефективними і зручними для застосування є бром-, фтор- похідні метану й етану. З подібних сполук найбільш широке застосування знайшли хладони 13B1, 12B1, 114B2. Все більш широко використовуються й нові, альтернативні хладони із меншим озоноруйнівним ефектом і токсичністю, такі як: 22B1, 124B1, 116, 125, 218, 227, СЕА-410, СЕА-614.

Механізм вогнегасної дії хладонів полягає у вилученні із зони реакції АЦП за рахунок їх взаємодії з молекулами галогенвуглеводнів або з радикалами, які утворюються при розкладанні хладонів в зоні горіння.

Механізм інгібування хладонами визначається наступними реакціями:

Таблиця 2.1 – Типові реакції гомогенного інгібування

$C_2F_4Br_2 + H^* = HBr + C_2F_4Br^*$ $C_2F_4Br^* + H^* = HBr + C_2F_4^*$	утворення nereакційноздатної молекули HBr та малоактивного радикала
$HBr + H^* = H_2 + Br^*$ $HBr + OH^* = H_2O + Br^*$	утворення nereакційноздатної молекули та відновлення інгібітору
$Br^* + HO_2^* = HBr + O_2$	утворення nereакційноздатних молекул

Отже, інгібування пов'язане із загибеллю легких і високоактивних радикалів H^* , OH^* і HO_2^* . При цьому утворюються негорючі продукти, а також відбувається заміна первинних АЦП менш активними атомами галоїдів або їх похідними. З однієї молекули хладону утворюється кілька проміжних продуктів, які інтенсивно взаємодіють з АЦП, призводячи до їх загибелі.

При надходженні в горючу систему навіть невеликої кількості хладону у вуглеводнів різко звужуються КМПП. Вогнегасні концентрації більшості хладонів на порядок менші, ніж у негорючих газів. Більш

ефективно хладони впливають на багаті суміші. Тому для підвищення їх вогнегасної ефективності горючу суміш бажано перевести в область збагачення або знизити концентрацію окисника розбавленням горючої системи негорючим газом. З підвищенням вмісту кисню у повітрі витрата хладонів різко зростає.

Хладони (фреони), як галогенпохідні, руйнують озоновий шар Землі, тому заборонені для масового використання. Тому у якості інгібуючих засобів гасіння пожеж зазвичай використовують порошкові склади.

Вогнегасні порошки – це тонко подрібнені мінеральні солі з добавками проти злежування і комкування та для текучості під час подавання, наприклад, додають діоксид кремнію (аеросил) у кількості 1,5-2,5%.

Поширеними інгібіторами горіння є вогнегасні *порошки загального призначення*, які використовують для гасіння пожеж класів А, В, С, у тому числі електроустаткування. Їх подають в зону полум'яного горіння у вигляді розпиленої вогнегасної хмари. Головним їх компонентом є солі металів, здебільшого карбонати та бікарбонати натрію, фосфати амонію, натрію та калію, хлорид калію тощо. Вогнегасні кількості порошоків є на порядок меншими за витрати води чи флегматизатору на гасіння. Це означає, що головним механізмом дії порошоків є не охолодження та розведення, а інгібування.

Також існують вогнегасні *порошки спеціального призначення* – для гасіння металів і металоорганічних сполук, тобто пожеж класу D, а також тліючих пожеж підкласу А1. Ці порошки подають на розжарену поверхню матеріалу, що горить, де вони плавляться і утворюють ізолюючу плівку.

Застосовують *комбіновані порошкові склади* з порошоків загального та спеціального призначення, а тому підходять для гасіння пожеж усіх класів.

Таким чином, вогнегасні порошки мають *ряд переваг*: висока вогнегасна ефективність (малі витрати на гасіння); універсальність – застосовують для гасіння пожеж усіх класів; зберігається ефективність під час гасіння пожеж за від'ємних температур; не пошкоджують матеріал, що горить; більшість вогнегасних порошоків значно менш токсична, ніж хладони чи піноутворювачі.

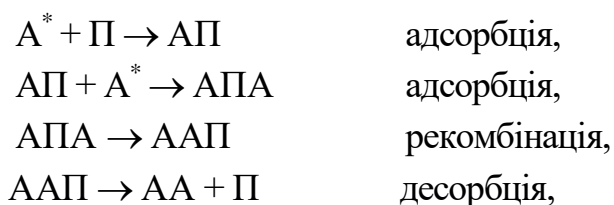
Разом з тим вогнегасні порошки мають і *недоліки*: схильність до зволоження, злежування і комкування, що погіршує здатність порошоків транспортуватися по трубопроводах і утворення вогнегасної хмари; обмежена дальність польоту струменя (з лафетних стволів – 20–25 м).

Вогнегасна дія порошку обумовлена сукупністю механізмів: *гомогенне інгібування* хімічних реакцій в полум'ї внаслідок розкладання порошку та *гетерогенне інгібування* на поверхні частинок; *охолодження* зони горіння за рахунок нагрівання і розкладання матеріалу порошку;

розбавлення зони горіння продуктами розкладання порошку; екранування (ізолювання) порошком теплового потоку від полум'я до поверхні горючої речовини; ізолювання поверхні горючої речовини шляхом утворення на ній плівки, яка перешкоджає надходженню в зону горіння продуктів піролізу та обмежує доступ кисню повітря до зони гетерогенного горіння. Тобто, механізм інгібування є основним, але не єдиним під час пожежогасіння порошками. Так, солі металів у складі порошку мають великі теплоємність та теплоти плавлення, випаровування і розкладання, тому суттєво охолоджують зону горіння; велика кількість газів, що утворюються під час газифікації солей, флегматизують горючу суміш.

Механізм інгібування залежить від дисперсності порошку; для ефективного гасіння бажано забезпечити *гомогенне інгібування*, як більш ефективне, що досягається для дрібнодисперсних порошків. При цьому відбувається взаємодія з АЦП газоподібних «уламків», які утворюються в зоні горіння при випаровуванні і розкладанні частинок порошку: $Me + OH^* + П \rightarrow MeOH + П$, де Me – атом лужного металу; MeOH – гідроксид металу; П – тверда поверхня. Інгібування полум'я полягає у видаленні із зони горіння радикалів водню і гідроксилу з утворенням води: $MeOH + OH^* \rightarrow H_2O + MeO$, а також $MeOH + H^* \rightarrow H_2O + Me$. Згідно пероксидній теорії під час *гомогенного інгібування* вільні атоми металів з неспареними електронами, що утворюються під час розкладання солей металів порошку, реагують з пероксидними проміжними сполуками у полум'ї і виводять їх із процесу горіння: $Me^{\bullet} + ROO^{\bullet} \rightarrow ROOMe$; $Me^{\bullet} + RO^{\bullet} \rightarrow ROMe$; $Me^{\bullet} + R^{\bullet} \rightarrow RMe$.

Окрім гомогенного, йде й *гетерогенне інгібування* на поверхні великих частинок за рахунок зіткнень АЦП з їх поверхнею, що відводить значну частину енергії від АЦП за механізмом: адсорбція \rightarrow рекомбінація \rightarrow десорбція. Після адсорбції АЦП на поверхні порошку, вони диспропорціонують – реагують одна з одною: $R^{\bullet} + RO^{\bullet} \rightarrow ROR$. Тобто, АЦП, стикаючись між собою, рекомбінують і утворюють нейтральну молекулу, яка покидає поверхню частинки порошку за рахунок десорбції, що описує схема:



де A^* – АЦП; П – поверхня частинки порошку; АА – неактивна молекула.

Зменшення розміру частинок підвищує вогнегасну ефективність порошку. Так, для частинок бікарбонату натрію < 10 мкм вогнегасна

концентрація в 2 рази менше, ніж у частинок 15–30 мкм. Однак для порошоків, що застосовують на практиці, розмір частинок повинен бути не менше за 30 мкм, оскільки за більшої дисперсності посилюється комкування, погіршуються експлуатаційні властивості, ускладнюється доставка у зону горіння. Але частинки >30 мкм вже не встигають розкладатися, тому гомогенне інгібування в газовій фазі стає слабким.

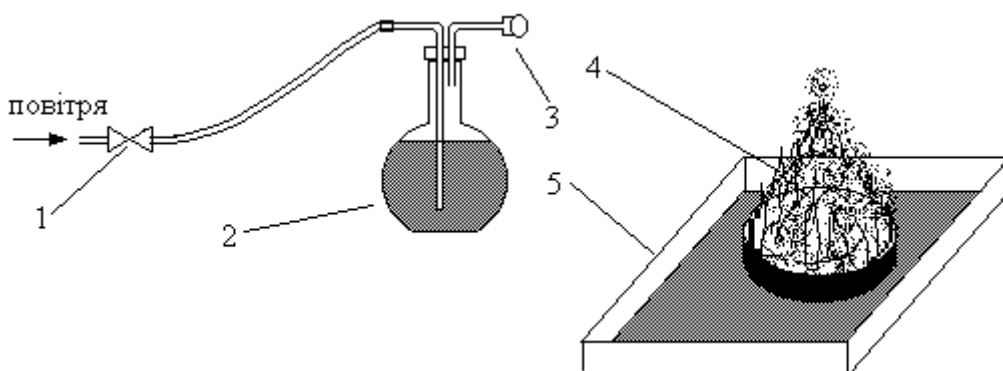
На відміну від газоподібних інгібіторів, дію яких послаблюють зворотні реакції, гетерогенні інгібітори універсальні по відношенню до всіх АЦП, а процес рекомбінації носить незворотний характер. Вогнегасна ефективність деяких порошоків вища, ніж бромхлоридів. У склад порошоків загального призначення та у вогнегасні аерозолі для створення ефекту інгібування вводять атоми лужних металів. Однак ефективність порошкового пожежогасіння суттєво залежить від способу подавання порошку в осередок полум'яного горіння, зокрема – від ефективності охоплення полум'я вогнегасною хмарою порошку водночас.

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Дослідити механізм припинення горіння інгібуванням, визначити особливості використання вогнегасних порошоків.

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка складається із ємності з розпилюючою системою (пульверизатор), яка приєднана до магістралі стиснутого повітря. Стиснуте повітря, проходячи крізь шар порошку у ємності, захоплює його частинки і спрямовує у розпилювач з утворенням струменю та вогнегасної хмари.



1 – кран подачі повітря; 2 – ємність із вогнегасним порошком; 3 – розпилювач;
4 – осередок пожежі; 5 – деко

Рисунок 2.9 – Схема лабораторної установки для дослідження механізму припинення горіння вогнегасним порошком

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення дослідів

1. Насипати в ємність (пульверизатор) вогнегасний порошок і зважити систему на вагах із точністю $\pm 0,5$ г.

2. Приєднати ємність із розпилювачем до магістралі стиснутого повітря.

3. Налити в ємність – модельний осередок пожежі класу В – воду та долити водонерозчинну горючу рідину - 30-40 мл; розташовувати ємність в деко. На випадок нештатної ситуації готують допоміжні засоби пожежогасіння – наприклад, металевий лист за розміром модельного осередку та вогнегасник.

Проведення дослідів

1. Запалити ємність із горючою рідиною.

2. Подати стиснуте повітря у пульверизатор, струсити його для розпушування порошку, провести гасіння, намагаючись створити порошкову хмару над усім осередком пожежі. Відлік часу гасіння здійснюють з моменту подачі порошку до припинення горіння, фіксують $\tau_{\text{гас}}$.

3. Після припинення горіння зважити пульверизатор із вогнегасним порошком, визначити масу порошку, що було витрачено на гасіння.

4. Розрахувати фактичні загальну G і питому g витрати, інтенсивність подавання вогнегасного порошку I на гасіння модельного осередку пожежі, коефіцієнт втрат під час використання порошку, результати занести в таблицю.

Таблиця результатів дослідів (зразок оформлення)

№	Вогнегасна речовина	$S_{\text{пож}}, \text{ м}^2$	$\tau_{\text{гас}}, \text{ с}$	Маса порошку, м, г	$g, \text{ г} \cdot \text{ с}^{-1}$	$G, \text{ г} \cdot \text{ м}^{-2}$	$I_{\text{факт}}, \text{ г} \cdot \text{ м}^{-2} \cdot \text{ с}^{-1}$	$K_{\text{втр}}$

5. Дослід повторюють кілька разів (різні оператори гасіння). Роблять висновок про особливість використання вогнегасних порошоків для гасіння пожежі.

Контрольні запитання

1. Механізм припинення горіння інгібуванням.
2. Гомогенне інгібування.
3. Гетерогенне інгібування.

4. Особливості використання хладонів, їх переваги та недоліки.
5. Особливості використання вогнегасних порошків, їх переваги та недоліки.

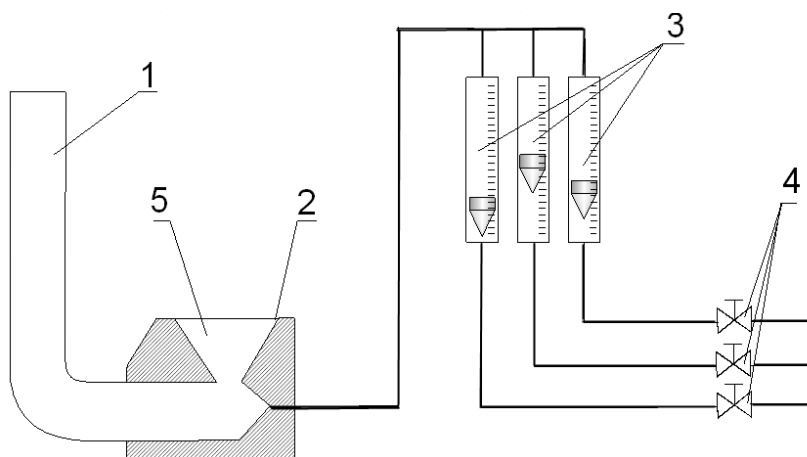
Лабораторна робота ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ПОЛУМ'Я ВОГНЕГАСНИМИ ПОРОШКАМИ

Експериментальна частина роботи

Мета роботи: Дослідити вогнегасну здатність різних порошків за умови розпилювання у полум'ї.

Опис лабораторної установки

Досліджується вогнегасна дія різних порошків під час розпилювання у полум'я пальника. Дослідження вогнегасної здатності порошків у лабораторних умовах проводиться на установці, схему якої наведено на рис. 2.10.



1 – пальник Бунзена; 2 – ежектор; 3 – ротаметри; 4 – регулюючі крани; 5 – лійка ежектора

Рисунок 2.10 – Схема установки для дослідження пожежогасіння порошками загального призначення

До комплекту установки входить апаратура: терези аналітичні з ціною поділу не більше 0,0001 г; установка (рис. 2.10) для дослідження вогнегасної здатності порошків, яка складається зі скляного пальника (внутрішній діаметр $14,0 \pm 0,1$ мм, зовнішній – $17,2 \pm 0,1$ мм, металічного

ежектора для подачі вогнегасних порошків; ротаметрів для контролю подавання газоподібних речовин (горючого газу, повітря, а також азоту або кисню); балона з горючим газом з редуктором; повітряного компресора (або побутовий пілосос з режимом подавання повітря).

Порядок проведення лабораторної роботи

Підготовка до проведення досліду

1. Отримати від викладача зразки досліджуваних порошків; зважити задану кількість порошків для дослідів з точністю до 0,0001 г.

2. Увімкнути вентиляцію, потім компресор, відповідним вентиляем відрегулювати необхідну витрату подавання повітря.

Проведення досліду

1. За командою викладача відкрити вентиль на газовому балоні.

2. Відкрити газовий кран подачі горючого газу в ежектор зі скляним пальником; електричною запальничкою підпалити горючу газову суміш, що виходить зі скляного пальника.

3. Вентилем на ротаметрі відрегулювати необхідну (вказану викладачем) витрату горючого газу.

4. Швидко висипати підготовлену порцію порошку у воронку ежектора.

5. Візуально зафіксувати ефект дії хмари порошку на факел полум'я; якщо полум'я не згасло, через 1 хв. висипати інший порошок і зафіксувати його вплив на полум'я; якщо полум'я згасло, швидко перекрити кран подачі горючого газу; для наступного досліду подати горючий газ та підпалити суміш не раніше, ніж через 1 хв. Увага! Після припинення горіння обов'язково слід перекривати кран подачі горючого газу, запобігаючи його накопиченню у приміщенні.

6. Повторити дослід для усіх досліджуваних порошків.

7. Для одного з порошків, який має вогнегасну здатність, провести серію дослідів з різною масою порошку; визначити мінімальну масу наважки, яка гасить полум'я; величина, обернену мінімальній вогнегасній масі, приймають за вогнегасну ефективність порошку. Результати досліджень занести у таблицю.

Таблиця результатів досліду (зразок оформлення)

№	Назва порошку	Витрата, л/хв.		Кількість порошку, г	Примітка
		повітря	газу		

8. Після закінчення досліджень перекрити кран подачі газу, закрити вентиль на газовому балоні, відключити компресор і прибрати робоче місце.

9. Зробити висновок про вогнегасну здатність досліджуваних порошків.

Контрольні запитання

1. Які речовини називаються вогнегасними?
2. Перерахувати вимоги до вогнегасних речовин.
3. Як умовно поділяються вогнегасні речовини за домінуючою ознакою їх дії?
4. Що пояснює припинення горіння водою? Основний і додаткові механізми дії.
5. Що пояснює припинення горіння хімічними та повітряно-механічними пінами? Основний і додаткові механізми дії.
6. Припинення горіння інертними газами, основний і додаткові механізми дії?
7. Що пояснює припинення горіння хладонами? Основний і додаткові механізми дії.
8. Чим пояснюється припинення горіння вогнегасними порошками? Основний і додаткові механізми дії.
9. До якого класу сполук відносяться речовини, які складають основу порошкових вогнегасних засобів? Навести приклади речовин.
10. Які речовини і з якою метою додають до порошкових вогнегасних засобів?
11. Будова установки для вивчення вогнегасної дії порошкових вогнегасних засобів.
12. Порядок дій під час виконання лабораторної роботи для вивчення вогнегасної дії порошкових вогнегасних засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тарахно О.В., Трегубов Д. Г., Жернокльов К. В., Коврегін В. В. Основні положення процесу горіння. Виникнення процесу горіння. Х.:НУЦЗУ, 2020. 408 с.
2. Тарахно О.В., Жернокльов К.В., Трегубов Д.Г. Методичні рекомендації до курсу «Теорія розвитку та припинення горіння». Х.: НУЦЗУ, 2013. 222 с.
3. Трегубов Д.Г., Тарахно О. В., Мінська Н. В., Гапон Ю. К. Теорія процесів горіння, вибуху та пожежогасіння: практикум. Х.: НУЦЗ України, 2024. 422 с.
4. Трегубов Д.Г., Дадашов І.Ф., Мінська Н.В., Гапон Ю.К., Чиркіна М.А. Фізико-хімічні основи розвитку та гасіння пожеж горючих рідин. Х.: НУЦЗ України, 2023. 230 с.
5. Тарахно О.В. Жернокльов К.В., Баланюк В.М. Лабораторний практикум з курсу «Теорія розвитку та припинення горіння». Харків: АЦЗУ, 2004. 193 с.
6. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. К.: УкрНДНЦ, 2020. 87 с.
7. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 78 с.
8. Сенчихін Ю.М., Тарахно О.В. та ін. Довідник керівника гасіння пожежі. К.: УНДЦЗ, 2017. 195 с.
9. Трегубов Д.Г., Гапон Ю.К. Робочий зошит з «Теорії розвитку та припинення горіння». Ч.: НУЦЗ України, 2025. 60 с.
10. Сировий В.В., Сенчихін Ю.М., Лісняк А.А., Дерев'янка І.Г. Основи тактики гасіння пожеж: навч. посіб. Х.: НУЦЗУ, 2015. 216 с.
11. Шаршанов А.Я., Рябова І.Б. Термодинаміка і теплопередача у цивільній безпеці: навч. посіб. Х.: НУЦЗ України, 2013. 380 с.
12. Glassman I., Yetter R.A., Glumac N.G. Combustion. 5th Edition. London: Academic Press, 2014. 773 p.
13. Struchtrup H. Thermodynamics and Energy Conversion. Switzerland: Springer, 2024. 704 p.
14. Coon J. W., Till R. C. Fire Protection: Detection, Notification, and Suppression. Switzerland: Springer, 2019. 205 p.
15. Виникнення і розвиток горіння та вибуху. Припинення горіння / Г.І.Слагін, Є. О. Тищенко, А. Г. Алексеев, В. М. Нуянзін, А. О. Майборода. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України 2020. 434 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця 1 – Об’ємна ентальпія продуктів горіння за постійного тиску

Температура, К	Ентальпія, кДж·м ⁻²							
	Повітря	CO ₂	H ₂ O	N ₂	HF	HCl	HBr	SO ₂
298,15	386,44	417,23	442,22	386,88	383,76	1605,98	3415,89	1990,63
400	519,41	596,16	596,16	519,41	515,84	1738,51	3548,87	3518,97
600	786,26	992,86	910,75	783,58	776,44	2000,45	3811,69	3933,51
800	1064,70	1434,18	1246,32	1058,01	1038,82	2267,74	4083,89	4865,68
1000	1354,75	1906,29	1603,75	1344,49	1305,22	2545,29	4366,8	5109,04
1200	1655,07	2399,38	1984,83	1641,23	1577,8	2832,66	4660,87	5358,32
1400	1963,41	2908,97	2387,77	1946,01	1857,65	3128,96	4963,41	5861,22
1600	2278,00	3450,17	2809,91	2257,03	2145,47	3433,29	5273,99	6370,82
1800	2597,06	3958,06	3249,44	2572,51	2440,88	3743,86	5589,92	6885,77
2000	2920,13	4493,98	3704,60	2892,01	2742,08	4060,24	5911,65	7405,18
2200	3246,77	5034,36	4168,23	3211,51	3046,43	4376,62	6231,15	7922,80
2400	3576,08	5579,65	4647,03	3536,81	3358,32	4700,58	6559,57	8445,78
2600	3863,45	6127,62	5135,21	3863,01	3673,36	5027,67	6892,01	8978,58
2800	4241,86	6679,61	5632,31	4190,54	3992,86	5358,77	7217,32	9511,83
3000	4578,31	7233,38	6138,33	4520,30	4316,82	5695,67	7563,14	10046,85
3200	4916,11	7788,93	6651,05	4850,96	4642,57	6026,77	7901,83	10586,35
3400	5255,24	8347,17	7170,46	5182,51	4970,99	6364,12	8244,09	11127,18
3600	5596,16	8907,18	7696,12	5515,84	5302,99	6704,15	8587,24	11672,91
3800	5938,42	9468,54	8227,13	5849,17	5637,22	7045,96	8933,51	12221,78
4000	6281,57	10031,68	8764,84	6183,85	5972,78	7389,56	9281,12	12771,08

Константи розрахунку концентраційних меж поширення полум'я за стехіометричним коефіцієнтом реакції горіння:

$$\varphi_{H(B)} = \frac{100}{a \cdot \beta + b}, \%$$

де β – стехіометричний коефіцієнт реакції горіння;

a, b – константи для нижньої і верхньої КМПП:

Параметр		a	b
Нижня КМПП		8,684	4,679
Верхня КМПП	$\beta \leq 7,5$	1,550	0,560
	$\beta > 7,5$	0,768	6,554

Коефіцієнти для визначення концентраційних меж поширення полум'я за хімічною структурою молекули горючої речовини:

$$\varphi_{H(B)} = \frac{100}{\sum_{\mu=1}^s h_s m_s}, \%$$

де h_s – коефіцієнт для s -го структурного зв'язку;

m_s – число s -их зв'язків в структурній формулі речовини.

Вид зв'язку	h_s	
	нижня КМПП	верхня КМПП
$C - C$	3,75	-0,84
$C = C$	11,10	0,24
$C - H$	4,47	1,39
$C - O$	0,90	-1,40
$C = O$	3,12	1,31
$C - N^3$	2,27	-1,17
$C - Cl$	0,71	0,71
$O - H$	0,52	1,25
$N - H$	1,90	0,69
$N - N$	13,84	13,84
$C \cdots C$ аром.	7,36	0,89

Коефіцієнт K_j перерахунку показників експлозиметра на тип та вміст горючої речовини у повітрі

Горюча речовина	K_j	Горюча речовина	K_j
1. Бензин Б-70	1,5-2,8	10. Нефрас С3-80/120	1,4-2,8
2. Ацетон	0,9-1,8	11. Ізопропіловий спирт	1,1-1,9
3. Ацетилен	0,9-1,9	12. Етилен	0,7-1,3
4. Бензол	1,4-2,1	13. Етилацетат	0,8-2,0
5. Водень марки А	0,65-1,2	14. Етанол (ректифікат)	1,0-1,6
6. Діетиловий ефір	1,2-1,9	15. Пропилен	0,8-2,0
7. Метан	1	16. Пропан	1,0-2,0
8. Метанол	0,8-1,4	17. Пентан	0,8-2,1
9. Нефрас А63/75	1,4-2,4		

Коефіцієнти для визначення температури самоспалахування окремих класів органічних сполук

$$t_{cc} = a \cdot t_{cc}^{алк} + b$$

Сполуки	a	b
Спирти	0,6796	121,2
Сполуки з групою – NH ₂	0,4722	170,4
Ароматичні сполуки	0,6412	252,9
Форміати	0,7719	81,5
Ацетати	0,7909	52,0
Пропіонати	0,7158	91,3
Кислоти	0,7556	86,0

Залежність температури самоспалахування спиртів від ефективної довжини карбонового ланцюга

$l_{\text{сер}}$	t_{cc}	$l_{\text{сер}}$	t_{cc}	$l_{\text{сер}}$	t_{cc}	$l_{\text{сер}}$	t_{cc}
2,0	464	4,4	337	6,8	272	9,2	245
2,1	463	4,5	333	6,9	270	9,3	244
2,2	461	4,6	326	7,0	269	9,4	243
2,3	459	4,7	326	7,1	267	9,5	243
2,4	457	4,8	322	7,2	266	9,6	241
2,5	455	4,9	319	7,3	264	9,7	241
2,6	452	5,0	315	7,4	263	9,8	240
2,7	448	5,1	312	7,5	262	9,9	240
2,8	443	5,2	309	7,6	261	10,0	239
2,9	438	5,3	306	7,7	260	10,5	236
3,0	433	5,4	304	7,8	258	11,0	234
3,1	423	5,5	301	7,9	257	11,5	233
3,2	420	5,6	299	8,0	256	12,0	232
3,3	413	5,7	296	8,1	255	12,5	232
3,4	405	5,8	294	8,2	254	13,0	231
3,5	396	5,9	291	8,3	253	13,5	231
3,6	385	6,0	289	8,4	252	14,0	230
3,7	376	6,1	287	8,5	251	14,5	230
3,8	369	6,2	284	8,6	250	15,0	229
3,9	361	6,3	282	8,7	249	15,5	229
4,0	355	6,4	280	8,8	248	16,0	228
4,1	350	6,5	278	8,9	247	16,5	228
4,2	346	6,6	276	9,0	246	17,0	227
4,3	341	6,7	274	9,1	246	17,5	227

Залежність температури самоспалахування парафінових вуглеводнів
(алканів) від ефективної довжини карбонового ланцюга

$l_{\text{цеп}}$	t_{cc}	$l_{\text{цеп}}$	t_{cc}	$l_{\text{цеп}}$	t_{cc}	$l_{\text{цеп}}$	t_{cc}
3,0	470	6,1	232	9,1	208	12,1	204
3,1	465	6,2	231	9,2	208	12,2	204
3,2	460	6,3	230	9,3	208	12,3	204
3,3	455	6,4	229	9,4	207	12,4	204
3,4	450	6,5	228	9,5	207	12,5	204
3,5	444	6,6	227	9,6	207	12,6	204
3,6	439	6,7	226	9,7	207	12,7	204
3,7	433	6,8	225	9,8	206	12,8	204
3,8	426	6,9	224	9,9	206	12,9	204
3,9	420	7,0	223	10,0	206	13,0	204
4,0	413	7,1	222	10,1	206	13,1	204
4,1	407	7,2	221	10,2	206	13,2	204
4,2	400	7,3	221	10,3	206	13,3	204
4,3	392	7,4	220	10,4	205	13,4	204
4,4	381	7,5	219	10,5	205	13,5	203
4,5	370	7,6	218	10,6	205	13,6	203
4,6	358	7,7	217	10,7	205	13,7	203
4,7	344	7,8	216	10,8	205	13,8	203
4,8	328	7,9	216	10,9	205	13,9	203
4,9	308	8,0	215	11,0	205	14,0	203
5,0	287	8,1	214	11,1	205	14,1	203
5,1	274	8,2	213	11,2	205	14,2	203
5,2	262	8,3	213	11,3	205	14,3	203
5,3	255	8,4	212	11,4	205	14,4	203
5,4	249	8,5	211	11,5	205	14,5	203
5,5	244	8,6	211	11,6	204	14,6	203
5,6	240	8,7	210	11,7	204	14,7	203
5,7	238	8,8	210	11,8	204	14,8	203
5,8	236	8,9	209	11,9	204	14,9	203
5,9	235	9,0	234	12,0	204	16,0	202
6,0	234						

Коефіцієнти функціональних груп для визначення температурних меж поширення полум'я за структурою молекули

$$t_{H(B)} = a_0 + a_1 \cdot t_{\text{кип}} + \sum a_j l_j ,$$

для НТМПП $a_0 = -62,40^\circ\text{C}$; $a_1 = 0,655$

для ВТМПП $a_0 = -41,43^\circ\text{C}$; $a_1 = 0,723$

l_j – число зв'язків j -го типу.

вид зв'язку	$a_j, ^\circ\text{C}$		вид зв'язку	$a_j, ^\circ\text{C}$	
	t_H	t_B		t_H	t_B
<i>C-C</i>	-0,909	-1,158	<i>C-N</i>	-2,14	0,096
<i>C=C</i>	-2,66	-4,64	<i>N-H</i>	6,53	6,152
<i>C-H</i>	-0,009	0,57	<i>O-H</i>	19,75	17,8
<i>C-O</i>	0,11	1,267	<i>C=O</i>	5,57	5,58
<i>C ... C аром</i>	-0,733	-0,767			

Константи гомологічних рядів для визначення температурних меж поширення полум'я .

$$t_{н(в)} = k \cdot t_{кип} - l, \text{ } ^\circ\text{C}$$

де k , l – коефіцієнти гомологічних рядів; $t_{кип}$ – температура кипіння рідини.

Гомологічний ряд	Константи НТМПП		Константи ВТМПП	
	k	l	k	l
Нормальні алкани	0.6957	73.8	0.7874	50.3
2-Метилалкани	0.6885	74.9	0.7900	52.2
Нормальні алкени-1	0.6867	74.5	0.7976	49.5
1-Фенілалкани	0.6751	70.2		
Нормальні жирні спирти	0.5746	33.7	0.6928	15.0
Ізоалкілкарбіноли	0.6582	44.1	0.7278	21.5
Складні ефіри мурашиної кислоти	0.5359	47.6	0.6050	25.0
Складні ефіри оцтової кислоти	0.5940	50.9	0.7761	40.8
Первинні нормальні алкіламіни	0.5004	54.6		

Визначення температури спалаху за гомологічним рядом органічної рідини

$$t_{сп} = a + bt_{кип}$$

Клас речовин	Коефіцієнти	
	a, °C	b
Алкани	-73,22	0,693
Алкени	-60	0,64
Алкананіліни	-21,94	0,553
Алканфеноли	-38,42	0,623
Альдегіди	-74,76	0,813
Ароматичні речовини	-67,83	0,665
Бромалкани	-49,56	0,665
Карбонові кислоти	-43,57	0,708
Кетони	-52,69	0,643
Метилалкани	-73,14	0,659
Спирти	-41,69	0,652
Хлоралкани	-55,70	0,631

Константи для визначення температури спалаху

$$t_{\text{сп.}} = a_0 + a_1 \cdot t_{\text{кип.}} + \sum a_j \cdot l_j$$

де $a_0 = -73,14$ °С, $a_1 = 0,659$

l_j – число зв'язків j -го виду.

Вид зв'язку	a_j , °С	Вид зв'язку	a_j , °С
C - C	-2,03	C - Cl	15,11
C - F	3,33	C - Br	19,40
C = C	1,72	C - Si	-4,84
C - H	1,105	Si - H	11,00
C - O	2,47	Si - Cl	10,07
C = O	11,66	N - H	5,83
C - N	14,15	O - N	23,90
C \equiv N	12,13	S - H	5,64
C - S	2,09	P - O	3,27
C = S	-11,91	P = O	9,64
C \cdots C аром	-0,28		

Значення коефіцієнтів для визначення об'ємних концентраційних меж поширення полум'я за хімічним складом горючої речовини

$$\varphi_H = \frac{100}{1 + h_f \Delta H_f^0 + \sum_{j=1}^n h_j m_j + \sum_{s=1}^q h_s m_s}, \%$$

де $h_f = 0,0246 \cdot \text{моль} \cdot \text{кДж}^{-1}$;

ΔH_f^0 – теплота утворення речовини у газоподібному стані, $\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$;

m_j , m_s – число атомів та структурних груп у молекулі.

h_j , h_s – коефіцієнти j -го хімічного елемента та s -ої групи у молекулі.

h_j					h_s	
h_C	h_H	h_O	h_N	h_{Cl}	$h - C \equiv C -$	$h - C \begin{array}{c} \vee \\ O \end{array} C -$
9.134	2.612	-0.522	-0.494	-3.57	7.88	6.50

Значення коефіцієнтів для визначення нижньої масової концентраційної межі поширення полум'я пилю за формулою Шоневальда:

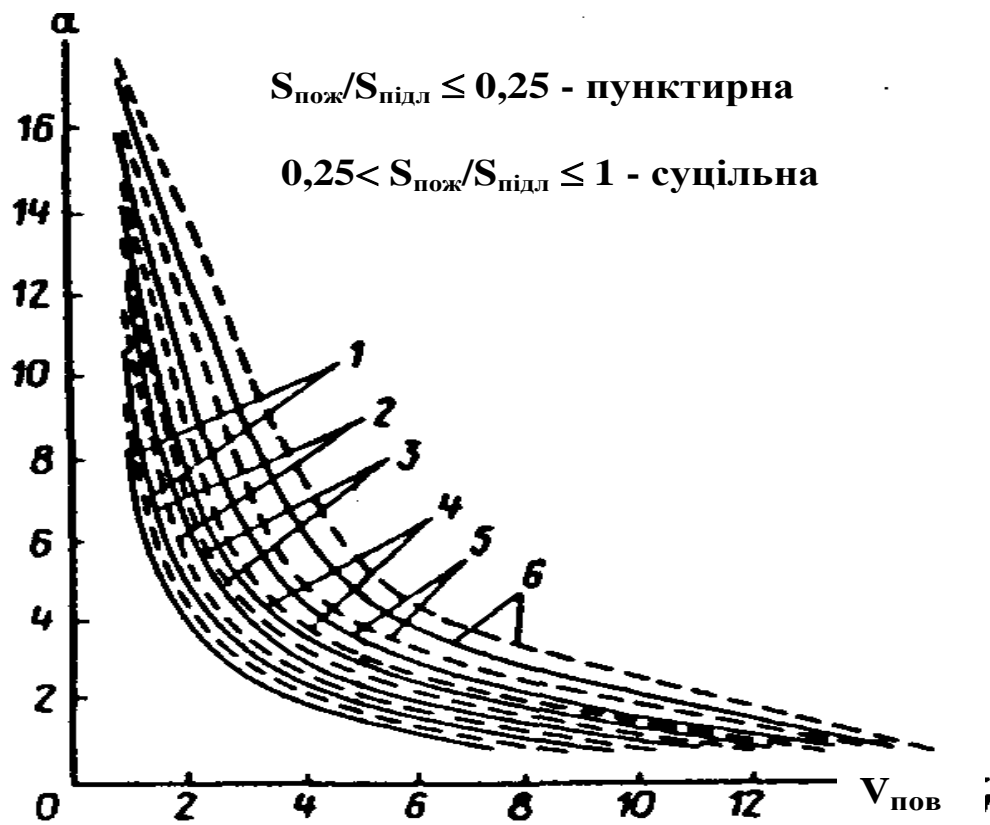
$$\varphi_{\text{н}} = a + \frac{b \cdot 10^6}{Q'_{\text{н}}},$$

де $Q'_{\text{н}}$ – нижча масова теплота згоряння речовини, кДж/кг;

a, b – коефіцієнти походження пилю, значення яких наведено в таблиці:

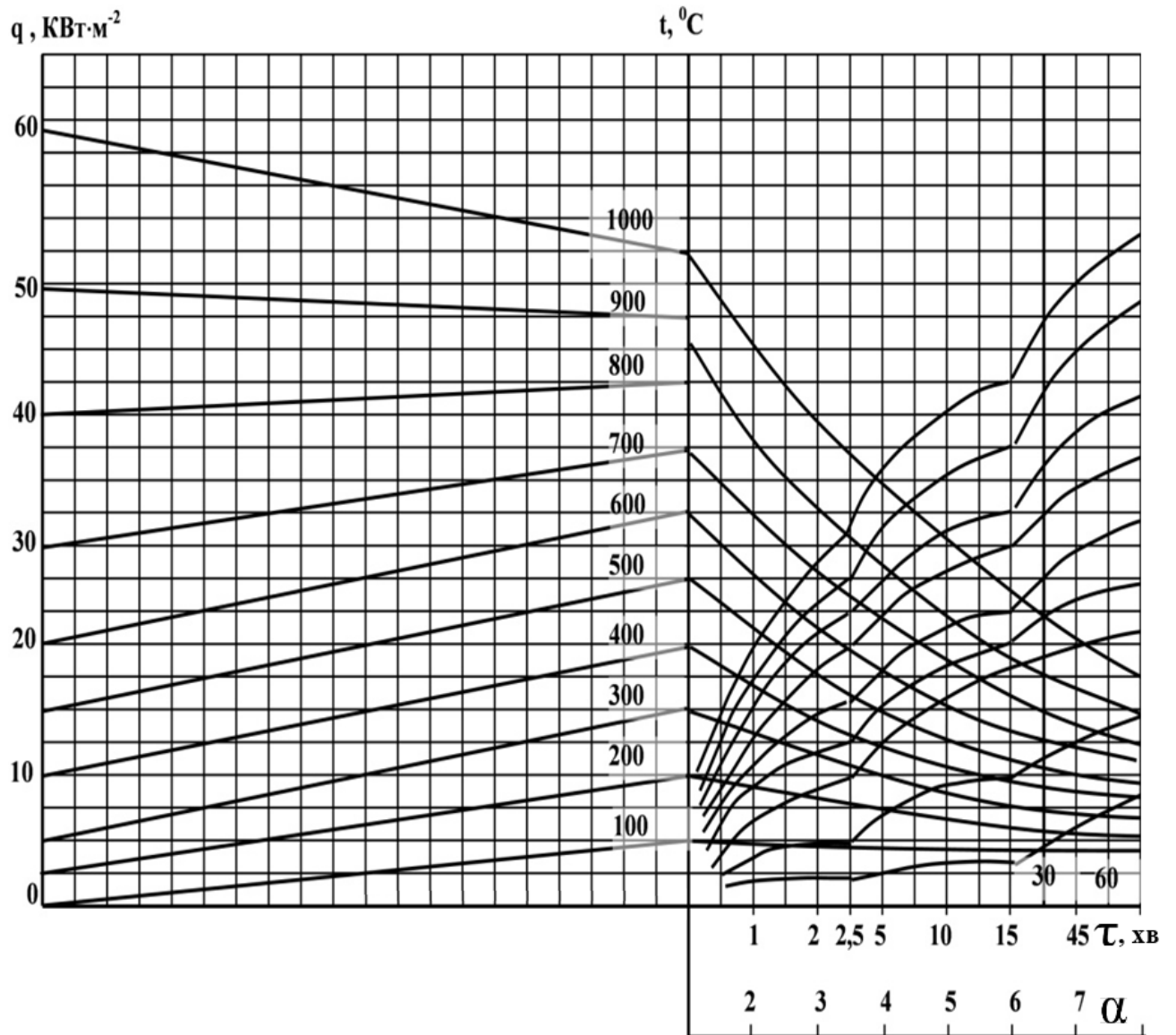
Пил	a	b
технічний	-0,604	1,194
палива	-7,952	1,394
металевий	-1,54	1,132
органічних речовин	-2,524	1,235

Номограма для визначення коефіцієнта надлишку повітря під час пожежі в огороженні



- крива 1 – $S_{\text{припл}}/S_{\text{пож}} < 0,04$;
- крива 2 – $0,04 < S_{\text{припл}}/S_{\text{пож}} < 0,06$
- крива 3 – $0,06 < S_{\text{припл}}/S_{\text{пож}} < 0,10$;
- крива 4 – $0,10 < S_{\text{припл}}/S_{\text{пож}} < 0,17$
- крива 5 – $0,17 < S_{\text{припл}}/S_{\text{пож}} < 0,25$;
- крива 6 – $0,25 < S_{\text{припл}}/S_{\text{пож}}$.

Номограма для визначення температури пожежі.



Коефіцієнти для визначення флегматизуючої концентрації

$$\varphi_{\text{фл}} = 100 \frac{h'_f H_f + h'_\phi + \sum h'_j m_j}{h''_\phi - 1 + \sum h''_j m_j}, \%$$

Коефіцієнти	Значення коефіцієнтів при розведенні суміші		
	N ₂	H ₂ O (пара)	CO ₂
h'_f моль·кДж ⁻¹	$0,865 \cdot 10^{-2}$	$0,802 \cdot 10^{-2}$	$0,736 \cdot 10^{-2}$
h'_ϕ	1,256	0,780	0,584
h'_C	2,528	1,651	1,292
h'_H	0,759	0,527	0,427
h'_O	0,197	0,446	0,570
h'_N	-0,151	-0,147	-0,133
h''_ϕ	2,800	2,236	2,020
h''_C	5,946	5,000	4,642
h''_H	1,486	1,250	1,160
h''_O	-2,973	-2,500	-2,321
h''_N	0	0	0

ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

Адсорбція – поглинання та утримання пари та газів на поверхні твердої речовини за рахунок міжмолекулярної взаємодії.

Аерозоль – це колоїдна система з частинок твердої речовини або крапель рідини, завислих у повітрі (тверда чи рідка дисперсна фаза у газовому дисперсійному середовищі).

Активні центри полум'я – *вільні радикали*, активні молекули, які мають запас хімічної енергії та утворюються на стадіях ланцюгової реакції й беруть у ній участь.

Верхня концентраційна межа поширення полум'я (ВКМПП, φ_v) – найбільша концентрація горючої речовини в суміші з повітрям, за якої *ще* можливе виникнення та поширення горіння.

Вільні радикали – нейтральні частинки з непарним числом електронів на зовнішній електронній оболонці.

Вибух – фізичне або хімічне перетворення речовини з швидким переходом її енергії в енергію стиснення та руху газів.

Вибухова хвиля (ударна хвиля) – це рух середовища під дією вибуху з різким підвищенням у ньому тиску, густини та температури.

Викид – миттєвий перехід у пару води, яка знаходиться у придонному шарі нафтопродукту, з виштовхуванням із резервуара палаючої рідини на значну висоту.

Вимушене запалювання – це виникнення горіння внаслідок дії джерела запалювання на малу частку холодної горючої суміші.

Виникнення горіння – це швидкий перехід повільної окисно-відновної реакції до миттєвого перетворення вихідних речовин у продукти реакції шляхом самоприскорення, що має вибуховий характер та супроводжується спалахом та звуковим ефектом.

Вища теплота згорання – кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості горючої речовини за стандартних умов, а вода у продуктах горіння знаходиться у сконденсованому (рідкому) стані.

Вогнегасна ефективність – величина зворотна часу гасіння або найменшій концентрації вогнегасної речовини, за якої досягається процес припинення горіння.

Вогнегасна концентрація – найменша концентрація вогнегасного засобу в суміші горючої речовини з окисником, достатня для припинення горіння.

Вогнегасні речовини – ті, що впливають на процес горіння і створюють умови для його припинення, або попереджають процес виникнення горіння.

Вогнеперешкоджувач – пристрій у вигляді щілин, сіток, касет, насадок із гранульованого або пористого матеріалу, який розбиває горючу систему на малі об'єми, що різко збільшує площу тепловіддачі та призводить до погасання полум'я всередині пристрою; це запобігає поширенню полум'я у технологічне обладнання та його вибуху.

В'язкість піни – здатність піни не розтікатися по поверхні речовини.

BLEVE, Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion – для скипаючої рідини вибух пари, що розширюється,.

Газообмін – це конвекційний рух газових потоків, що виникає під дією сил, зумовлених градієнтом тиску.

Горіння – складний фізико-хімічний процес з швидкою окислювально-відновною реакцією з інтенсивним виділенням енергії у вигляді тепла і світлового випромінювання.

Горючі рідини (ГР) – мають температуру спалаху в закритому тиглі >61 °С, тому спалахують за короткочасної дії джерела запалювання тільки за їх штучного нагріву.

Джерело запалювання – це тіло, що горить, або розжарене тіло, електричний розряд, які мають енергію і температуру, достатні для запалювання інших речовин.

Дим – це дисперсна система з твердих і рідких частинок розміром $10^5 \div 10^8$ м (дисперсної фази), завислих у газовому дисперсійному середовищі (повітря).

Динамічна рівновага – стан системи, коли кількість рідини, що випаровує, дорівнює кількості сконденсованої пари з утворенням насиченої пари.

Дисперсність (піни, пилу) – величина, обернена до середнього діаметра пухирців *піни* або частинок *аерозолю*.

Енергія активації – це мінімальна енергія, необхідна для ініціювання елементарного акту хімічної реакції.

Загальна витрата вогнегасної речовини – кількість вогнегасної речовини, що було витрачено під час гасіння пожежі на одиницю розрахункового параметра пожежі.

Загальна кількість вогнегасної речовини – кількість вогнегасної речовини, що подається за час гасіння пожежі на загальну площу пожежі або в об'єм приміщення.

Загальні явища на пожежі – ті, що є обов'язковими для кожної пожежі.

Закон Гесса: тепловий ефект хімічної реакції, яка протікає за постійного тиску або постійного об'єму, не залежить від кількості проміжних стадій, а визначається лише вихідним та кінцевим енергетичним станом системи.

Засіб пожежогасіння – речовини або пристрої, які використовуються для припинення горіння на пожежі.

Зона горіння – частина простору, де проходить термічна підготовка горючих речовин (розкладання, плавлення, випаровування) і сам процес горіння. Зона горіння обмежена поверхнею речовин, що горять, і фронтом полум'я дифузійного факела.

Зона задимлення – частина простору, що прилягає до зони горіння, в якій не можливе перебування людей без захисту органів дихання. Зовнішню межу зони задимлення визначають за видимістю, концентрацією отруйних речовин

(небезпечна для життя і здоров'я людини) або за концентрацією кисню у повітрі (менше 16 %).

Зона теплового впливу – частина простору біля зони горіння, де йде теплообмін між зоною горіння та конструкціями або речовинами. Зовнішня межа цієї зони пролягає там, де тепловий вплив викликає зміни у стані матеріалів або створюються умови, які перешкоджають роботі особового складу під час гасіння пожежі (критична температура для людини під час пожежі – 70 °С, густина теплового потоку – 1 кВт/м²).

Ізолююча здатність – здатність піни перешкоджати випаровуванню горючої рідини, виражається часом, протягом якого пара рідини проходить через даний шар піни й утворює над ним пароповітряну суміш, що здатна запалюватися.

Інтенсивність газообміну – кількість повітря, що припливає за одиницю часу до одиниці площі пожежі.

Інтенсивність задимлення – зміна об'єму диму за одиницю часу в одиниці об'єму приміщення.

Інтенсивність подавання – кількість вогнегасного засобу, що подається в одиницю часу на одиницю розрахункового параметра пожежі (фронт, площі пожежі або об'єму приміщення, в якому відбувається пожежа).

Йодне число (J_ч) – число грамів йоду, що приєднається за умов досліджень (або у розрахунках) по місцю ненасичених зв'язків до 100 грамів олії.

Коефіцієнт надлишку повітря (α) – показує, у скільки разів кількість повітря, що дійсно надходить до зони горіння, відрізняється від теоретично необхідної для повного згоряння горючої речовини.

Кратність піни – відношення об'єму піни до об'єму рідини, з якої її отримано.

Критичний час розвитку пожежі – максимальний час перебування людей у приміщенні під час пожежі; визначається часом досягнення критичної температури 70 °С або часом зниження вмісту кисню у повітрі до критичного значення – 16 %.

Ланцюгові процеси горіння – перетворення вихідних речовин у продукти горіння шляхом чергування декількох реакцій за участю вільних радикалів, що йдуть зі збереженням вільної валентності.

Легкозаймисті рідини (ЛЗР) – з температурою спалаху в закритому тиглі <61 °С, утворюють вибухонебезпечну пару за звичайних умов зберігання (без штучного нагріву); рідини з температурою спалаху <28 °С відносять до особливо небезпечних.

Лінійна швидкість вигорання – висота шару рідини, що вигоряє за одиницю часу.

Лінійна швидкість поширення пожежі – відстань, яку проходить фронт пожежі за одиницю часу.

Масова швидкість вигорання – маса речовини, що вигорє за одиницю часу з одиниці площі пожежі.

Матеріальний баланс реакції горіння – рівність мас речовин, що вступають у реакцію горіння та утворюються у ході цієї реакції.

Мікробіологічне самозаймання – процес виникнення горіння внаслідок самонагрівання продуктів рослинного походження під впливом тепловиділення під час життєдіяльності рослинних клітин та мікроорганізмів.

Мінімальна вибухонебезпечна концентрація кисню $\varphi_{\text{МВКК}}$ – такий малий вміст кисню у горючій системі, за якого виникнення горіння стає неможливим.

Мінімальна енергія запалювання E_{min} газу, пари або аерозолу – найменша енергія конденсатора, при розряді якого через *повітряний* проміжок виникає іскра, що запалює стехіометричну суміш даної речовини з повітрям із імовірністю 0,01.

Надлишок повітря – різниця між кількістю повітря, що дійсно витрачається на горіння, та теоретично необхідною кількістю повітря.

Насичена пара – утворюється під час випаровування у закритій системі з утворенням динамічної рівноваги між кількістю рідини, що випаровує та кількістю сконденсованої пари, тому концентрація такої пари в часі незмінна.

Нейтральною зоною називають уявну площину у приміщенні, рівнобіжну підлозі, у точках якої тиск продуктів горіння дорівнює тиску зовнішнього повітря.

Небезпечні фактори пожежі – первинні та другорядні явища пожежі, що спричиняють травмування, отруєння, загибель людей та знищення або пошкодження матеріальних цінностей.

Ненасичена пара – стан пари на відкритому просторі, коли *динамічна рівновага* між випаровуванням та конденсацією не встановлюється, частина пари втрачається у навколишній простір; випаровування триває, доки вся рідина не випарується.

Нижня концентраційна межа поширення полум'я (НКМПП) – найменша концентрація горючої речовини в суміші з повітрям, за якої *вже* можливе виникнення та поширення горіння.

Нижча теплота згорання речовини – кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості горючої речовини за стандартних умов, а вода у продуктах горіння знаходиться у газоподібному стані.

Особливо небезпечні рідини – з температурою спалаху 28 °C і нижче.

Окремі явища (другорядні) на пожежі – виникають внаслідок дії *загальних явищ* та бувають не на кожній пожежі: руйнування, вибухи, травмування або загибель людей чи тварин, введення вогнегасних речовин, хімічне або радіоактивне забруднення тощо.

Період індукції – час від початку перевищення температури горючої системи над температурою навколишнього середовища до моменту виникнення горіння.

Період вільного розвитку – час від виникнення пожежі до введення вогнегасних речовин. За цей час зростає площа пожежі та швидкість її поширення.

Період ліквідації пожежі – час від локалізації до повного припинення пожежі.

Період локалізації пожежі – час, протягом якого створено умови для запобігання подальшому розвитку пожежі. Протягом цього часу площа пожежі ще зростає, але з меншою швидкістю за рахунок впливу вогнегасних речовин.

Питома витрата – кількість вогнегасного засобу, що витрачається в одиницю часу на гасіння розрахункового параметра пожежі.

Піна – це грубодисперсна колоїдна система з дисперсної фази у вигляді пухирців газу розташованих у дисперсійному середовищі – рідині.

Площа пожежі – площа проекції зони горіння на горизонтальну або вертикальну площину.

Пожежа – це позарегламентний процес знищення або пошкодження вогнем майна, під час якого виникають чинники, небезпечні для живих істот і довкілля.

Пожежна навантага – питома кількість теплоти, що може виділитися у приміщенні під час пожежі з одиниці площі підлоги приміщення.

Полум'я – це газовий об'єм, в якому відбуваються всі процеси, що пов'язані з підготовкою горючої суміші до горіння, і сам процес горіння.

Продукти горіння – це газоподібні, тверді та рідкі речовини, що утворюються при взаємодії окисника з горючою речовиною у процесі горіння.

Самозаймання – це виникнення горіння внаслідок самонагрівання за умов для накопичення тепла всередині твердої системи від внутрішніх екзотермічних процесів за відсутності джерела запалювання.

Самонагрівання – підвищення температури системи внаслідок перевищення швидкості тепловиділення екзотермічних процесів над швидкістю тепловіддачі від системи в навколишнє середовище.

Самоспалахування – це виникнення горіння внаслідок різкого підвищення швидкості екзотермічних реакцій окиснення, що виникають під дією зовнішнього нагрівання всієї горючої системи водночас до критичної температури.

Спінювання – перехід у пару значної кількості дрібних краплин води, що знаходяться у вигляді емульсії у нафтопродукті, з утворенням піни, що горить, яка може переливатися через борт резервуара, поширюючи горіння.

Спосіб пожежогасіння – тактичний прийом для припинення горіння.

Стандартна температура самоспалахування – найменша температура, визначена стандартним методом, до якої має бути нагріта стехіометрична горюча суміш з повітрям, за якої виникає горіння без дії джерела запалювання.

Стандартна теплота утворення речовини ΔH_f^0 – теплота реакції з утворенням 1 молю речовини із простих речовин за стандартних умов ($P = 101,3$ кПа, $T = 298$ К).

Стехіометрична концентрація – концентрація горючої речовини у повітрі або іншому окисному середовищі, що відповідає рівнянню реакції горіння.

Стійкість піни – здатність піни зберігати первинні властивості; характеризується часом напіврозпаду піни, протягом якого з піни виділиться половина маси рідини.

Температура горіння – температура, до якої нагріваються продукти горіння під час їх утворення в зоні горіння.

Температура займання – найменша температура рідини, за якої після короткочасної дії джерела запалювання встановлюється стійке горіння оскільки інтенсивність випаровування рідини стає рівною інтенсивності вигорання пароповітряної суміші.

Температура запалювання – критична температура нагрітого тіла, за якої досягається рівновага між тепловиділенням окиснення горючої речовини у пристінному шарі горючої суміші і тепловіддачею у навколишню холодну суміш.

Температура самонагрівання – найменша температура горючої системи, за якої виникає самонагрівання речовини.

Температура самоспалахування – найменша температура повітряної горючої системи, за якої відбувається її самоспалахування.

Температура погасання – температура системи, нижче якої продовження горіння стає неможливим.

Температура пожежі в огороженні – середньооб'ємна температура газового середовища у приміщенні, в якому відбувається пожежа.

Температура пожежі на відкритому просторі – температура зони горіння; приймають як адіабатичну температуру горіння речовини.

Температура спалаху – найменша температура рідини, за якої над її поверхнею накопичується пара, здатна спалахувати під впливом короткочасної дії джерела запалювання середньої потужності, але без встановлення стійкого горіння.

Температурні межі поширення полум'я (ТМПП) (нижня або верхня) – такі температури рідини, за яких над її поверхнею утворюється насичена пара в концентрації, що відповідає нижній або верхній КМПП.

Теплове самозаймання – процес *виникнення горіння* шляхом самонагрівання в результаті тривалого впливу температур, вищих за температуру самонагрівання.

Тепловий ефект реакції – кількість тепла, що виділяється чи поглинається системою під час протікання в ній незворотної хімічної реакції за умов сталої температури та об'єму або температури та тиску.

Теплота згоряння – кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості горючої речовини з утворенням продуктів повного згорання, якщо початкові та кінцеві продукти знаходяться за стандартних умов.

Теплота пожежі – кількість тепла, що виділяється під час пожежі в зоні

горіння за одиницю часу.

Токсичність продуктів горіння – їх здатність викликати отруєння людей, які знаходяться без засобів індивідуального захисту органів дихання.

Тривалість пожежі – час від виникнення до повного припинення пожежі.

Фізичне самозаймання – виникнення горіння внаслідок самонагрівання матеріалу під час тепловиділення фізичних процесів (адсорбція, тертя тощо).

Флегматизація – запобігання утворенню горючого газового середовища та виникненню горіння за допомогою газів-розріджувачів або інгібіторів.

Флегматизуюча концентрація $\varphi_{\text{фл}}$ – найменша концентрація негорючого газу або інгібітора в газовій суміші горючої речовини й окисника, за якої суміш стає нездатною до горіння за будь-якого вмісту горючої речовини та окисника.

Фрикційні іскри – шматочки металу, відірвані, нагріті та частково окиснені за умов механічного удару.

Фронт пожежі – частка периметра, де поширення пожежі йде більш інтенсивно.

Хімічне самозаймання – виникнення горіння внаслідок самонагрівання системи під час взаємодії речовин, які реагують із виділенням тепла.

Час гасіння – час від початку подавання вогнегасної засобу до припинення горіння.

Швидкість хімічної реакції – число елементарних актів взаємодії речовин за одиницю часу в одиниці об'єму (у гомогенних реакціях) або на одиницю площі поверхні розподілу фаз (у гетерогенних реакціях).

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

В

вибух, 70, 106, 155, 156
- надлишковий тиск, 107
викид, 156
випаровування, 79
- інтенсивність, 79, 81, 85, 127, 159
- теплота, 79
вогненна сфера (для аерозолів),
107
вогнегасна речовина, 118
- ефективність, 118, 156

Г

газообмін, 111–115, 136, 156, 157
горіння, 11., 156
- виникнення, 36, 38, 46, 156
- енергетичний баланс, 25, 31, 157
- матеріальний баланс, 19, 21, 158
- рівняння реакції, 21, 25, 26

Д

динамічна рівновага, 79, 85, 156
джерело запалювання, 50, 60, 156

Е

енергія запалювання, 51–53, 158
ентальпія, 32, 146

З

запалювання вимушене, 50, 156
зона
- задимлення, 112, 157

І

інтенсивність випаровування, 79
іскра
- електрична, 50
- фрикційна, 50, 156

Й

йодне число, 47, 157

К

коефіцієнт

- стехіометричний, 21, 54
- надлишку повітря, 20, 114, 147,
153
- поверхні горіння, 98, 122
концентраційні межі поширення
полум'я, 54, 59–61, 81, 147, 156, 158
- аерозолі, 107, 152
- безпечні, 60, 61
концентрація
- кисню
- безпечна, 132
- мінімальна вибухонебезпечна, 132,
158
- вогнегасна, 118, 132, 156
- насиченої пари, 80
- стехіометрична, 39, 42, 54
- флегматизуюча, 131–133, 155, 160

Н

навантага пожежна, 111, 159
надлишок повітря, 20, 22, 26, 158
нейтральна зона, 114, 116, 158

О

об'єм повітря для горіння та
продуктів горіння, 21, 22, 26,
27

П

пара
- насичена, 80, 85, 86, 158
- ненасичена, 80, 85, 86, 158
- тиск, 80, 82
піна вогнегасна 126, 159
- дисперсність, 126, 157
- ізолююча здатність, 126, 157
- кратність, 126, 157
- стійкість, 126, 159
піноутворювач, 124, 126, 128
період індукції, 36, 38, 45, 158

поверхнево-активні речовини, 125
пожежа, 111, 160
- зона
- - горіння, 112, 157
- - задимлення, 112, 157
- - теплового впливу, 112, 157
- небезпечні явища, 112, 158
- параметри 111
- інтенсивність
- - газообміну, 111, 157
- - задимлення, 111, 157
- лінійна швидкість вигорання, 92,
98
- лінійна швидкість поширення, 97,
111, 158
- масова швидкість вигорання, 92,
111, 158
- площа, 111, 159
- пожежна навантага, 111, 159
- температура, 111, 160
- теплота, 111, 160
- фронт, 160
- періоди розвитку, 158, 159
- явища:
- - загальні, 112, 157
- - окремі, 112, 158
пожежогасіння
- засоби, 117
- параметри, 118
- - загальна витрата, 118, 157
- - загальна кількість, 118, 157
- - інтенсивність подавання 118,
157
- - - критична, 119
- - - нормативна, 119
- - - оптимальна, 119
- - - теоретична, 119, 122
- - коефіцієнт використання, 119
- - питома витрата 118, 122, 134

- - час гасіння, 118, 133, 134, 160
- прийоми, 117
- способи, 117
полум'я, 11–14, 159
продукти горіння, 25, 159

Р

радикал вільний, 15, 16, 138, 139,
156
реакція
- горіння, 21, 25, 26
- ланцюгова, 15, 16, 138, 156
- тепловий ефект, 31
речовини пірофорні, 46
рівняння
- Антуана, 80, 82
- Еллея, 86
- Шоневальда, 109, 152
- Ле-Шательє, 61
рідини
- горючі, 86, 156
- легкозаймисті, 86, 158
- особливо небезпечні, 86, 158

С

самозаймання, 44, 159
- мікробіологічне, 45, 158
- теплове, 45, 46, 160
- хімічне, 45, 46, 160
- - на повітрі, 47
- фізичне, 45, 160
самонагрівання, 37, 44, 46, 159
самоспалахування, 36-40, 44, 50,
159
спінювання, 159

Т

температура
- безпечна, 40, 42
- горіння, 30, 33, 159
- займання, 85, 159

- запалювання, 50, 159
- погасання, 118, 120, 160
- пожежі в огороженні, 111, 116, 154, 160
- полум'я, 12, 17, 30
- самонагрівання, 44, 160
- самоспалахування, 36-41, 107, 159, 160
- - розрахунок, 42, 148, 149
- спалаху, 85, 151, 160

- температурні межі поширення
- полум'я, 80–84, 150, 160
- безпечні, 81, 82
- теплота згоряння, 30, 31, 156, 158, 160
- теплота утворення, 31, 159
- тиск вибуху, 71

Ф

- флегматизація, 132, 160

Навчальне видання

Трегубов Дмитро Георгійович
Нуянзін Віталій Михайлович
Даник Олена Миколаївна
Гончаренко Яна Миколаївна

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ ГОРІННЯ ТА МЕХАНІЗМІВ
ПОЖЕЖОГАСІННЯ**

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 12,3 Обл. вид. 8,62

