

**Електронний підручник з дисципліни
"Теорія розвитку та припинення горіння"**

Автори: начальник кафедри процесів горіння, доцент, к.т.н. Тарахно О.В.,
старший викладач кафедри процесів горіння, к.х.н. Жернокльов К.В.
викладач кафедри процесів горіння, к.т.н. Трегубов Д.Г.
начальник центру інформаційних технологій Остапенко В.Є.

Харків -2007

Електронний підручник з дисципліни "Теорія розвитку та припинення горіння"

Автори: начальник кафедри процесів горіння, доцент, к.т.н. Тарахно О.В.,
старший викладач кафедри процесів горіння, к.х.н. Жернокльов К.В.
викладач кафедри процесів горіння, к.т.н. Трегубов Д.Г.
начальник центру інформаційних технологій, Остапенко В.Є.

У підручнику представлено основні розділи навчальної дисципліни які стосуються процесу горіння, визначенню основних параметрів пожежної небезпеки речовин і матеріалів, закономірностей виникнення та розповсюдження горіння, параметрів та закономірностей розвитку та припинення пожеж. Методичний супровід складається з програми дисципліни, переліку орієнтовних запитань для підготовки до іспиту та вказівок до виконання розрахункових робіт. В додатках наведено довідникові матеріали, що використовуються для виконання розрахункових робіт. Підручник та методичні матеріали призначені для самостійного вивчення дисципліни "Теорія розвитку та припинення горіння" слухачами та студентами, що навчаються за денною та заочною формою навчання.

ЗМІСТ

Розділ 1 Основи процесів горіння	6
Глава 1. Основи процесів горіння. Класифікація процесів горіння.....	6
§ 1. Сутність процесу горіння та умови його протікання.....	6
§ 2. Класифікація процесів горіння.....	8
Глава 2. Енергетичний баланс процесу горіння. Теплоота згорання.....	9
§ 1. Тепловий ефект хімічної реакції.....	9
§ 2. Теплоота згорання. Види теплооти згорання.....	12
§ 3. Розрахункове визначення теплооти згорання.....	13
§ 4. Поняття та види температури горіння речовин.....	15
Розділ 2 Виникнення процесів горіння.....	27
Глава 1. Концентраційні межі поширення полум'я.....	27
§ 1. Умови утворення горючого середовища.....	27
§ 2. Чинники, що впливають на концентраційні межі.....	31
§ 3. Практичне значення КМПП.....	35
Глава 2. Виникнення горіння.....	36
§ 1. Види виникнення горіння.....	36
§ 2. Процес самоспалахування.....	39
§ 3. Температура самоспалахування речовин.....	44
§ 4. Фактори, що впливають на температуру самоспалахування.....	45
§ 5. Визначення температури самоспалахування горючих речовин.....	51
§ 6. Практичне значення температури самоспалахування.....	53
Глава 3. Самозаймання речовин та матеріалів.....	53
§ 1. Сутність процесів самозаймання, їх класифікація.....	54
§ 2. Умови, які необхідні для виникнення самозаймання.....	56
§ 3. Теплове самозаймання.....	58
§ 4. Хімічне самозаймання.....	60
§ 5. Фізичне самозаймання.....	68
§ 6. Мікробіологічне самозаймання.....	73
Глава 4. Вимушене запалювання горючих систем.....	76
§ 1. Поняття і особливості процесу запалювання.....	76
§ 2. Запалення від нагрітої поверхні.....	78
§ 3. Запалювання горючих систем електричними розрядами.....	84
§ 4. Підпалення фрикційними іскрами, краплями розплавленого металу.....	91
§ 5. Граничні параметри запалення горючих систем.....	93
Розділ 3 Горіння речовин і матеріалів	95
Глава 1. Горіння газо-пароповітряних сумішей.....	95
§ 1. Загальні закономірності горіння газових сумішей.....	95
§ 2. Поширення кінетичного горіння.....	97
Глава 2. Горіння рідин.....	102
§ 1. Загальні закономірності випаровування та горіння рідин.....	103
§ 2. Температурні межі поширення полум'я.....	107
Глава 3. Горіння твердих речовин.....	111
§ 1. Класифікація твердих горючих матеріалів.....	111
§ 2. Загальні закономірності горіння твердих речовин.....	113
§ 3. Особливості поведінки целюлозовмісних матеріалів при нагріванні.....	120
§ 4. Тління.....	123
§ 5. Способи зниження горючості деревини.....	125
§ 6. Загальні поняття та класифікація полімерів.....	126
§ 7. Основні закономірності процесу горіння пластмас.....	130

§ 8. Горіння металів.....	133
§ 9. Загальна характеристика та властивості пилу.....	135
§ 10. Запалення дисперсних систем.....	136
§ 11. Особливості горіння пилу.....	141
§ 12. Класифікація пилу за пожежною небезпекою.....	148
Розділ 4. Пожежа та її розвиток.....	150
Глава 1. Пожежа та її розвиток. Параметри розвитку пожеж.....	150
§ 1. Поняття пожежі.....	150
§ 2. Класифікація пожеж.....	155
§ 3. Параметри розвитку пожеж.....	157
§ 4. Загальні закономірності розвитку пожеж класу А.....	159
§ 5. Особливості розвитку пожеж твердих горючих матеріалів в огорожах.....	161
§ 6. Особливості розвитку пожеж твердих горючих матеріалів на відкритих просторах.....	162
Глава 2. Особливості розвитку пожежі класу "В" на відкритому просторі.....	165
§ 1. Закономірності виникнення та розвитку пожежі горючих рідин.....	165
§ 2. Небезпечні фактори, що супроводжують розвиток пожежі класу.....	173
Глава 3. Особливості розвитку пожежі класу С.....	177
§ 1. Закономірності розвитку пожеж технологічних установок з горючими газами.....	177
§ 2. Особливості горіння газових фонтанів.....	180
Глава 4. Загальні закономірності розвитку пожежі в огорожі.....	183
§ 1. Динаміка розвитку пожежі в огорожі.....	183
§ 2. Фактори, що впливають на температурний режим пожежі.....	185
§ 3. Критичний час розвитку пожежі в огорожі.....	187
Глава 5. Основні моделі, що описують температурний режим пожежі в огорожі.....	189
§ 1. Інтегральна модель температурного режиму пожежі в огорожі.....	189
§ 2. Основні положення зонної моделі температурного режиму.....	198
Глава 6. Газообмін при пожежі в огороженні.....	199
§ 1. Основні закономірності газообміну при пожежі в огороженні.....	199
§ 2. Основні параметри, що характеризують газообмін на пожежі.....	203
§ 3. Визначення висоти нейтральної зони. Основи регулювання газообміну на пожежі.....	205
Розділ 5. Вогнегасні засоби.....	209
Глава 1. Основи припинення горіння. Параметри пожежогасіння.....	209
§ 1. Фізико-хімічні основи припинення горіння.....	209
§ 2. Методи та способи припинення горіння.....	211
§ 3. Запобігання запалення речовин і матеріалів.....	214
§ 4. Поняття і загальні вимоги до вогнегасних засобів.....	216
§ 5. Вибір засобів і способів гасіння пожежі.....	218
§ 6. Загальні закономірності пожежогасіння.....	219
Глава 2. Припинення горіння охолодженням.....	222
§ 1. Механізм припинення горіння охолодженням.....	222
§ 2. Теоретична інтенсивність подачі води на гасіння пожежі.....	226
§ 3. Методи підвищення вогнегасної ефективності води.....	227
Глава 3. Припинення горіння ізоляцією.....	229
§ 1. Основи припинення горіння ізоляцією.....	229
§ 2. Основи утворення стійких пін.....	231
§ 3. Властивості вогнегасних пін.....	234
§ 4. Механізм припинення горіння піною.....	234
Глава 4. Припинення горіння інгібуванням.....	237
§ 1. Основи припинення горіння інгібуванням.....	237
§ 2. Гасіння хладонами.....	238

Глава 5. припинення горіння флегматизацією.....	241
§ 1. Механізм припинення горіння інертними розріджувачами	241
§ 2. Флегматизація горючих сумішей газами-розріджувачами.....	244
§ 3. Розрахунок основних параметрів пожежегасіння	246
ЛІТЕРАТУРА :	251

Розділ 1 Основи процесів горіння

Глава 1. Основи процесів горіння. Класифікація процесів горіння.

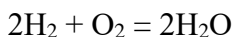
§ 1. Сутність процесу горіння та умови його протікання.

Вивчення процесу горіння відбувається з початку свідомої діяльності людини, причому для цього залучаються результати, отримані в самих різноманітних галузях природничих наук: хімії, фізики, газової динаміки, прикладної математики тощо.

Сутність процесу горіння з'ясував у середині 18-го сторіччя великий російський вчений М.В.Ломоносов. Він перший дійшов висновку, що горіння є хімічний процес сполучення горючої речовини з повітрям. Початок розвитку сучасної теорії горіння можна віднести до того часу, коли Маляр і Ле-Шательє зробили спробу визначити швидкість горіння (1883г.). Точне наукове поняття процесів горіння дали А.Н.Бах, К.Енглер, Н.Н.Семенов, широко відомі наукові праці у галузі горіння Я. Б. Зельдовича, В. Н. Кондратьєва, Ю. Б.Харитонова та ін.

Процес горіння складається з багатьох пов'язаних між собою окремих процесів, як фізичних, так і хімічних. Фізика горіння зводиться до процесів тепло - масообміну і переносу в реагуючій системі. Хімія горіння полягає в протіканні окислювально-відновних реакцій, що складаються звичайно з цілого ряду елементарних актів, пов'язаних з переходом електронів від одних речовин до інших – від відновника до окислювача.

Із курсу загальної хімії відомо, що реакції, які протікають із зміною ступеня окислення атомів, називаються окислювально-відновними. Прикладом такого процесу може бути взаємодія водню та кисню. Атом водню віддає свій валентний електрон, необхідний для заповнення зовнішньої орбіти кисню, але зважаючи на те, що для завершення орбіти необхідно не один, а два електрони, атом кисню одержує його від другого атому водню. Різноміненні іони, підкоряючись силам кулонівського притягання, об'єднуються з утворенням стійкого кінцевого продукту – молекули води.



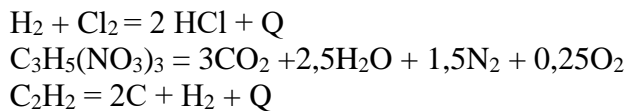
Процес віддання валентних електронів називається окисленням, а речовини, здатні віддавати валентні електрони, називають відновниками. Усі горючі речовини, як правило, є відновниками. Легко віддають валентні електрони речовини з менш заповненою орбітою та з більшою кількістю електронних орбіт. До таких речовин відносяться речовини першої та другої групи: водень, лужні та лужноземельні метали, речовини третьої групи: бор і алюміній, четвертої групи: карбон (вуглець), п'ятої групи: фосфор, шостої – сульфур (сірка) і т.п. Основну масу горючих речовин являють собою органічні речовини. При окисленні речовини ступінь її окислення збільшується.

Приєднання валентних електронів називається відновленням, а речовини, здатні їх приєднувати, - окислювачами. Прості речовини, для заповнення зовнішньої валентної орбіти яких бракує одного або двох електронів, легше їх приймають, ніж віддають, і тому в хімічних реакціях вони відновлюються, виступаючи при цьому у ролі окислювача. До таких простих речовин можна віднести: речовини сьомої групи -галогени- F_2 , Cl_2 , Br_2 , I_2 , а також шостої групи кисень O_2 і озон O_3 .

На пожежі, практично завжди окислювачем є кисень повітря, але викликати самозаймання речовин можуть і інші окислювачі. Такими можуть бути речовини, у складі яких є елементи з високим ступенем окислення. Це можуть бути такі речовини, як перекис водню, кисневмісні кислоти: азотна, сірчана, марганцева і т.д. Окислювачі можуть бути і твердому стані: оксиди металів з високим ступенем окислення: оксид хрому CrO_3 ; оксид марганцю - Mn_2O_7 ; оксид марганцю - MnO_2 . До сильних окислювачів, що знаходяться в твердому стані відносяться також солі кисневмісних кислот - хлорнуватої, хлорнуватистої, азотної, сірчаної і т.д. Взаємодія горючих речовин із цими та іншими окислювачами може стати причиною їх самозаймання та пожежі.

Окислювально-відновні реакції горіння можуть бути міжмолекулярними і внутрішньомолекулярними. Міжмолекулярні реакції протікають із зміною ступеня окислення атомів в різних молекулах. Внутрішньомолекулярні реакції протікають із зміною ступеня окислення різних атомів в одній і тій же молекулі.

З урахуванням викладеного, в поняття горіння в широкому значенні можна включити самі різноманітні хімічні реакції між елементами і їх з'єднаннями, включаючи реакції розпаду сполук. Горіння відбувається не тільки за рахунок утворення оксидів, але також за рахунок утворення фторидів, хлоридів і нітридів. До реакцій горіння відносяться також реакції взаємодії деяких речовин з парами сірки, магнію з діоксидом вуглецю, реакції розкладання вибухових речовин, деяких ендотермічних сполук, наприклад, ацетилену.



Горіння – це складний фізико-хімічний процес, основою якого є швидка реакція окислення, що супроводжується інтенсивним виділенням енергії у вигляді тепла та світлового випромінювання.

Отже реакції горіння різноманітні, але не всі вони є характерними для пожеж. На більшості пожеж в основі горіння лежать реакції взаємодії горючих речовин з повітрям, тому розглядають в основному лише реакції, у яких горючі речовини і матеріали під впливом високих температур вступають у хімічну взаємодію із киснем повітря, перетворюючись на продукти горіння.

Процеси горіння і окислення близькі, але мають і деяку різницю. Окислення горючих речовин протікає при нормальних умовах постійно, але з дуже малою швидкістю. Так, наприклад, реакція окислення водню при кімнатній температурі може закінчитися приблизно через 1,6 мільйонів років. Урахування такого процесу практичного значення не має. При підвищенні температури до 400°C окислення закінчиться через 80 діб, а при наявності джерела запалювання з температурою понад 600°C – миттєво.

Горіння – відносно швидкий процес. Тому до горіння відносять не всі окислювально-відновні реакції. Повільні реакції (низькотемпературне окислення, біохімічне окислення) і дуже швидкі (вибухове перетворення) не входять в поняття горіння. Горіння зумовлюють реакції, час протікання яких звичайно вимірюється секундами або, частіше, частками секунд.

Горіння супроводжується виділенням тепла. Тому до горіння призводять не будь-які реакції, що протікають відносно швидко, а ті, які в сукупності є екзотермічними. Реакції, що йдуть з затратою тепла ззовні, не відносяться до горіння. Горіння – процес, що самопідтримується за рахунок виділення тепла. Тому горіння обумовлюють не будь-які екзотермічні реакції, а лише ті, сумарна теплота яких достатня для того, щоб процес став здатним до самопоширення. На практиці використовують реакції горіння, теплота яких, крім того, досить для отримання того або іншого корисного ефекту.

Таким чином можна сказати, що процес горіння є дуже швидким окисленням, при цьому енергія, що виділяється, не встигає поступово розсіятися в навколишньому середовищі, і тому її виділення ми можемо спостерігати в вигляді тепла і світла.

Для протікання процесу горіння необхідна наявність горючої речовини та окислювача.

Незважаючи на те, що у наявності є горюча речовина та окислювач горіння не виникає, це означає, що їхнього простого фізичного контакту недостатньо.

Другою умовою для виникнення та протікання горіння є наявність початкового теплового імпульсу.

Для обміну валентними електронами атоми речовин, що реагують, повинні зіткнутися і мати при цьому достатню енергію (більшу, ніж енергія активації). Отже співвідношення компонентів у реагуючій суміші повинно знаходитися в певній пропорції, в іншому випадку реакція практично не

протікатиме через брак одного з компонентів. Горюча речовина та окислювач (кисень повітря) у певному співвідношенні складають горючу систему, а тепловий імпульс викликає в ній реакцію окислення. Коли горіння вже встановиться, джерелом підтримання процесу буде служити тепло зони реакції.

Отже, для виникнення горіння необхідна наявність горючої системи (тобто горючої речовини та окислювача у певному співвідношенні) та теплового імпульсу достатньої потужності.

Відсутність однієї з цих умов призводить до припинення горіння або недопущення його виникнення.

§ 2. Класифікація процесів горіння.

Речовини, що беруть участь в горінні, можуть бути в газоподібному, рідкому і твердому станах, заздалегідь перемішені між собою або не перемішені, поступати в зону протікання хімічної реакції з різною швидкістю, горіння може поширюватися по горючій суміші за рахунок передачі тепла або за рахунок різкого стиснення. Отже процеси горіння дуже різноманітні і класифікувати їх можна за декількома ознаками:

За агрегатним станом компонентів горючої суміші в зоні горіння.

Як відомо, речовини можуть знаходитися у трьох агрегатних станах: газоподібному, рідкому та твердому. Якщо в горючій системі відсутні поверхні розділу між реагентами, то таку систему називають гомогенною, якщо є поверхні розділу між реагентами, то таку систему називають гетерогенною.

Залежно від того у якому агрегатному стані знаходяться компоненти горючої суміші в зоні горіння розрізняють два режими горіння: гомогенне, коли обидва компоненти в зоні горіння знаходяться в однаковій фазі, і гетерогенне горіння, коли компоненти горючої суміші в зоні горіння знаходяться в різних агрегатних станах.

На пожежі найчастіше у вигляді окислювача виступає газ, кисень повітря, тож гомогенним горіння буде в тому разі, коли горюча речовина буде знаходитися в газо- або пароподібному стані.

Горючі рідини та більшість твердих горючих матеріалів також горять на пожежі здебільшого в режимі гомогенного полум'яного горіння, бо до зони горіння надходять не самі ці рідини та тверді речовини, а газо- і пароподібні продукти їхнього випаровування та термічного розкладання.

З поверхні виходить потік пари і горіння відбувається в процесі змішування цієї пари з окислювачем, що присутній у газовій фазі. Таке горіння можна називати квазігетерогенним, але не дійсно гетерогенним, тому що сам процес горіння відбувається вже не на границі фаз. Тепловий потік із зони горіння доставляє тепло, необхідне для випару конденсованої фази.

Швидкість хімічної реакції при гомогенному горінні залежить від концентрації як горючої речовини, так і окислювача в системі, а також від температури:

$$\omega_{\text{хр.}} = k_0 \varphi_{\text{гр}}^n \varphi_{\text{ок}}^m \exp\left(\frac{-E_{\text{акт}}}{RT}\right)$$

де $\varphi_{\text{гр}}^n$, $\varphi_{\text{ок}}^m$ - концентрації горючої речовини та окислювача в системі; k_0 - константа швидкості реакції; R - універсальна газова стала; T - температура в зоні горіння; $E_{\text{акт}}$ - енергія активації.

Якщо горюча речовина та окислювач в зоні реакції залишаються в різних агрегатних станах, то таке горіння є гетерогенним. Для того щоб горіння було дійсно гетерогенним, конденсована фаза повинна мати дуже високу температуру кипіння, або розкладання, так щоб при температурі горіння її випаровуванням можна було знехтувати. У протилежному випадку горінню передують процеси випаровування і горіння буде мати гомогенний режим.

Прикладом гетерогенного (безполум'яного) горіння є горіння антрациту, коксу, а в умовах пожежі твердого вуглецевого залишку, який утворюється при розкладанні твердих горючих матеріалів, наприклад деревини. У цьому випадку всі летючі продукти піролізу вже вигоріли і горіння відбувається безпосередньо на поверхні матеріалу.

Глава 2. Енергетичний баланс процесу горіння. Теплота згорання.

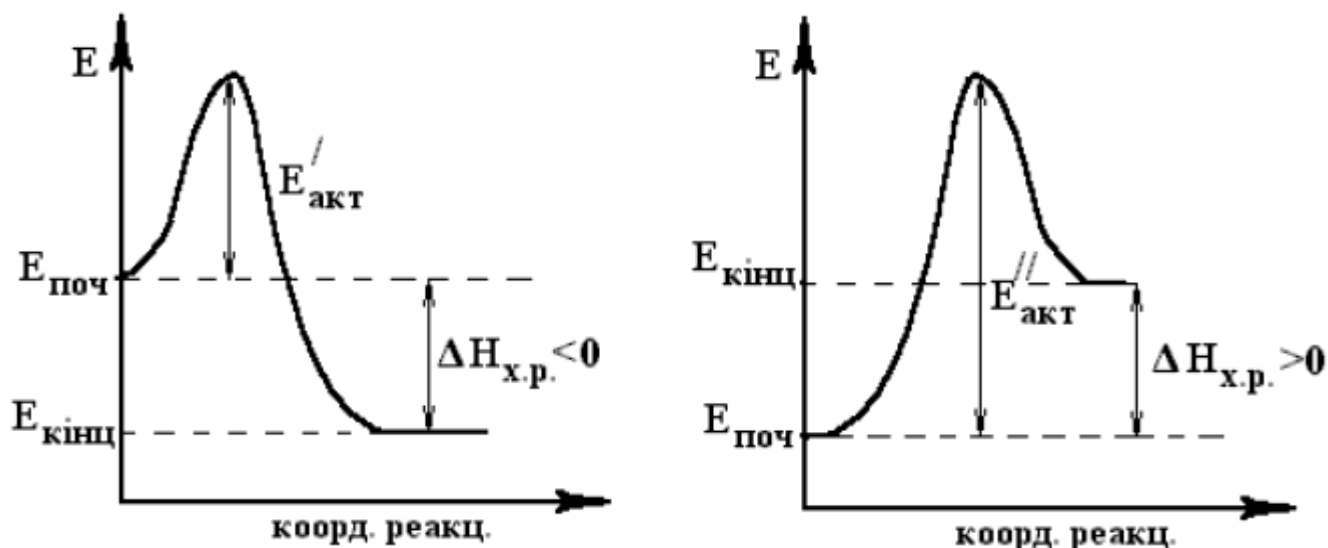
§ 1. Тепловий ефект хімічної реакції.

Під тепловим ефектом реакції розуміють кількість теплоти, що виділяється чи поглинається системою при протіканні в ній необоротної хімічної реакції (хімічна енергія перетворюється в теплову) в умовах сталості температури і об'єму чи температури і тиску.

Енергетичний ефект хімічної реакції виникає за рахунок зміни в системі або внутрішньої енергії (при постійному об'ємі системи), або ентальпії (якщо тиск в системі не змінюється). Реакції горіння майже завжди протікають при постійному тиску, отже, їх тепловий ефект визначається зміною саме ентальпії системи.

Для виникнення хімічної реакції необхідна наявність певного теплового імпульсу, який має запас енергії, достатній для активації системи. Перехід системи із вихідного стану в кінцевий проходить через активні молекули, тобто початковій системі необхідно повідомити деяку кількість енергії – енергію активації $E_{\text{акт}}$. Для реакції горіння це енергія, яка йде на початковий розігрів горючої речовини та окислювача, і в більшості випадків підводиться до системи джерелом запалювання.

Між енергетичними характеристиками хімічної реакції - тепловим ефектом і енергіями активації прямої і зворотної реакцій - існує просте співвідношення. Його наочніше усього пояснити за допомогою малюнка, на якому представлена потенційна енергія взаємодії атомів, що беруть участь у реакції, як функція так названої "координати реакції", що характеризує взаємне просторове положення атомів.



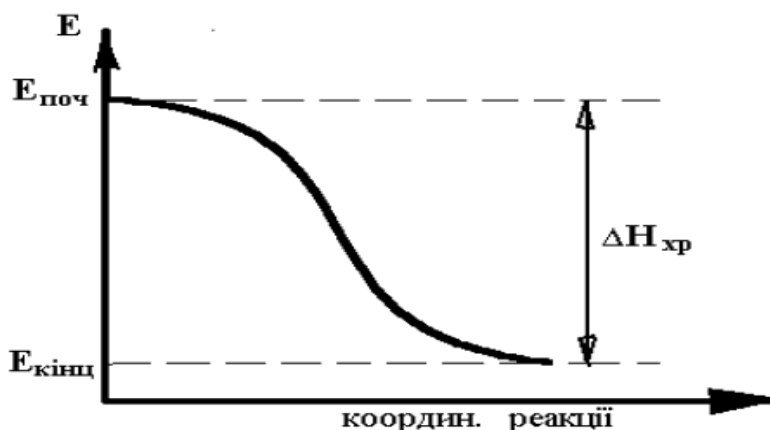
Початковий і кінцевий рівні енергії відрізняються між собою на величину теплоти реакції Q .

$$E_{\text{кін}} - E_{\text{поч}} = Q$$

У тих випадках коли тепловміст системи після реакції зменшується, говорять про виділення енергії, тобто реакція екзотермічна. Коли тепловміст кінцевих продуктів більше, ніж вихідних, то

реакція може протікати тільки при підводі енергії в систему, тобто вона ендотермічна. Реакції горіння є екзотермічними.

Можлива й інша ситуація, яка відповідає нестабільним або, так званим, ендотермічним речовинам. При утворенні суміші таких речовин з окислювачем не потрібно початкового нагрівання, бо система сама переходить у більш енергетично вигідний стан.



Теплота утворення ендотермічних речовин має позитивний показник, тобто на їх утворення була витрачена енергія, і в результаті хімічної взаємодії з окислювачем накопичена енергія відразу виділяється у виді теплоти горіння. Прикладом таких речовин можуть служити діетилалюміній хлорид $(C_2H_5)_2AlCl$, $t_{cc} = -53^\circ C$ або триетилалюміній $(C_2H_5)_3Al$, $t_{cc} = -58^\circ C$.

Для визначення теплоти реакції застосуємо перший закон термодинаміки, відповідно до якого тепло, що виділилося в системі, дорівнює

$$dQ = dU + PdV = dH - VdP$$

Якщо горіння відбувається при постійному тиску, тобто $dP = 0$, теплота реакції дорівнює різниці повних ентальпій системи в початковому і кінцевому стані.

$$Q = - \int dH = - \Delta H$$

Якщо ж згоряння відбулося в закритому об'ємі чи як при вибуху при незмінному об'ємі, то $dV = 0$, і теплота реакції виражається як

$$Q = - \int dU = - \Delta U$$

Оскільки в розглянутому процесі приріст тепла є повним термодинамічним диференціалом, то теплота реакції не залежить від шляху, по якому йде процес, а тільки від початкового і кінцевого стану системи (закон Гесса), отже, теплота реакції істотно залежить від того, у якому кінцевому стані взята речовина, наприклад вода у виді пари чи у виді рідини, вуглець у виді графіту чи алмазу (тобто від кристалічної структури) і т. п.

Розрахунок значно спрощується, якщо ввести поняття “абсолютна” внутрішня енергія і “абсолютна” ентальпія, але при введенні їх необхідно умовитися відносно початку шкали відліку енергії. У розрахунках термодинамічних величин як нульовий рівень енергії приймається нульовий рівень самої молекули даної речовини, і приріст внутрішньої енергії і ентальпії обчислюється при різних температурах стосовно цього рівня.

Для розрахунку абсолютної ентальпії речовин зручно користуватися стандартною теплою утворення сполуки з простих речовин або теплою згоряння.

Стандартна теплота утворення речовини - теплота реакції, у якій утвориться один моль речовини зі складових його елементів, що знаходилися в стандартних умовах (зазвичай $P = 101,3$ кПа, $T = 298\text{K}$).

Для оцінки стандартної теплоти утворення користаються значеннями енергій розриву хімічних зв'язків.

$$\Delta H_f^0 = \sum h_{fi} m_i$$

де h_{fi} - адитивний внесок зв'язку i -го типу, кДж/моль;
 m_i - кількість зв'язків i -го типу у молекулі.

Енергія розриву хімічного зв'язку (чи енергія зв'язку) - енергія, яку потрібно затратити, щоб відокремити друг від друга (розвести на велику відстань) два атоми (чи дві групи атомів), з'єднані цим зв'язком. Значення стандартних теплот утворення речовин приводяться в різноманітній довідковій літературі.

Стандартну теплоту реакції розраховують як різницю між стандартними теплотами утворення продуктів реакції і вихідних речовин.

Нехай в умовах постійного тиску прореагувала вихідна суміш, що містить $n_{\text{поч}}$ молів вихідних речовин, що привело до утворення $n_{\text{кін}}$ молів продуктів реакції. Тому що повна ентальпія суміші газів дорівнює сумі тепловмісту всіх її компонентів, то для розглянутої реакції

$$Q = - (\sum n_{\text{кін}} \Delta H_{f \text{кін}}^0 - \sum n_{\text{поч}} \Delta H_{f \text{поч}}^0),$$

де $\Delta H_{f \text{поч}}^0$, $\Delta H_{f \text{кін}}^0$ — молярні ентальпії утворення вихідних речовин і продуктів реакції.

Щоб розрахувати теплоту реакції, яка проходить в умовах, що відрізняються від стандартних, потрібно знайти зміну тепловмісту при переході до інших P і T . Залежність тепловмісту при постійному тиску від температури виражається формулою:

$$H(T) = H_{\text{ст}}^0 + \int_{T_{\text{ст}}}^T C_p(T) dT$$

де $H_{\text{ст}}$ — теплота реакції, що відбуває в стандартних умовах.

Тому теплота реакції, що відбуває при температурі T , дорівнює:

$$Q = -\Delta H_{\text{ст}}^0 - \left(\sum n_{\text{кін}} \int_{T_{\text{ст}}}^T C_{p \text{кін}}(T) dT - \sum n_{\text{поч}} \int_{T_{\text{ст}}}^T C_{p \text{поч}}(T) dT \right)$$

Однак, часто при наближених розрахунках теплоти реакції теплоємність вважають величиною, що не залежить від температури, і рівною деякому середньому її значенню в інтервалі температур від $T_{\text{ст}}$ до T .

$$\overline{C_p} = \frac{\int_{T_{\text{ст}}}^T C_p(T) dT}{T - T_{\text{ст}}} \qquad \int_{T_{\text{ст}}}^T C_p(T) dT = \overline{C_p} (T - T_{\text{ст}})$$

Тоді теплоту реакції, що протікає при постійному тиску і температурі T , можна виразити:

$$Q = -\Delta H_{\text{ст}}^0 - \left(\sum n_{\text{кін}} \overline{C_{p \text{кін}}} - \sum n_{\text{поч}} \overline{C_{p \text{поч}}} \right) (T - T_{\text{ст}})$$

§ 2. Теплота згоряння. Види теплоти згоряння.

Теплотою згоряння називається кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості речовини при умові, що початкові та кінцеві продукти знаходяться у стандартних умовах.

$$\Delta H_{\text{гор}} = \sum_{i=1}^n n_{\text{пр}i} \Delta H_{f \text{пр}i}^{\circ} - \sum n_{\text{гс}} \Delta H_{f \text{гс}}^{\circ}$$

Оскільки реакція горіння складається на 1 моль горючої речовини, а горюча суміш містить горючу речовину, кисень та азот, тепловий ефект реакції горіння становить:

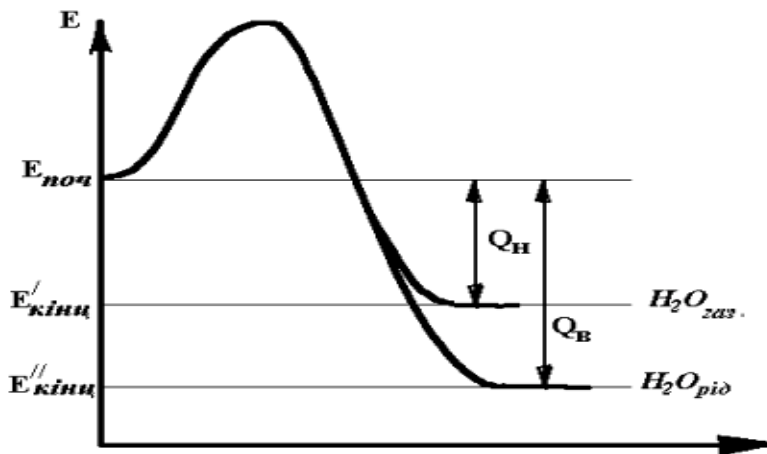
$$\Delta H_{\text{гор}} = \sum_{i=1}^n n_{\text{пр}i} \Delta H_{f \text{пр}i}^{\circ} - \sum \Delta H_{f \text{гр}}^{\circ}$$

Залежно від того, яким чином визначається одиниця кількості речовини, розрізняють молярну Q - для одного молю (кДж/моль), масову Q' для одного кілограму (кДж/кг), об'ємну Q'' для одного кубічного метру речовини (кДж/м³) теплоти згоряння.

В залежності від агрегатного стану води, яка утворилася в процесі горіння і знаходиться в продуктах горіння, розрізняють вищу Q_v та нижчу Q_n теплоту згоряння.

Вищою теплотою згоряння Q_v називається кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості речовини пального (кількості маси чи обсягу) з утворенням води у сконденсованому (рідкому) стані.

Нижчою теплотою згоряння Q_n речовини називається кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці кількості речовини горючої речовини за умови, що вода, яка міститься в продуктах горіння знаходяться в газоподібному стані.



Вища теплота згоряння відрізняється від нижчої на теплоту, яка виділяється при конденсації води, яка міститься в продуктах горіння.

$$Q_v - Q_n = Q_{\text{конденс}}$$

$$Q_{\text{конденс}} = n_{\text{H}_2\text{O}} H_{\text{випар}}$$

Теплота згоряння речовини визначається її складом, тобто наявністю та кількістю вуглецю, сірки, водню, кисню та інших компонентів. Нижча теплота згоряння окрім іншого залежить також від вмісту в горючій речовині води у виді вологи матеріалу. На пожежі конденсації пари води, яка утворилася при горінні, не відбувається, тому в розрахунках частіше використовують саме нижчу теплоту згоряння.

При урахуванні чинників, які оказують вплив на теплоту згоряння речовини, таких як хімічний недопал, вологість матеріалу, втрати на теплове випромінювання, говорять про практичну

або робочу теплоту згоряння матеріалу $Q_{нр}$, яка завжди менша нижчої теплоти згоряння. При збільшенні вмісту води в речовині кількість енергії, витрачена на її випаровування, збільшується, а практична теплота згоряння зменшується.

Висновок. У результаті горіння речовини виділяється тепло, що йде на розігрів продуктів горіння, конструкцій, що оточують, і втрачається з зони горіння конвекційним теплообміном, теплопровідністю і випромінюванням. Тепло, що виділяється, істотно впливає на параметри розвитку пожеж і перешкоджає проведенню бойових дій по гасінню пожежі.

§ 3. Розрахункове визначення теплоти згоряння.

Основною характеристикою процесу горіння є теплота згоряння речовини. Тому дуже важливо вміти визначати теплоту згоряння.

Для визначення питомої теплоти згоряння може застосовуватися експериментальна методика, заснована на спалюванні відомої кількості горючої речовини в калориметрі і визначення теплової енергії, що виділилася.

Молярну теплоту згоряння розраховують згідно з законом Гесса: тепловий ефект хімічної реакції залежить тільки від початкового та кінцевого енергетичного стану речовин, які реагують, і не залежить від шляху протікання та проміжних етапів реакції.

$$Q_{гор} = \left| \sum_i n_i H_{f_{ггi}}^0 - H_{f_{гг}}^0 \right|, \text{ кДж/моль}$$

Для перерахування молярної теплоти згоряння Q у масову Q' можна використати формулу

$$Q'_{гор} = \frac{Q_{гор} \cdot 1000}{\mu}, \text{ кДж/кг,}$$

де μ - молярна маса горючої речовини, кг/кмоль

Для речовин у газоподібному стані при перерахуванні зі стандартної теплоти згоряння Q у об'ємну Q'' використовують формулу

$$Q''_{гор} = \frac{Q_{гор} \cdot 1000}{V_{\mu}}, \text{ кДж/м}^3.$$

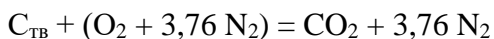
де V_{μ} - об'єм кмоль газу при стандартних умовах, м³/кмоль.

Для складних горючих речовин або суміші хімічних речовин, важко розрахувати теплоту згоряння за законом Гессу.

З огляду на те, що більшість органічних горючих матеріалів у своєму складі містять вуглець, водень і сірку в якості паливних компонентів, можна вивести формулу для визначення теплоти згоряння складної речовини виходячи з його масового складу.

$$Q_{скл} = \sum Q_i g_i$$

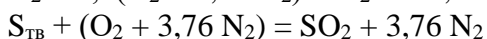
Визначимо стандартну теплоту згоряння вуглецю, водню і сірки:



$$Q_{в} = \left| \sum n_i H_{f_{ггi}}^0 - H_{f_{гг}}^0 \right| = \left| -393,78 - 0 \right| = 393,78 \text{ кДж/ моль}$$



$$Q_{в} = 285,83 \text{ кДж/ моль}$$



$$Q_{в} = 297,09 \text{ кДж/ моль}$$

Знаючи питому масу речовини з урахуванням масової частки, одержуємо формулу перерахунку теплоти згоряння одного відсотка компонента в речовині:

$$q'_B = Q'_B g_i = \frac{Q_B \cdot 1000}{\mu_i} \cdot \frac{\varphi_i}{100} = \frac{10 \cdot Q_B \cdot \varphi_i}{\mu_i}, \text{ кДж/кг}$$

і для перелічених речовин результат буде наступним:

$$C: q'_B = \frac{10 \cdot 393,08 \cdot \varphi_C}{12} = 327,6 \cdot \varphi_C \text{ кДж/кг};$$

$$H: q'_B = \frac{10 \cdot 285,83 \cdot \varphi_H}{2} = 1429,1 \cdot \varphi_H \text{ кДж/кг};$$

$$S: q'_B = \frac{10 \cdot 297,09 \cdot \varphi_S}{32} = 92,8 \cdot \varphi_S \text{ кДж/кг}.$$

Можна вивести загальну формулу для визначення вищої теплоти згоряння складної речовини виходячи з його складу і відсоткового вмісту компонентів:

$$Q'_B = 327,6 \cdot \varphi_C + 1429,2 \cdot \varphi_H + 92,8 \cdot \varphi_S; \text{ кДж/кг},$$

де φ_C , φ_H , φ_S - відсотковий вміст карбону, гідрогену, сульфуру, %.

Але наша формула не враховує вплив на вищу теплоту згоряння наявність у горючій речовині кисню й азоту, тому ми будемо користуватися більш точними формулами для розрахунку вищої і нижчої теплоти згоряння. Достатньо точні результати дає формула Менделєєва.

Для вищої теплоти згоряння:

$$Q'_B = 339,4 \cdot \varphi_C + 1256,8 \cdot \varphi_H + 108,9 (\varphi_S - \varphi_O - \varphi_N), \text{ кДж/кг}$$

де φ_O , φ_N - вміст кисню і азоту в горючій речовині.

Для нижчої теплоти згоряння:

$$Q''_B = Q'_B - 25,1(9 \cdot \varphi_H + W\%)$$

$$Q''_B = 339,4 \cdot \varphi_C + 1256,8 \cdot \varphi_H + 108,9 (\varphi_S - \varphi_O - \varphi_N) - 25,1(9 \cdot \varphi_H + W\%), \text{ кДж/кг}$$

де $W\%$ - вміст води в горючій речовині.

Формула Менделєєва справедлива як для речовин індивідуального хімічного складу, так і тоді, коли даний елемент входить у горючу речовину складного хімічного складу. Тому цю формулу можна застосовувати і до хімічно чистих речовин.

Більш точні результати дає аналогічна по своїй структурі формула Р.Фондрачека

$$Q''_B = (372,4 + 0,26C_T)C + 1128,6H - 112,86 + 104,5S - (225,74H + 25,08W),$$

де $C_T\%$ - частка вуглецю у відсотках до горючої маси речовини.

Надалі ми будемо користуватися тільки формулою Менделєєва і законом Гессу.

У випадку, коли горить суміш газів і відомий відсотковий вміст складових компонентів у цій суміші, теплоту згоряння можна виразити як:

$$Q''_{\text{гор сум}} = \sum_{i=1}^n Q''_{\text{гор } i} \frac{\varphi_i}{100}$$

де $Q''_{\text{гор } i}$ - теплота згоряння і-го компонента суміші, кДж/м³;
n - число компонентів горючої суміші;

φ_i – вміст i -го компоненту в горючій суміші у об'ємних відсотках, %.

Задача з визначення теплоти згоряння газової суміші розв'язується у декілька етапів.

Методика розрахунку теплоти згоряння газової суміші:

- 1) складається рівняння реакції горіння в повітрі для кожного горючого компоненту;
- 2) визначається теплота утворення кожного i -го компоненту суміші (значення добирається з довідників або визначається розрахунком);
- 3) визначається нижча або вища молярна теплота згоряння суміші;
- 4) отримані значення молярної теплоти згоряння перераховують в об'ємну теплоту згоряння;
- 5) на підставі отриманих значень визначається об'ємна теплота згоряння газової суміші.

Практичне значення теплоти згоряння

Теплота згоряння має велике практичне значення при розрахунку параметрів пожежної небезпеки речовин та параметрів розвитку пожежі.

1). Теплоту згоряння використовують для розрахунку пожежного навантаження $P_{\text{пож}}$, МДж/м², що є кількісною характеристикою теплового впливу пожежі на будівельні конструкції.

Під пожежним навантаженням P , МДж/м² розуміють кількість тепла, що може виділитися при згорянні речовин та матеріалів з одного квадратного метра поверхні підлоги приміщення. Пожежне навантаження є кількісною характеристикою теплового впливу на будівельні конструкції при пожежі. Пожежне навантаження визначають як суму добутків мас всіх горючих матеріалів на їх нижчу теплоту згоряння, віднесену до одиниці поверхні підлоги, і визначається за формулою:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n m_i Q_{\text{н}i}}{S_{\text{підл}}}, \text{ МДж/м}^2$$

Пожежне навантаження складається з тимчасового та постійного пожежного навантаження.

2). Нижча теплота згоряння використовується для визначення горючості речовини. Експериментально доведено, що речовини є негорючими, якщо вони не відносяться до вибухонебезпечних та їх нижча теплота згоряння менша за 2100 кДж/кг або 1830 кДж/м³.

3). Теплота згоряння речовини також використовується при розрахунку таких характеристик пожежної небезпеки речовин, як температура горіння, температура вибуху, максимальний тиск вибуху, нижча концентраційна межа поширення полум'я та інші параметри.

§ 4. Поняття та види температури горіння речовин

У результаті процесу горіння виділяється значна кількість теплової енергії, яка частково переходить у внутрішню енергію продуктів згоряння (нагрівання продуктів горіння), а частково витрачається на випромінювання із зони горіння і на попередню підготовку (нагрів та розкладання) речовин, що реагують.

Розглядаючи теплові ефекти процесу горіння, ми приймали, що $Q_{\text{гор}}$ визначається при умові, коли горюча суміш і продукти горіння знаходяться при однаковій температурі. Але горіння супроводжується сильним розігрівом продуктів горіння. Температура, до якої нагріваються продукти горіння, називається температурою горіння.

В залежності від умов, в яких протікає процес горіння розрізняють калориметричну, теоретичну, адіабатичну і дійсну температури горіння.

Під калориметричною температурою горіння розуміють температуру, до якої нагріваються продукти горіння, якщо виконуються наступні умови:

- 1) вихідна система знаходиться при стандартних умовах (початковій температурі 298К і тиску 101,3 кПа);
- 2) відбувається повне згоряння горючої речовини, при цьому повітря для горіння надходить у стехіометричному співвідношенні;
- 3) в процесі утворення продуктів горіння не відбувається їх дисоціація;

4) немає тепловтрат від системи в навколишнє середовище, а, отже, все тепло, що виділилося у процесі реакції, іде на нагрівання продуктів горіння. При цьому вода в продуктах горіння залишається в газоподібному стані, а, отже, в розрахунках потрібно використовувати нижчу теплоту згоряння.

$$Q_{\text{нед}} = Q_{\text{твт}} = 0, \quad Q_{\text{нагрів пг}} = Q_{\text{н}};$$

Нехай в умовах постійного тиску прореагувала вихідна суміш, що містить $n_{\text{ГС}}$ молів речовин горючої суміші ГС. В результаті реакції утворилося $n_{\text{кін}}$ молів продуктів реакції $A_{\text{кін}}$. Матеріальний баланс при цьому записується так:

$$\sum n_{\text{ГС}} \text{ГС} = \sum n_{\text{пг}} \text{ПГ}_i$$

Для знаходження температури горіння необхідно використовувати рівняння енергетичного балансу. Повна ентальпія суміші газів дорівнює сумі тепловмісту всіх її компонентів, отже для розглянутої реакції тепловий баланс має наступний вид:

для горіння при постійному тиску ($-dQ = dU + PdV = dH - VdP$)

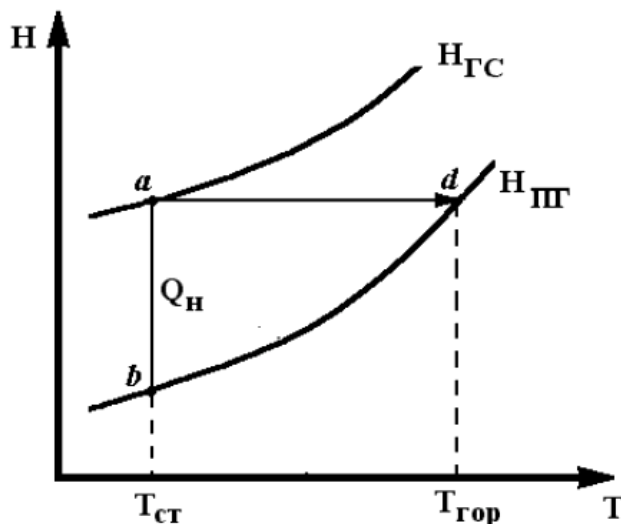
$$\sum n_{\text{ГС}} H_{\text{ГС}}^{T_0} = \sum n_{\text{пг}} H_{\text{пг}}^{T_{\text{гор}}}$$

для горіння при постійному об'ємі

$$\sum n_{\text{ГС}} U_{\text{ГС}}^{T_0} = \sum n_{\text{пг}} U_{\text{пг}}^{T_{\text{виб}}}$$

Ліва частина цих рівнянь виражає абсолютну ентальпію або внутрішню енергію вихідної горючої суміші при початковій температурі T_0 , а права — ентальпію або внутрішню енергію суміші продуктів горіння при температурі горіння $T_{\text{гор}}$ чи вибуху $T_{\text{виб}}$.

Тепловий ефект реакції при $P = \text{const}$, у якій реагенти і продукти реакції знаходяться за різних температур, визначається тільки початковим і кінцевим станом системи і не залежить від характеру зміни стану системи. Тоді перехід системи з початкового стану в кінцевий доцільно представити на діаграмі ентальпія H - температура T .



Криві відображають залежність від температури ентальпій вихідних реагентів горючої суміші і продуктів реакції.

Процес a-b зв'язаний з хімічною реакцією, процес b-d зв'язаний зі зміною температури продуктів реакції.

З термодинаміки відомо, що якщо відсутній теплообмін між системою і навколишнім середовищем (тепло із системи не витрачається), то процес відбувається в адіабатичних умовах, а зміна ентальпії системи при цьому дорівнює нулю, тобто

$$\Delta H = \sum n_{\text{ПГ}_i} \Delta H_{f_{\text{ПГ}_i}}^{T_{\text{гор}}} - \sum n_{\text{ГС}} \Delta H_{f_{\text{ГС}}}^0 = 0$$

Ці умови відповідають процесу a-d.

Нехай вихідні реагенти мали початкову температуру рівну $T_{\text{ст}}$ (точка a), а продукти реакції нагрілися до $T_{\text{гор}}$. (точка d). Тоді, виражаючи залежність ентальпії від температури через середні теплоємності $H(T) = H_{\text{ст}} + c_p(T - T_{\text{ст}})$, можна записати:

$$\sum n_{\text{ПГ}_i} \Delta H_{f_{\text{ПГ}_i}}^0 + \sum n_{\text{ПГ}_i} c_{p_{\text{ПГ}_i}} (T_{\text{гор}} - T_{\text{ст}}) - \sum n_{\text{ГС}} \Delta H_{f_{\text{ГС}}}^0 = 0$$

$$\left(\sum n_{\text{ПГ}_i} \Delta H_{f_{\text{ПГ}_i}}^0 - \sum n_{\text{ГС}} \Delta H_{f_{\text{ГС}}}^0 \right) + \sum n_{\text{ПГ}_i} c_{p_{\text{ПГ}_i}} (T_{\text{гор}} - T_{\text{ст}}) = 0$$

де $\Delta H_{f_{\text{ГС}}}$, $\Delta H_{f_{\text{ПГ}}}$ – молярні ентальпії утворення вихідних речовин горючої суміші і продуктів реакції.

Вираз у дужках дорівнює теплоті згоряння при стандартних умовах

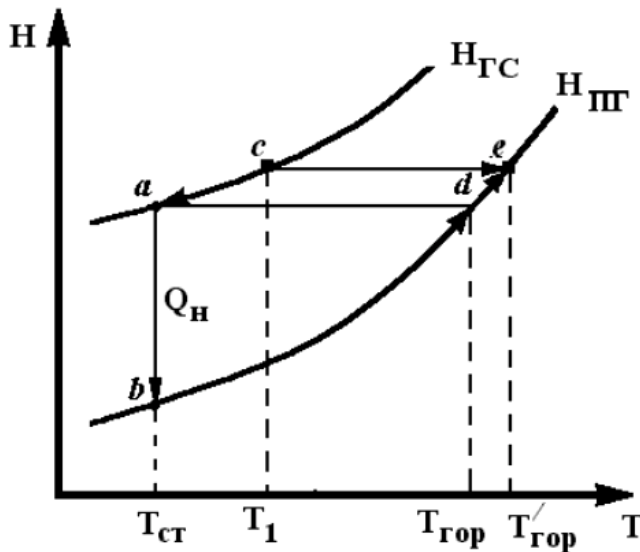
$$\sum n_{\text{ПГ}_i} \Delta H_{f_{\text{ПГ}_i}}^0 - \sum n_{\text{ГС}} \Delta H_{f_{\text{ГС}}}^0 = -Q_{\text{н}}$$

Тоді

$$(T_{\text{гор}} - T_{\text{ст}}) \sum n_{\text{ПГ}_i} c_{p_{\text{ПГ}_i}} = Q_{\text{н}}$$

$$T_{\text{гор, кал}} = T_{\text{ст}} + \frac{Q_{\text{н}}}{\sum n_{\text{ПГ}_i} c_{p_{\text{ПГ}_i}}}$$

Температура згоряння може бути збільшена при збагаченні повітря киснем, а також при попередньому підігріві вихідних реагентів. Вплив попереднього підігріву видно на діаграмі



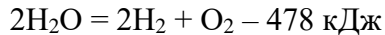
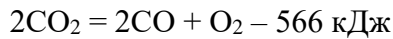
Умова постійності ентальпії відповідає процесу c-e. Тоді

$$\sum n_{\text{ПГ}_i} \Delta H_{f_{\text{ПГ}_i}}^0 + \sum n_{\text{ПГ}_i} c_{p_{\text{ПГ}_i}} (T_{\text{гор}} - T_{\text{ст}}) - \sum n_{\text{ГС}} \Delta H_{f_{\text{ГС}}}^0 - \sum n_{\text{ГС}} c_{p_{\text{ГС}}} (T_1 - T_{\text{ст}}) = 0$$

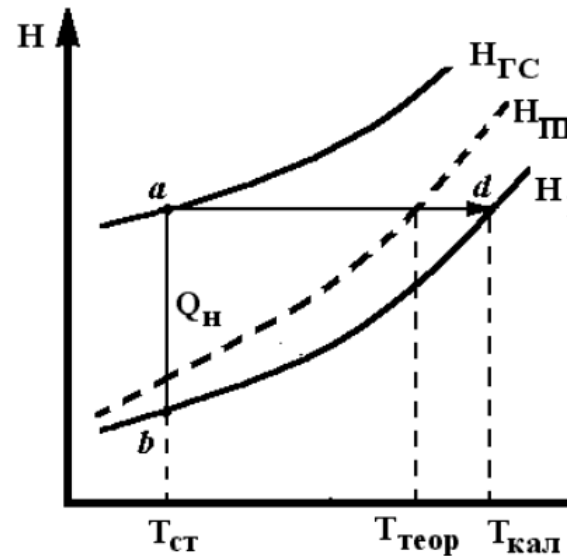
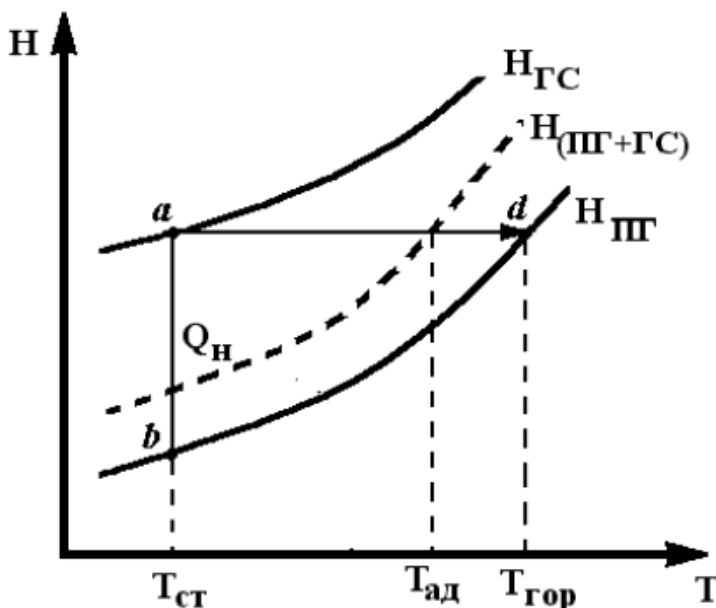
Звідси

$$T_{\text{гор}} = T_{\text{ст}} + \frac{Q_{\text{н}} + \sum n_{\text{ГС}} c_{p_{\text{ГС}}} (T_1 - T_{\text{ст}})}{\sum n_{\text{ПГ}_i} c_{p_{\text{ПГ}_i}}$$

Розглянутий наближений розрахунок температури горіння приводить до її завищення, тому що не враховує характер хімічної рівноваги при високій температурі. Якщо температура горіння достатньо висока, то продукти, що утворюються в процесі реакції, зокрема, молекул води, вуглекислого газу й інші продукти горіння можуть розкладатися на елементи, з яких вони утворені (дисоціювати), з витратою значної кількості тепла. Наприклад:



Наближений розрахунок стає тим більше неточним, чим вище температура горіння і нижче тиск, тобто чим сприятливіші умови для сильної дисоціації продуктів горіння. Так, при горінні в кисні вуглеводнів чи інших висококалорійних палив температура горіння виявляється дуже високою, і розрахунок по наближеній формулі приводить до великих помилок. Практично дисоціацію продуктів горіння необхідно враховувати при температурі вище 1700°С. Якщо тепловтрат в навколишнє середовище немає, але відбувається суттєва дисоціація продуктів горіння, то ступінь нагрятості продуктів горіння представляє теоретичну температуру горіння.



Теоретична температура горіння відрізняється від калориметричної тим, що у розрахунках враховуються тепловтрати на дисоціацію продуктів горіння.

$$T_{\text{гор теор}} = T_{\text{ст}} + \frac{Q_{\text{н}} - Q_{\text{дисоц}}}{\sum n_{\text{ПГ}_i} c_{p_{\text{ПГ}_i}}}$$

Як відомо, горіння може відбуватися при надлишку чи нестачі повітря. Врахування нерівноважного складу

вихідної суміші і відсутності теплообміну з навколишнім середовищем приводить до одержання адіабатичної температури горіння. Початкові температура та тиск горючої суміші є стандартними (298К, 101,3 кПа).

Крива залежності ентальпії від температури для продуктів неповної реакції (при нестачі повітря) лежить вище відповідної кривої для продуктів повного згоряння, тому що тепловий ефект незавершеної реакції менше, ніж завершеної при однаковій кінцевій температурі. У випадку надлишку повітря вся теплота згоряння витрачається на нагрівання як продуктів горіння, так і на нагрів надлишкового повітря.

$$T_{\text{гор (ад)}} = \frac{Q_{\text{н}}}{c_p v_{\text{шт}}} + T_{\text{ст}}$$

Дійсна температура горіння – це температура, до якої нагріваються продукти горіння в реальних умовах, при цьому враховується, що горіння може проходити з надлишком або нестачею повітря, (частина тепла, що виділяється при реакції згоряння, у першому випадку витрачається на нагрівання надлишку повітря, а в другому - не реалізується за рахунок недопалу пального), значними тепловтратами у навколишнє середовище, а початкові умови, в яких знаходиться горюча суміш, можуть бути будь-якими. Дійсна температура горіння завжди нижча за адіабатичну, але вона завжди визначається калориметричною температурою горіння.

$$T_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{н}} - Q_{\text{твт}} - Q_{\text{недоп}}}{c_p v_{\text{шт}}} + T_0$$

$Q_{\text{недоп}}$ - кількість тепла, яка не реалізується в зоні горіння внаслідок хімічного або фізичного недопалу.

Хімічний недопал можливий у випадку нестачі окислювача, фізичний недопал означає, що за якимись причинами не трапилось необхідного для реакції контакту між горючою речовиною та окислювачем.

Значення показника $Q_{\text{нед}}$ залежить від складу реагентів, а також від умов горіння. Наприклад, чим більше окислювача необхідно для згоряння одиниці кількості горючої речовини, тим більше значення $Q_{\text{нед}}$, бо необхідна кількість окислювача не встигає потрапити в зону реакції. Звичайно,

$$Q_{\text{нед}} = (1-\eta) Q_{\text{н}},$$

де η - коефіцієнт повноти згоряння $\eta = 0,9, 0,75$.

Про недопал можна судити по яскравому світінню у верхній частині полум'я при горінні речовини. Це пояснюється світінням розжарених до високої температури (порядку 900°C) твердих або рідких часток, звичайно вуглецю.

$Q_{\text{твт}}$ - кількість тепла, що втрачається з зони горіння внаслідок випромінювання, конвекційного теплообміну і теплопровідності. Втрати тепла з зони горіння можуть складати до 40% від теплоти згоряння речовини.

Розрізняють температури горіння:

Калориметрична	Теоретична	Адіабатична	Дійсна
$T_{\text{кал}}$	$T_{\text{теор}}$	$T_{\text{ад}}$	$T_{\text{дійсн}}$
$Q_{\text{шт}} = Q_{\text{н}}$	$Q_{\text{шт}} = Q_{\text{н}} - Q_{\text{дис}}$	$Q_{\text{шт}} = Q_{\text{н}}$	$Q_{\text{шт}} = Q_{\text{н}} - Q_{\text{твт}} - Q_{\text{нед}}$
$\alpha_{\text{п}} = 1$	$\alpha_{\text{п}} = 1$	$\alpha_{\text{п}} \geq 1$	$\alpha_{\text{п}} = \forall$
$T_{\text{поч}} = 273 \text{ К}$	$T_{\text{поч}} = 273 \text{ К}$	$T_{\text{поч}} = 273 \text{ К}$	$T_{\text{поч}} = \forall$
$P_{\text{поч}} = 101.3 \text{ кПа}$	$P_{\text{поч}} = 101.3 \text{ кПа}$	$P_{\text{поч}} = 101.3 \text{ кПа}$	$P_{\text{поч}} = \forall$

Фактори, що впливають на температуру горіння.

1) вид горючої речовини:

чим більшу теплотворну здатність має горюча речовина, тим більше тепла виділяється в процесі горіння, а, отже, тим більшою буде температура горіння;

2) склад горючої суміші:

якщо склад горючої суміші є стехіометричним, то в системі немає надлишку компоненту, який не приймає участі в хімічному перетворенні, отже тепло не витрачається на нагрів надлишкових речовин і температура горіння є максимальною. Якщо в системі є надлишок окисника або горючої речовини, то тепло, що виділяється в ході реакції, витрачається додатково на нагрів компонентів, які не беруть участі в протіканні хімічної реакції, а температура горіння зменшується.

3) умови, в яких знаходиться горюча суміш:

чим більша початкова температура, тим більшою буде температура горіння; чим більший початковий тиск в горючій системі, тим менше відбувається процес дисоціації продуктів горіння, а, отже, більшою буде температура горіння. При збільшенні тепловтрат від системи в навколишнє середовище температура горіння буде зменшуватися.

Експериментально визначити температуру горіння більшості речовин досить складно, що обумовлено необхідністю проведення досліду при підвищених температурах, до того ж треба вимірювати температуру газу, який знаходиться в стані хімічного перетворення. Однак, теорія дозволяє з достатньою точністю розрахувати температуру горіння, виходячи з закону збереження енергії та на підставі хімічного складу речовини.

§ 5. Визначення температури горіння індивідуальних речовин та матеріалів складного складу

5.1 Визначення температури горіння з використанням ентальпії продуктів горіння

Задавши деяким значенням T по вихідному складу реагуючої суміші з рівнянь рівноваги і збереження числа атомів, визначають її рівноважний склад, а потім підраховують повну ентальпію системи. Такий розрахунок проводиться для декількох температур, так що можна побудувати криву залежності тепловмісту продуктів горіння від температури. Значення температури, при якому тепловміст продуктів горіння дорівнює початковому, і є шукана адіабатична температура горіння.

Розрахунок температури горіння для речовин індивідуального та складного складу має деякі відмінності, але у цілому методика однакова.

Індивідуальна речовина	Складна речовина
1. Скласти рівняння реакції горіння.	
2. Визначити питомий теоретичний об'єм повітря	
$v_{\text{п}}^{\circ} = 4,76\beta$, $\text{м}^3/\text{м}^3$	для конденсованих речовин

	$v_{\text{п}}^0 = 0,267 \left(\frac{C}{3} + H + \frac{S - O}{8} \right), \text{ м}^3/\text{кг}$ <p>для суміші газів $v_{\text{п}}^0 = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i \varphi_i - \varphi_{\text{O}_2}}{21}, \text{ м}^3/\text{м}^3$</p>
3. Визначається питомий теоретичний об'єм продуктів згорання	
$v_{\text{пр}}^0 = \sum n_{\text{пг}i}$	$v_{\text{пр}}^0 = \sum v_{\text{пг}i}$ (за допомогою таблиць)
4. Визначається питомий дійсний об'єм продуктів згорання з урахуванням надлишку повітря $v_{\text{пр}} = v_{\text{пр}}^0 + (\alpha_{\text{п}} - 1) v_{\text{п}}^0$	
5. Визначається нижча теплота згорання речовини	
За законом Гесса $Q_{\text{н}} = \left \sum_i n_i H_{\text{фгп}i}^0 - H_{\text{фгп}}^0 \right , \text{ кДж/моль}$	для суміші газів $Q_{\text{н}}'' = \sum \tau_i Q_{\text{н}i}''$, кДж/м ³ для конденсованих речовин $Q_{\text{н}}' = 339,4 \cdot \varphi_{\text{C}} + 1256,8 \cdot \varphi_{\text{H}} + 108,9 (\varphi_{\text{S}} - \varphi_{\text{O}} - \varphi_{\text{N}}) - 25,1(9 \cdot \varphi_{\text{H}} + W\%), \text{ кДж/кг}$
6. Визначається середня ентальпія продуктів згорання $\Delta H_{\text{ср}}$ $\Delta H_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{н}}}{v_{\text{пр}}}$	
7. Орієнтуючись на ентальпію азоту, визначити температуру горіння T_1 у першому наближенні з використанням даних тепловмісту продуктів горіння при різних температурах	
8. Визначити тепловміст продуктів горіння $Q_{\text{пр}}^{T_1}$ при температурі горіння T_1 $Q_{\text{пр}}^{T_1} = \sum (H_{\text{пг}i}^{T_1} n_{\text{пг}i}), \text{ кДж/моль};$	
9. Визначити температуру горіння в другому наближенні, виходячи з умови: $T_2 > T_1$, якщо $Q_{\text{пр}}^{T_1} < Q_{\text{н}}$, або $T_2 < T_1$, якщо $Q_{\text{пр}}^{T_1} > Q_{\text{н}}$;	
10. Визначається тепловміст продуктів горіння $Q_{\text{пр}}^{T_2}$ при температурі горіння T_2 $Q_{\text{пр}}^{T_2} = \sum (H_{\text{пг}i}^{T_2} n_{\text{пг}i}), \text{ кДж/моль};$	
11. Визначається температура горіння методом лінійної інтерполяції $T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \cdot (Q_{\text{н}} - Q_{\text{пр}}^{T_1})}{(Q_{\text{пр}}^{T_2} - Q_{\text{пр}}^{T_1})},$	

Приклад розв'язання задачі

Визначити адіабатичну температуру горіння бензолу, якщо горіння здійснювалось з надлишком повітря $\alpha_{\text{п}} = 1,3$.

Рішення

1. Визначаємо питомий об'єм продуктів згорання з урахуванням надлишку повітря.

1.1. Складаємо рівняння реакції горіння



1.2. Визначаємо питомий об'єм повітря, необхідного для згорання

$$v_{\text{п}}^{\circ} = 7,5 \cdot 4,76 = 35,7, \text{ моль/моль};$$

1.3. Визначаємо питомий об'єм продуктів згорання з урахуванням надлишку повітря

$$v_{\text{пр}} = 6 + 3 + 7,5 \cdot 3,76 + (1,3-1) \cdot 7,5 \cdot 4,76 = 47,91, \text{ моль/моль}.$$

2. Визначаємо нижчу молярну теплоту згорання речовини з закону Гесса.

Теплота її утворення дорівнює $\Delta H^{\circ}_f = +82,927 \text{ кДж/моль}$.

$$Q_{\text{н}} = | 6 \cdot (-393,51) + 3 \cdot (-241,99) + 82,927 | = 3170,11, \text{ кДж/моль}.$$

3. Визначаємо середню ентальпію продуктів згорання

$$\Delta H_{\text{сер}} = \frac{3170,11}{47,91} = 66,2, \text{ кДж/моль}.$$

4. Орієнтуючись на ентальпію азоту, визначаємо температуру горіння T_1 у першому наближенні, $T_1 = 2000 \text{ К}$.

5. Визначаємо тепловміст продуктів горіння $Q_{\text{пр1}}$ при температурі горіння T_1

$$Q_{\text{пр1}} = 6 \cdot 100,71 + 3 \cdot 83,02 + 7,5 \cdot 3,76 \cdot 64,81 + (1,3-1) \cdot 7,5 \cdot 4,76 \cdot 65,44 = 3381,82, \text{ кДж/моль}.$$

6. Визначаємо температуру горіння у другому наближенні. Виходячи з того, що тепловміст продуктів горіння при температурі $T_1 = 2000 \text{ К}$ виявився вищим за нижню теплоту згорання, приймаємо T_2 рівним 1800 К .

7. Визначаємо тепловміст продуктів горіння $Q_{\text{пр2}}$ при температурі горіння T_2

$$Q_{\text{пр2}} = 6 \cdot 88,7 + 3 \cdot 72,82 + 7,5 \cdot 3,76 \cdot 57,65 + (1,3-1) \cdot 7,5 \cdot 4,76 \cdot 58,2 = 2999,7, \text{ кДж/моль}.$$

8. Визначаємо температуру горіння методом лінійної інтерполяції

$$T_{\text{ад}} = 2000 + \frac{(1800 - 2000)(3170,11 - 3381,82)}{(2999,71 - 3381,82)} = 1889,2, \text{ К}.$$

Приклад розв'язання задачі

Визначити температуру горіння деревини наступного складу: С-46%, Н-5.5%, О-39.2%, N - 0.9%, волога W - 7%, зола А - 1,4% Горіння відбувалося за нормальних умов з надлишком повітря $\alpha_{\text{п}}=1,5$.

1. Визначаємо питомий об'єм продуктів згорання з урахуванням надлишку повітря:

1.1. Визначаємо питомий об'єм повітря, необхідного для згорання

$$V_{\text{пов}}^{\circ} = 0,286 \left(\frac{46}{3} + 5,5 - \frac{39,2}{8} \right) = 4,54, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

1.2. Визначаємо питомий об'єм продуктів згорання. Для зручності складаємо таблицю

Хімічний елемент та його масова частка	Об'єм продуктів згорання, кг/м ³		
	CO ₂	H ₂ O	N ₂
C=0,46	0,46 ·1,87		0,46× 7
H=0,055		0,055 ·11,2	0,055× 21
N=0,09			0,09× 0,8
O=0,392			-0,392× 2,63
W= 0,07		0,07 ·1,24	
Всього	0,86	0,703	3,42

$$v_{\text{пр}}^{\circ} = 0,86 + 0,703 + 3,42 = 4,98 \text{ , м}^3/\text{кг.}$$

1.3. Визначаємо питомий об'єм продуктів згоряння з урахуванням надлишку повітря

$$v_{\text{пр}} = 4,98 + (1,5 - 1) \cdot 4,54 = 7,25 \text{ , м}^3/\text{кг.}$$

2. Визначаємо нижчу теплоту згоряння деревини за формулою Менделєєва

$$Q'_{\text{н}} = 339 \cdot 46 + 1257 \cdot 5,5 - 109 \cdot (39,2 + 0,9) - 25 \cdot (9 \cdot 5,5 + 7) = 16724 \text{ , Дж/кг.}$$

3. Визначаємо середню ентальпію продуктів згоряння

$$\Delta H_{\text{ср}} = \frac{16724}{7,25} = 2307 \text{ , кДж/м}^3$$

4. Орієнтуючись на ентальпію азоту, визначаємо температуру горіння T_1 у першому наближенні $T_1 = 1400 \text{ К.}$

5. Визначаємо тепловміст продуктів горіння $Q_{\text{пр1}}$ при температурі горіння T_1

$$Q_{\text{пр1}} = 0,86 \cdot 2908,97 + 0,7028 \cdot 2387,77 + 3,36154 \cdot 1946,0 + (1,5 - 1) \cdot 4,28 \cdot 1963,41 = 14923,69 \text{ кДж/кг.}$$

6. Визначаємо температуру горіння в другому наближенні. Тепловміст продуктів горіння виявився нижчим за теплоту згоряння речовини, тому приймаємо нове значення температури більше, ніж попереднє значення.

$$T_2 = 1600 \text{ К.}$$

7. Визначаємо тепловміст продуктів горіння $Q_{\text{пр2}}$ при температурі горіння T_2

$$Q_{\text{пр2}} = 0,86 \cdot 3430,17 + 0,7028 \cdot 2809,91 + 3,362 \cdot 2257,03 + (1,5 - 1) \cdot 4,28 \cdot 227 = 17387,44 \text{ кДж/кг.}$$

8. Визначаємо температуру горіння методом лінійної інтерполяції.

$$T_{\text{ад}} = 1400 + \frac{(1600 - 1400)(16724 - 14923,7)}{(17387,4 - 14923,7)} = 1546 \text{ , К}$$

5.2 Визначення температури горіння з використанням ентальпії продуктів горіння

Розрахунок температури горіння для речовин індивідуального і складного складу може бути проведений з використанням залежності теплоємності продуктів горіння від їх температури.

Для визначення температури горіння використовується рівняння, що враховує взаємозв'язок кількості тепла, що виділилось при горінні, об'єму і теплоємності продуктів горіння.

$$T_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{н}}}{\sum v_{\text{пр}i} c_{\text{р}i}} + T_{\text{ст}} \text{ , К.}$$

У свою чергу середня теплоємність продуктів горіння залежить від їх температури. Ця залежність виражається рівнянням:

$$c_{\text{р}} = a + b t_{\text{ср}} = a + b(t_{\text{гор}} + t_{\text{ст}})/2 \text{ , кДж/(моль} \cdot \text{К); кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$$

Тоді

$$T_{\text{гор}} - T_{\text{ст}} = \frac{Q_{\text{н}}}{\sum \left[v_{\text{пр}i} \left(a_{\text{пр}i} + b_{\text{пр}i} \frac{t_{\text{гор}} + t_{\text{ст}}}{2} \right) \right]}$$

$$T_{\text{гор}} - T_{\text{ст}} = t_{\text{гор}}$$

Дане рівняння є квадратичним щодо температури горіння. Перетворимо вираження в дужках

$$a + b(t_{\text{гор}} + t_{\text{ст}})/2 = (a + b t_{\text{ст}}/2) + t_{\text{гор}} b/2 = a' + b' t_{\text{гор}}$$

$$\text{Позначимо } \sum v_{\text{пр}i} a_i' = a_{\text{сум}},$$

$$\sum v_{\text{пр}i} b_i' = b_{\text{сум}}.$$

$$\text{Тоді } b_{\text{сум}} t_{\text{гор}}^2 + a_{\text{сум}} t_{\text{гор}} - Q_{\text{н}} = 0$$

Вирішуючи рівняння, одержуємо температуру горіння:

$$t_{ад} = \frac{-a_{сум} + \sqrt{a_{сум}^2 + 4b_{сум} Q_H \cdot 10^3}}{2b_{сум}}, \text{ } ^\circ\text{C}$$

Методика розрахунку температури горіння

1. Визначити питомий об'єм продуктів горіння та їх склад з урахуванням надлишку повітря:

1.1. Для речовин індивідуального складу - з рівняння реакції горіння речовини у повітрі.

1.2. Для речовин складного складу - з використанням таблиць питомих об'ємів продуктів горіння.

2. Визначити нижчу теплоту згорання речовини.

3. Визначити константи a і b рівняння $c_p^o = a + bt$ для кожного продукту горіння за таблицею.

4. Розрахувати константи $a_{сум}$ і $b_{сум}$ для суміші продуктів горіння із урахуванням кількості кожного з продуктів горіння.

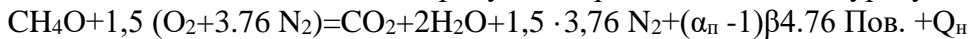
5. Розраховується температура горіння за визначеною формулою.

Приклад розв'язування задач

Розрахувати адіабатичну температуру горіння метанолу, якщо горіння здійснювалось з коефіцієнтом надлишку повітря рівним $\alpha_{п}=1,7$.

Рішення

1. Визначаємо питомий об'єм продуктів горіння та їх склад з урахуванням надлишку повітря:



Об'єм діоксиду вуглецю $n(\text{CO}_2) = 1$, моль/моль;

Об'єм води $n(\text{H}_2\text{O}) = 2$, моль/моль;

Об'єм азоту $n(\text{N}_2) = 1,5 \cdot 3,76 = 5,64$, моль/моль;

Об'єм надлишку повітря $n(\text{пов.}) = (1,7 - 1) 1,5 \cdot 4,76 = 4,998$, моль/моль.

2. Визначаємо нижчу теплоту згорання:

$$Q_H = | 1 \cdot (-393,78) + 2 \cdot (-241,84) - (-239,0) | = 638,46, \text{ кДж/моль.}$$

3. Визначаємо константи рівнянь $c_p^o = a + v \cdot t_{ср}$, для речовин, що входять у склад продуктів горіння:

	a_i	b_i
Повітря	29,830	$2,030 \cdot 10^{-3}$
N_2	29,143	$2,135 \cdot 10^{-3}$
CO_2	46,835	$4,520 \cdot 10^{-3}$
$\text{H}_2\text{O} (\text{г})$	33,193	$5,355 \cdot 10^{-3}$

4. Розраховуємо константи рівняння для суміші продуктів горіння $a_{сум}$ і $b_{сум}$:

	$a_{сум}$	$b_{сум}$
Повітря	$29,830 \cdot 4,998$	$2,030 \cdot 10^{-3} \cdot 4,998$
N_2	$29,143 \cdot 5,64$	$2,135 \cdot 10^{-3} \cdot 5,64$
CO_2	$46,835 \cdot 1$	$4,520 \cdot 10^{-3} \cdot 1$
$\text{H}_2\text{O} (\text{г})$	$33,193 \cdot 2$	$5,355 \cdot 10^{-3} \cdot 2$
Продукти горіння	426,678	$37,417 \cdot 10^{-3}$

5. Розраховуємо температуру горіння по формулі:

Висновок: Адіабатична температура горіння метанолу, при його горінні з надлишком повітря $\alpha_{п}=1,7$, складе $T_{ад} = 1352,5 + 273 = 1625,5 \text{ К.}$

5.3 Визначення температури горіння експериментально

На практиці використовується метод визначення температури горіння за кольором тіл, нагрітих у зоні горіння. Зміна спектру випромінювання залежить від температури нагрітого тіла. Чим вища температура тіла, тим вища інтенсивність та яскравість випромінювання. На підставі цього правила можна визначити температуру горіння. Дані про колір нагрітих тіл зведені у таблиці

Орієнтовні значення температури нагрітих тіл за їх світловипромінюванням

Колір нагрітих тіл	Температура тіла, °C
Червоний ледве видимий	550
Темно - червоний	700
Вишнево - червоний	900
Жовтогарячий	1100
Білий	1400

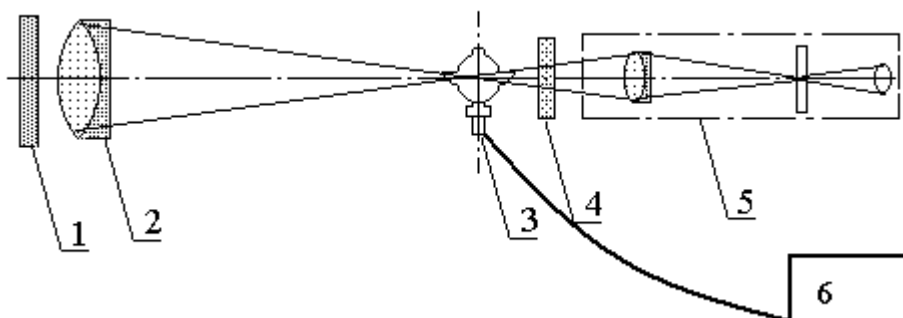
Для визначення температури горіння в пожежній охороні широко використовують оптичні пірометри, такі як ОПР та “Промінь”.

Оптичний пірометр “Промінь” призначається для виміру температури тіл, які нагріти до температури їх випромінювання. Температура тіл визначається по спектральній яскравості випромінювання та яскравості ниті розжарення еталонної електричної лампочки. Виходячи з закону Стефана- Больцмана випромінювальна здібність реальних тіл має наступну залежність від температури:

$$E = \epsilon \epsilon_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

Температуру визначають з монохромної яскравості при суміщенні яскравості тіла, що нагріто і випромінює, з яскравістю еталонної лампочки. При вірному регулюванні розжарення еталонної лампочки її зображення зникає.

Оптичний пірометр “Промінь” складається з наступних частин:



1. Поглинаюче скло; 2. об'єктив; 3. лампа спеціальна; 4. світлофільтр; 5. окуляр;
6. блок вимірювання температури;

Для визначення температури потрібно направити об'єктив на тіло, що випромінює світло. Оптичний пірометр показує дійсну температуру тіла тільки у тому випадку, коли нагріте тіло, яке випромінює, за своїми фізичними властивостями близько до абсолютно чорного тіла. Але реальні

тіла мають ступінь чорноти менше одиниці, отже, температура, яка визначається пірометром, буде менше ніж реальна температура тіла.

Розділ 2 Виникнення процесів горіння

Глава 1. Концентраційні межі поширення полум'я.

Вся різноманітність проявів горіння може бути віднесена до двох основних явищ — виникненню і поширенню горіння. Сьогодні ми починаємо вивчення другого великого розділу предмету “Виникнення горіння”.

Виникнення горіння завжди є підсумком прогресуючого самоприскорення реакції, яке стає можливим тільки при наявності певних умов. Такими умовами є наявність горючої суміші, яка складається з горючої речовини та окисника, взятих в певному співвідношенні, та теплового імпульсу достатньої потужності. Розглянемо докладніше ці умови.

Сьогодні ми розглянемо тему 3 “Умови утворення горючого середовища. Концентраційні межі поширення полум'я”.

§ 1. Умови утворення горючого середовища.

Потужний розвиток промисловості призвів до значних антропогенних порушень і техногенної переважаності території України, і, як наслідок, до зростання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій різного характеру. Попередження НС природного та техногенного характеру є актуальною проблемою сучасності. На підставі ст.1 Закону України „Про правові засади цивільного захисту” питаннями забезпечення пожежної безпеки, запобігання і реагування на інші надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру займається державна служба - служба цивільного захисту.

У багатьох технологічних процесах обертаються горючі речовини та матеріали, які при певних умовах можуть утворювати різноманітні суміші з окислювачем (повітрям). Наприклад, при витоку горючих газів в атмосферу, підсосі атмосферного повітря у вакуумований апарат, неправильній роботі технологічних агрегатів, коли газові потоки прямують в лінії, які для них не призначені, можуть утворюватися газоповітряні та пароповітряні суміші. Концентрація горючого компонента в цих сумішах може бути в межах від частки процента до 100%. Однак не всі з цих концентрацій становлять небезпеку виникнення горіння.

Горючим є середовище, яке здатне самостійно горіти після усунення джерела запалення.

Запобігання аварій (вибухів чи пожеж) на подібних виробництвах засновується на трьох основних принципах:

1. виключення виникнення джерел запалювання;
2. виключення можливості утворення горючих систем;
3. у випадках, коли неможливо запобігти утворенню вибухонебезпечних систем і виникненню джерел запалювання, використовують вогнеперешкоджувачі.

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

1.1. Поняття концентраційних меж поширення полум'я.

Досвід показує, що виникнення та поширення горіння в сумішах горючої речовини і окислювача можливе тільки в обмеженому діапазоні їх концентрацій. 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 парогазових сумішей можна виділити як мінімальну, так і максимальну концентрацію горючої речовини, за якої настають критичні умови виникнення та поширення полум'я. Тобто,

для сумішей, які містять горючу речовину і окислювач, розрізняють нижню φ_n і верхню φ_v концентраційні межі поширення полум'я.

НКМПП - найменша концентрація горючої речовини в суміші з повітрям, при якій вже можливе виникнення та поширення горіння.

ВКМПП - найбільша концентрація горючої речовини в суміші з повітрям, при якій ще можливе виникнення та поширення горіння.

Перші відомості про наявність концентраційних меж були дані в роботі Малляра і Ле-Шательє в 1883 році. Чимало досліджень було присвячено поясненню природи КМПП. На теперішній час існують теплова і ланцюгова теорії поширення полум'я.

Ланцюгова теорія пояснює наявність концентраційних меж існуванням такого стану в системі, коли швидкість утворення активних центрів полум'я в розгалужених ланцюгових реакціях дорівнює швидкості обриву реакційних ланцюгів за рахунок загибелі активних центрів полум'я. При зменшенні концентрації одного із компонентів горючої суміші менше ніж критичне значення швидкість реакції розгалуження стає менше ніж швидкість обриву ланцюгової реакції, отже швидкість реакції горіння в цілому зменшується, система переходить в стан повільної реакції окислення, горіння припиняється.

Теплова теорія пояснює наявність КМПП тепловими втратами від зони реакції в навколишнє середовище. Для виникнення горіння необхідною умовою є перевищення інтенсивності тепловиділення над інтенсивністю тепловіддачі. Інтенсивність тепловтрат збільшується при зменшенні швидкості горіння, оскільки при цьому збільшується тривалість процесу тепловіддачі від кожного елемента нагрітого газу. При певній критичній інтенсивності тепловиділення та тепловіддачі тепловий режим горіння перестає бути стаціонарним, зона реакції прогресивно охолоджується, реакція окислення гальмується, полум'я загасає.

Інтенсивність тепловиділення насамперед залежить від швидкості хімічної реакції:

$$q(+) = Q_n V_{гс} W_{хр}$$

Швидкість окислення, в свою чергу, залежить від концентрації компонентів горючої суміші.

$$W_{хр} = \varphi_{гр}^n \varphi_{ок}^m k \exp(-E_{акт}/RT)$$

Максимальна швидкість реакції спостерігається при стехіометричному співвідношенні компонентів. По мірі пониження вмісту одного з компонентів горючої суміші (при відхиленні від стехіометричного співвідношення) меншає швидкість хімічної реакції, а з нею і інтенсивність тепловиділення. Значна частина енергії, що виділилася внаслідок взаємодії, затрачується на нагрів газу, який не бере участі в процесі горіння.

Так, при $\varphi_{гр} < \varphi_{стм}$ швидкість тепловиділення меншає через нестачу пального, а розігрівання існуючого надлишку окислювача приводить до додаткових тепловтрат. При $\varphi_{гр} > \varphi_{стм}$ зниження тепловиділення відбувається через нестачу окислювача, а тепловтрати збільшуються на розігрівання надлишку палива, що не бере участі в хімічній реакції.

Область концентрації горючої речовини, яка лежить між нижньою і верхньою КМПП, характеризується можливістю запалення і стійкістю горіння суміші і 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 струменю газу в навколишній простір і наявності джерела запалювання (сумішоутворення до потрібних горючих концентрацій буде відбуватися в зоні горіння).



БК – область безпечних концентрацій;

ВНК – область вибухонебезпечних концентрацій;

ПНК – область пожежонебезпечних концентрацій. КМПП являють собою найважливіший параметр, який характеризує вибухонебезпеку горючих речовин в будь-якому агрегатному стані. Навіть, якщо речовина знаходиться в конденсованому стані, перше ніж виникне горіння в більшості випадків відбувається перехід цих речовин в газоподібний стан за рахунок випаровування або розкладання.

1.2. Методи визначення концентраційних меж.

Існує безліч експериментальних і розрахункових способів визначення КМПП.

Для експериментального знаходження КМ застосовують різні прилади, але найбільше поширення для визначення меж запалення газоподібних вуглеводневих горючих речовин при кімнатній температурі і атмосферному тиску отримав прилад КМ. Основою приладу є реакційна судина, виконана з термостійкого скла, достатнього діаметру, щоб виключити гасячий вплив стінок, і достатньої довжини, щоб пересвідчитися, що горіння, яке виникає, може поширюватися по суміші скіль завгодно далеко від джерела запалювання.

Так, більш точні дослідження останніх років показали, що концентраційні межі, при яких відбувається поширення полум'я, не співпадають з концентраційними межами, при яких взагалі можливе виникнення горіння. При розташуванні ДЗ у верхній частині горючої суміші відбувається поширення полум'я зверху вниз. За рахунок впливу сил природної конвекції на процес тепло- і масопередачі при горінні, значна частина тепла поступає не до свіжої горючої суміші, а несеться з продуктами горіння вгору. Існують такі граничні концентрації суміші, при яких відбувається тільки запалення, але полум'я від точки запалювання або не поширюється, або поширення полум'я йде тільки в горизонтальному напрямі, після чого полум'я згасне, не розповсюджуючись на шари газової суміші, які лежать нижче. Отже запалення в верхній частині реакційної труби можливе лише в більш вузькому діапазоні концентрацій.

У практичній діяльності частіше доводиться використовувати розрахункові методи визначення КМПП.

НКМПП можна визначити за мінімальної енергії, необхідної для підтримки процесу горіння.

$$\frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{кр}}} = \frac{100\%}{\varphi_{\text{н}}^{\circ}, \%}$$

Встановлено, що кількість тепла, що виділяється при горінні бідних сумішей, для більшості вуглеводневих горючих речовин приблизно дорівнює 1830 кДж/м³.

З пропорції можна визначити НКМПП як:

$$\varphi_{\text{н}}^{\circ} = 100 \frac{Q_{\text{кр}}^{\text{II}}}{Q_{\text{н}}^{\text{II}}} = \frac{183000}{Q_{\text{н}}^{\text{II}}} \cdot \% \quad \text{¶}$$

Загальне рівняння для визначення НКМПП довольного газу у довольному окислювальному середовищі має вид:

$$\varphi_{\text{н}}^{\circ} = \frac{100}{1 + h_{\text{f}} \Delta H_{\text{f}}^{\circ} + \sum_{j=1}^n h_j m_j + \sum_{s=1}^q h_s l_s}, \% \quad \text{¶}$$

де h_{f} - параметр теплоти утворення газу;

H_{f}° - стандартна теплота утворення речовини;

h_j - параметр j-го елемента в молекулі горючої речовини;

m_j - число атомів j-го елемента в молекулі горючої речовини.

Параметри h_{f} і h_j розраховуються для речовин даного класу в даному окислювальному середовищі з припущення, що адіабатична температура горіння бідних граничних сумішей є для речовин одного класу величиною приблизно однаковою, рівною 1500К. Значення цих параметрів зведені в таблиці, які можна знайти в довіднику Баратова.

h_f	h_j					h_s
	h_C	h_H	h_O	h_N	h_{Cl}	$h_{C=C}$
0,0246	9,134	2,612	-0,522	-0,494	-3,57	7,88

Більш простим методом розрахунку концентраційних меж є емпіричний метод по формулі:

$$\Phi_{H(B)}^o = \frac{100}{a\beta + b}, \%$$

де β - стехіометричний коефіцієнт реакції горіння;

a, b - константи, що визначаються для нижньої і верхньої КМПП:

		a	b
НКМПП		8,684	4,679
ВКМПП	$\beta < 7,5$	1,550	0,560
	$\beta > 7,5$	0,768	6,554

Для більш точного визначення концентраційних меж поширення полум'я необхідно враховувати вплив хімічної будови горючої речовини на схильність її до окислення. Для розрахунку концентраційних меж можна використовувати наступну формулу:

$$\Phi_M^o = \frac{100}{s \sum_{\mu=1} h_s l_s}, \%$$

де h_s - вклад s -тої структурної групи,

l_s - число s -тих структурних груп у хімічній формулі речовини.

Вигляд структурної групи	h_s	
	НКМПП	ВКМПП
C-C	3.75	-0,84
C-H	4.47	1,39
C-O	0.90	-1,40
C=O	3.12	1,31

Концентраційні межі можуть виражатися як в об'ємних відсотках (%) - об'ємна концентрація, так і в грамах на кубометр - масова концентрація. Для перерахунку об'ємної концентрації у масову та назад можна користуватися формулою:

$$\Phi_M' = 10\Phi_M^o \frac{\mu}{V_\mu}, \text{Г}\cdot\text{М}^{-3}$$

Всі перераховані методи розрахунку КМ використовуються у разі атмосферного тиску і кімнатної температури при умові, що окислювачем є повітря. Однак в практиці зустрічаються випадки, коли вибухонебезпечні суміші можуть утворюватися при підвищених температурах і тиску, а також в середовищі, збагаченому киснем або негорючими газами. Існують методи перерахунку КМПП, в яких використовуються значення КМ, отриманих за стандартних умовах.

У тих випадках, коли у виробництві обертається декілька різних горючих речовин і вони утворюють складну горючу суміш, концентраційні межі такої суміші розраховують виходячи з правила Ле Шательє, в основі якого припущення, що горючі властивості складної суміші адитивні. За правилом Ле Шательє багатоконпонентна система, яка складається із декількох бінарних сумішей граничного складу, взятих в довільному співвідношенні, також є граничною.

$$\varphi_{\text{М сум}}^{\circ} = \frac{\sum \varphi_i^{\circ}}{\sum \frac{\varphi_i^{\circ}}{\varphi_{\text{М}i}^{\circ}}}, \%$$

де $\varphi_{\text{М}i}$ - нижня або верхня КМПП кожного i -го горючого компоненту,
 φ_i - процентний вміст i -го компоненту в суміші.

Досвід показує, що правило Ле-Шательє виконується не завжди, а тільки в тих випадках, коли перетворення в полум'ї кожного компонента не впливає каталітично один на одне. Правило не виконується для багатих повітряних сумішей горючих, які сильно відрізняються по своїй хімічній активності.

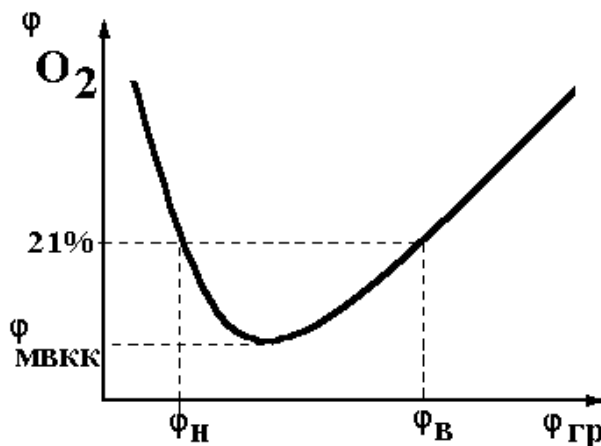
§ 2. Чинники, що впливають на концентраційні межі.

Концентраційні межі поширення полум'я можуть сильно змінюватися при зміні зовнішніх умов. Зміни КМПП можуть бути пояснені з точки зору теплового балансу тепловиділення і тепловіддачі в системі. Всі чинники, зміна яких приведе до збільшення тепловиділення, будуть розширювати КМПП (знижувати нижню КМПП і підвищувати верхню КМПП), а чинники, які збільшують тепловіддачу, будуть звужувати область запалення (збільшувати нижню КМПП і зменшувати верхню КМПП). Найбільше значення в зміні КМПП мають:

- концентрації окислювача в окислювальному середовищі;
- домішки інертних газів (флегматизаторів);
- температура і тиск суміші;
- потужність ДЗ;
- ступінь турбулізації газового потоку;
- добавки каталізаторів і інгібіторів.

Концентрація кисню в окислювальному середовищі

Збільшення концентрації кисню в окислювальному середовищі від 21% в повітрі до 100% приведе до збільшення швидкості хімічної реакції, а, отже, і інтенсивності тепловиділення, що приведе до розширення зони вибухонебезпечних концентрацій.



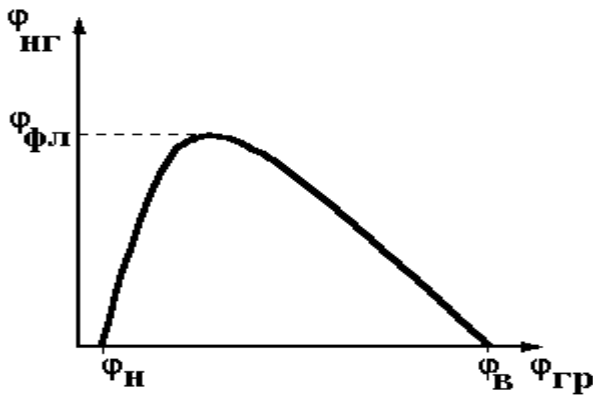
При зниженні концентрації окислювача КМПП вужчають, і є таке мінімальне значення концентрації окислювача, при якому нижня і верхня КМПП зіллються. Така концентрація кисню називається мінімальною вибухонебезпечною, і позначається $\varphi_{\text{МВКК}}$.

Концентрація інертних компонентів

При введенні інертних газів в горючу суміш область вибухонебезпечних концентрацій вужчає, в основному за рахунок верхньої КМПП, так як в сумішах при НКМПП завжди є велика

нестача горючої речовини і надлишок кисню. Надлишковий кисень сам відіграє роль інертної домішки, тому введення до суміші негорючих домішок замість кисню не змінює чисельне значення нижньої концентраційної межі. При ВКМПП кисню недостатньо для повного горіння, тому при збільшенні вмісту інертних домішок ВКМПП різко меншає.

За певної концентрації негорючого газу, так званій флегматизуючій концентрації, обидві межі зливаються і суміш стає пожежобезпечною.



Це пояснюється уповільненням хімічної реакції через зменшення кількості ефективних зіткнень між молекулами ГР і ОК, що в свою чергу веде до зниження тепловиділення.

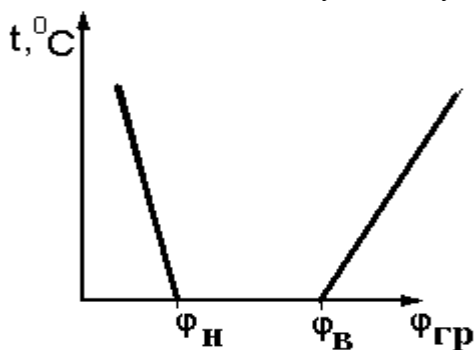
На числове значення мінімальної флегматизуючої концентрації впливає від негорючої домішки. Ефект припинення горіння за допомогою інертних розріджувачів залежить не тільки від їх концентрації, але і від теплофізичних характеристик флегматизатора: теплоємності і теплопровідності. Ефективність добавок збільшується із збільшенням відношення c_p/λ .

Початкова температура суміші.

Зі збільшенням початкової температури вихідної суміші область вибухонебезпечних концентрацій збільшується оскільки відбувається збільшення ентальпії вихідної системи, при цьому збільшується швидкість хімічної реакції:

$$\dot{\omega}_{xp}^t = \dot{\omega}_{xp}^0 a_t^{(t_0 - t_0)}$$

Якщо вихідна суміш буде мати підвищену температуру, то для підтримки реакції горіння необхідно витратити меншу кількість тепла. Така кількість тепла може виділитися при взаємодії знижених концентрацій окислювача і горючої речовини, незважаючи на те, що кількість ефективних зіткнень в такому випадку невелика.



Вплив температури на КМПП враховується рівнянням:

$$\Phi_{H(B)}^t = \Phi_{H(B)}^0 \left(1 - \frac{t - 25}{z} \right),$$

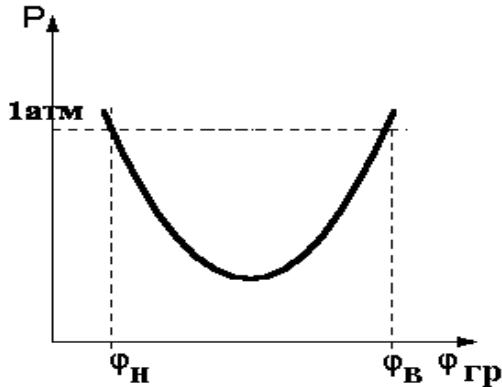
де z - температурний коефіцієнт, рівний для НКМПП - 1250,
для ВКМПП - 800.

Найбільший вплив температура здійснює на верхню концентраційну межу при зниженому тиску. При підвищенні температури на 100К НКМПП, як правило, знижується на 8-10%, а ВКМПП підвищується на 12-16%.

Тиск в системі.

Залежність КМПП від тиску для різних видів пального різна, однак для більшості вуглеводнів підвищення тиску приводить до розширення вибухонебезпечної області. Зі збільшенням тиску суміші відбувається зменшення міжмолекулярних відстаней, що приводить до збільшення швидкості хімічних реакцій.

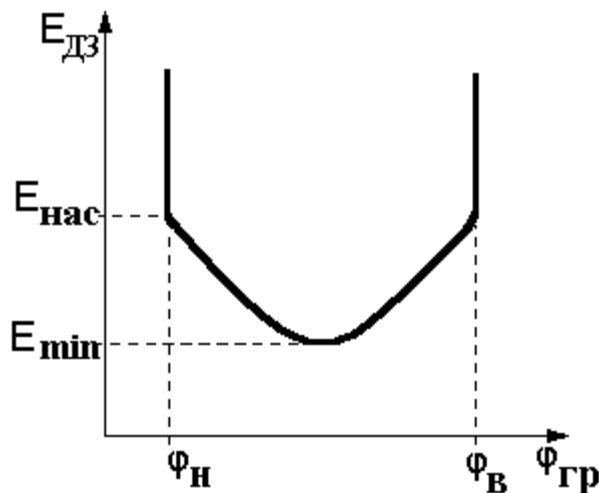
$$w_{xp} \sim [k\phi_{гр}]^n [k\phi_{ок}]^m, \quad \text{де } k=r_2/r_1$$



Зростання швидкості хімічних реакцій призводить до підвищення тепловиділення в горючій системі, а значить і до збільшення швидкості поширення горіння. Таким чином, НКМПП трохи меншає, а ВКМПП - збільшується. Так, для ацетилено-повітряної суміші, у якій КМПП від 2,5 до 81%, підвищення тиску на 1,5 атм приводить до зростання ВКМПП практично до 100%, а при тиску 2,7 атм. відбувається тепловий вибух суміші за нормальної температури. При збільшенні тиску найбільше змінюється верхня КМПП.

При зниженні тиску нижче атмосферного область запалення всіх сумішей вужчає. Пониження тиску рівнозначне зменшенню кількості молекул пального і окислювача в системі. При цьому імовірність зіткнення молекул знизиться, а швидкість хімічної реакції поменшає, швидкість тепловиділення досягне критичного значення, отже, поширення горіння не станеться. При деякому тиску, характерному для даного пального, нижня і верхня КМПП зникаються.

Потужність джерела запалювання



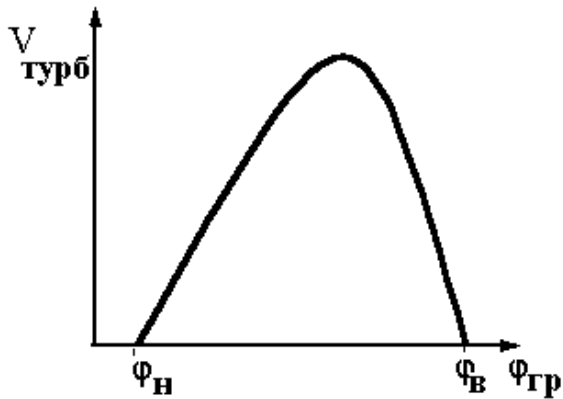
При збільшенні потужності ДЗ, наприклад електричної іскри, діапазон концентрацій горючої речовини, в якому можливо запалення, розширюється. Більш потужне джерело запалення може викликати запалення в більш бідній та більш багатій горючій суміші.

Однак розширення меж при збільшенні потужності ДЗ не безмежно. Існують деякі концентрації речовини, за яких неможливе запалення горючої системи іскрою будь якої великої

потужності. Вище за цю межу збільшення потужності іскор не приводить до збільшення діапазону вибухонебезпечних концентрацій. Таку потужність називають насиченою.

При зниженні потужності ДЗ відбувається звуження КМПП і при деякій мінімальній потужності ДЗ, що характерна для кожної горючої речовини, відбувається змикання нижньої і верхньої КМПП.

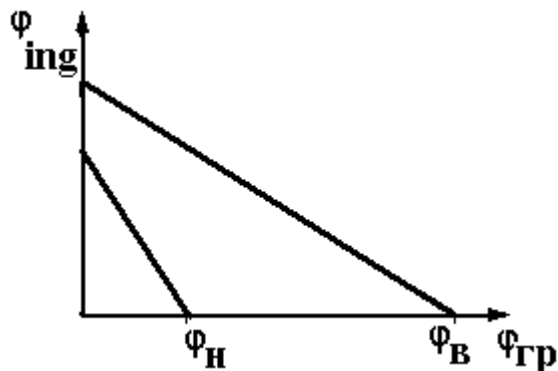
Наявність турбулентності, каталізаторів і інгібіторів.



Зі збільшенням швидкості руху газового потоку $V_{\text{турб}}$, КМПП вужчають. Це пояснюється тим, що перемішування збільшує тепловідведення і, тому ускладнює запалення. Існує критична швидкість витікання газового потоку, за якої відбувається зрив полум'я.

Практичного значення має наявність домішок до горючої системи хімічно активних речовин – каталізаторів і інгібіторів. Вплив цих речовин пов'язано з їх активною участю в ході хімічного перетворення, при цьому вони впливають на швидкість протікання хімічної реакції, на інтенсивність тепловиділення і швидкість поширення горіння.

Добавки до горючої суміші каталізаторів розширюють межі вибуху, а інгібіторів - звужують КМПП. Характер залежності КМПП від добавки інгібітору подібний до впливу інертних розріджувачів, проте кількісно ефект значно відрізняється. Як правило хімічно активні домішки можуть запобігти виникненню горіння при вмісті їх в суміші біля 1%. Деякі з подібних домішок самі можуть бути горючими, тоді криві, що характеризують зміну КМПП, при достатній величині домішки досягають вісь ординат в точках, які характеризують концентраційні межі самої активної домішки.



Враховуючи, що концентраційні межі поширення полум'я можуть змінюватися при зміні зовнішніх умов, для забезпечення пожежної безпеки при поводженні з горючими речовинами визначають не тільки самі концентраційні межі, але і безпечні концентрації, нижче або вище яких суміш гарантовано не буде запалюватися. Безпечні концентрації можна розрахувати по формулах:

$$\varphi_{\text{нб}}^{\circ} < 0,9(\varphi_{\text{н}}^{\circ} - 0,7R), \quad \%$$

$$\varphi_{\text{вб}}^{\circ} > 1,1(\varphi_{\text{в}}^{\circ} + 0,7R), \quad \%$$

де $\varphi_{\text{н}}^{\circ}$, $\varphi_{\text{в}}^{\circ}$ - НКМПП и ВКМПП, %;

R - відтворення методу визначення КМПП при довірчій імовірності 95%.

Для методики практичного визначення КМПП R рівна 0,3% для НКМПП і 0,6% для ВКМПП, тоді:

$$\varphi_{\text{нб}}^{\circ} < 0,9(\varphi_{\text{н}}^{\circ} - 0,21), \%$$

$$\varphi_{\text{вб}}^{\circ} > 1,1(\varphi_{\text{в}}^{\circ} + 0,42), \%$$

Тоді умовами запобігання горючій або вибухонебезпечній суміші при роботі з газовими і паровими сумішами буде:

$$\varphi_{\text{факт}}^{\circ} < \varphi_{\text{нб}}^{\circ}$$

$$\varphi_{\text{факт}}^{\circ} > \varphi_{\text{вб}}^{\circ}$$

Ступінь небезпеки паро газових сумішей можна визначити з наступної діаграми:



БК - область безпечних концентрацій

НК - область небезпечних концентрацій

ВНК - область вибухонебезпечних концентрацій

ПНК - область вибухонебезпечних пожежонебезпечних концентрацій

§ 3. Практичне значення КМПП.

Концентраційні межі є найважливішим показником пожежної небезпеки речовин в практичній діяльності Цей параметр. КМПП застосовуються у наступних випадках:

1 Для порівняльної оцінки пожежної небезпеки декількох речовин. Наприклад, концентраційні межі

бутану C_4H_{10} - 1,8 - 9%;

бутену C_4H_8 - 1,6 - 10%;

вінілацетилену C_4H_4 - 1,8 - 53,2%.

Найбільш пожежонебезпечним є вінілацетилен, оскільки він в більш широкому діапазоні утворює вибухонебезпечні концентрації.

2. Для оцінки пожежної небезпеки фактичної концентрації парогазових систем. Наприклад, для того щоб визначити міру пожежної небезпеки пароповітряної суміші бензолу з концентрацією 4%, необхідно порівняти дану фактичну концентрацію з КМПП. У бензолу КМПП становлять 1,4-7,1%, отже фактична концентрація пари є вибухонебезпечною.

3. Для визначення вибухонебезпечних концентрацій парів і газів всередині технологічного обладнання (нижче $\varphi_{\text{нб}}^{\circ}$ і вище $\varphi_{\text{вб}}^{\circ}$).

4. При розробці заходів щодо забезпечення пожежної небезпеки вентиляційних систем, для розрахунку гранично допустимих вибухонебезпечних концентрацій газів ($\varphi_{\text{без}}^{\circ} < \varphi_{\text{нб}}^{\circ}$).

Висновок: Питання виробничої безпеки можуть бути вирішені тільки на основі знань КМПП. Величини КМПП не є постійними для даної речовини і залежать від фізичних характеристик середовища, виду реагентів, концентрації інертних добавок і інших чинників. Для безпечної експлуатації технологічного обладнання, що містить парогазові системи, необхідно знати безпечні КМПП.

Концентраційні межі є найважливішим показником пожежної небезпеки речовин в практичній діяльності Цей параметр. КМПП застосовуються у наступних випадках:

1 Для порівняльної оцінки пожежної небезпеки декількох речовин. Наприклад, концентраційні межі

бутану C_4H_{10} - 1,8 - 9%; бутену C_4H_8 - 1,6 - 10%; вінілацетилену C_4H_4 - 1,8 - 53,2%.

Найбільш пожежонебезпечним є вінілацетилен, оскільки він в більш широкому діапазоні утворює вибухонебезпечні концентрації.

2. Для оцінки пожежної небезпеки фактичної концентрації парогазових систем. Наприклад, для того щоб визначити міру пожежної небезпеки пароповітряної суміші бензолу з концентрацією 4%, необхідно порівняти дану фактичну концентрацію з КМПП. У бензолу КМПП становлять 1,4-7,1%, отже фактична концентрація пари є вибухонебезпечною.

3. Для визначення вибухобезпечних концентрацій парів і газів всередині технологічного обладнання (нижче $\varphi_{\text{нб}}^0$ і вище $\varphi_{\text{вб}}^0$).

4. При розробці заходів щодо забезпечення пожежної небезпеки вентиляційних систем, для розрахунку гранично допустимих вибухобезпечних концентрацій газів ($\varphi_{\text{без}}^0 < \varphi_{\text{нб}}^0$).

Висновок: Питання виробничої безпеки можуть бути вирішені тільки на основі знань КМПП. Величини КМПП не є постійними для даної речовини і залежать від фізичних характеристик середовища, виду реагентів, концентрації інертних добавок і інших чинників. Для безпечної експлуатації технологічного обладнання, що містить парогазові системи, необхідно знати безпечні КМПП.

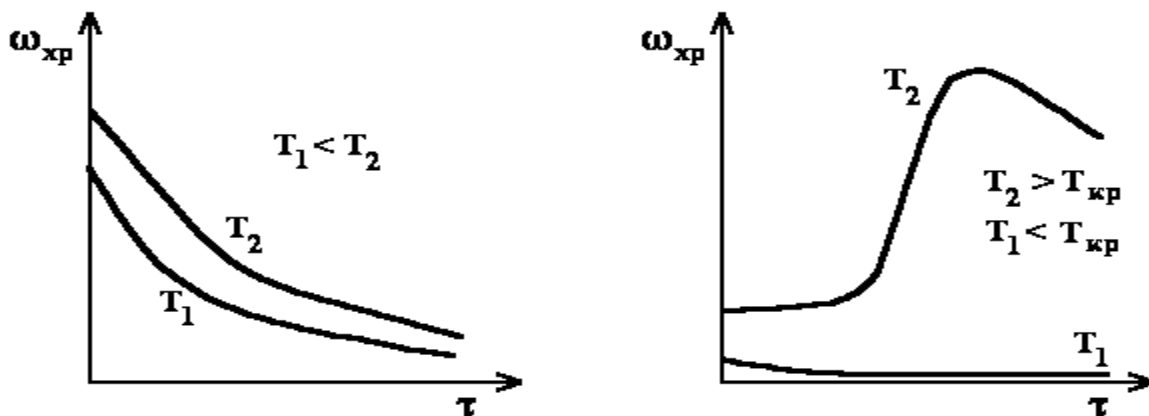
Глава 2. Виникнення горіння

Потужний розвиток промисловості призвів до значних антропогенних порушень і техногенної переважаності території України, і, як наслідок, до зростання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій різного характеру. Попередження НС природного та техногенного характеру є актуальною проблемою сучасності. На підставі ст.1 Закону України „Про правові засади цивільного захисту” питаннями забезпечення пожежної безпеки, запобігання і реагування на інші надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру займається державна служба - служба цивільного захисту. Згідно статті 5 цього закону одними із основних завдань цивільного захисту є прогнозування та оцінка наслідків надзвичайних ситуацій та розроблення і здійснення запобіжних заходів у сфері цивільного захисту.

§ 1. Види виникнення горіння.

Основою процесу горіння є хімічне перетворення речовин, яке відбувається з великою швидкістю і супроводжується швидким виділенням енергії і, отже, розігрівом системи, що реагує. Тому виникнення горіння - це швидкий перехід від повільної реакції до миттєвого перетворення, що завжди є підсумком самоприскорення реакції, що прогресує. Таке перетворення називають “вибухоподібним” і звичайно воно супроводжується яким-небудь несподіваним перетворенням в системі – спалахом, стрибкоподібним підвищенням тиску чи температури, звуковим ефектом.

В чому ж відмінність вибухової реакції від повільної, стаціонарної реакції? При стаціонарній реакції концентрація реагентів системи в ході реакції поступово зменшується, а, отже, зменшується і швидкість таких реакцій. При збільшенні температури швидкість реакції поступово підвищується, але загальна закономірність зберігається (рис. 1а).



Особливості вибухових реакцій були відзначені ще в середині минулого сторіччя Бунзенем і Вант-Гоффом.

Основна особливість явищ горіння полягає в тому, що умови, необхідні для швидкого протікання реакції, створені нею самою. Ці умови полягають або у високій температурі, або у високій концентрації активних продуктів, що прискорюють (каталізують) реакцію (носії реакційних ланцюгів: вільні атоми, радикали, органічні перекиси). Якщо сама реакція створює умови для свого власного швидкого протікання, то виникає, так званий, зворотний зв'язок. При малій зміні зовнішніх умов можливий перехід від стаціонарного режиму з малою швидкістю реакції до режиму, коли швидкість її зростає згодом згідно експонентному закону. Такий процес, що самостійно прискорюється, і називається горінням. Явища різкої зміни режиму протікання процесу при малій зміні зовнішніх умов називаються критичними, а умови, при яких відбувається цей перехід, носять назву критичних умов.

Таким чином, виникнення горіння пов'язане з накопиченням в системі тепла або каталізуючих активних продуктів реакції (активних центрів). У першому випадку кажуть про тепловий механізм виникнення горіння, а у другому – про ланцюговий.

Поширення горіння при тепловому механізмі відбувається за рахунок передачі тепла, при ланцюговому механізмі – за рахунок дифузії активних центрів.

В залежності від температури швидкість вибухових реакцій міняється дуже різко. Так при відносно низьких температурах швидкість реакції залишається невимірно малою аж до деякого критичного значення температури. Після перевищення температури над критичним значенням система реагує дуже швидко, швидкість реакції змінюється стрибкоподібно (рис. 1б). Наприклад, якщо реакція, яка має енергію активації близько 120 КДж/моль, протікає за мікросекунду при температурі горіння (2000К), то при температурі 300К ця реакція буде проходити протягом 100 000 років.

Вибухове протікання реакції стає можливим тільки за наявності певного теплового імпульсу (термічних умов), який створюється або зовнішніми джерелами (іскровим розрядом, гарячими стінками судини, адіабатичним стисненням та ін.), або за рахунок внутрішніх екзотермічних процесів.

В залежності від початкових умов, в яких знаходиться горюча система, та природи теплового імпульсу розрізняють три види виникнення горіння: самоспалахування, самозаймання, вимушене запалення джерелом запалювання.

Перший спосіб виникнення горіння, самоспалахування, полягає в тому, що горюча суміш вся цілком нагрівається до такої температури, вище за яку вона самостійно, без додаткового зовнішнього впливу, займається.

При другому способі, самозайманні, в системі відбувається накопичення тепла внаслідок протікання різноманітних внутрішніх екзотермічних фізико-хімічних або біологічних процесів, яке теж закінчується виникненням горіння.

Третій спосіб, вимушене запалення, полягає в тому, що холодна суміш запалюється тільки в одній будь-якій точці шляхом дії високотемпературного джерела (іскри, розжареного тіла, стороннього полум'я), а подальше запалення всієї системи відбувається з певною просторовою швидкістю поширення зони горіння.

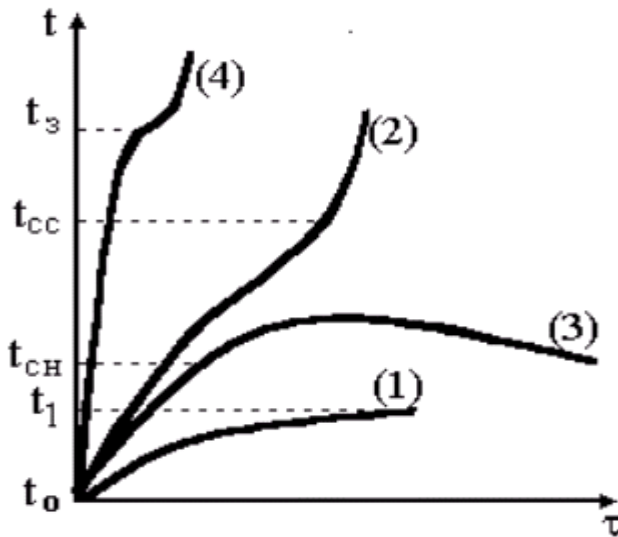
Розглянемо основні процеси які відбуваються в горючій системі при виникненні горіння. Візьмемо найпростіший випадок, коли горюча речовина знаходиться в газоподібному стані, а суміш з окислювачем вже утворена. Така система є гомогенною.

Якщо в результаті будь-яких процесів в системі дещо підвищується температура, то відбувається збільшення швидкості руху молекул, збільшується кількість співударів, що веде до активізації компонентів горючої суміші. Молекули починають реагувати між собою з утворенням кінцевих і проміжних продуктів реакції, однак кількість активних молекул незначна, а швидкість реакції окислення невелика, тому горіння ще не виникає.

При більш високих температурах швидкість реакції збільшується (закон Арреніуса $w_{\text{хім.р.}} = k_0 \times \exp(-E_{\text{акт}}/RT)$). Реакції окислення є екзотермічними, тобто ідуть з виділенням тепла, отже, в системі відбудеться додатковий розігрів і зростання температури. При наявності різниці температур виникає процес віддачі тепла від системи в навколишнє середовище за рахунок конвекційної теплопередачі.

Існує таке значення температури, при якій кількість тепла, що виділяється в процесі окислення, стає більшою ніж кількість тепла, що віддається від системи. При цьому виникає саморозігрів системи. Самонагрівання або саморозігрів - це явище підвищення температури за рахунок протікання внутрішніх екзотермічних реакцій за наявності сприятливих умов для накопичення тепла, а температура самонагрівання - це найменша температура горючої системи, при якій виникає саморозігрів.

Графічно зміну температури в часі зображаються кривими, наведеними на малюнку.



Якщо негорючий матеріал нагрівати до постійної температури t_1 , то температура матеріалу після деякого проміжку часу стане рівною t_1 . Період запізнення залежить від маси, теплоємності, теплопровідності та початкової температури матеріалу t_0 . При відносно низькій температурі подібна поведінка характерна і для горючих систем (крива 1).

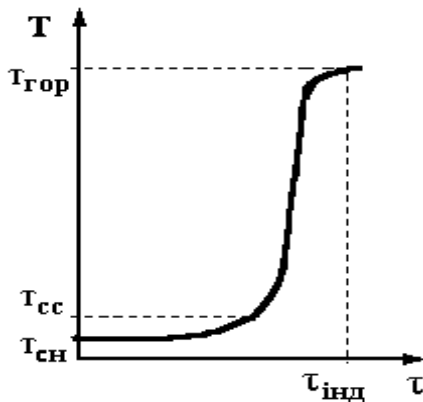
При більш високій температурі t_2 в системі можуть виникнути процеси розкладу горючої речовини і окислення з виділенням тепла. Цю температуру приймають за температуру самонагрівання. Якщо в системі існують сприятливі умови, то процес самонагрівання може призвести спочатку до досягнення критичної температури t_{cc} і в подальшому до появи горіння при t_r (крива 2).

Однак підвищення температури системи може припинитися і навіть температура може почати зменшуватися, якщо тепловиділення недостатньо і швидкість розсіювання тепла почне

перевищувати швидкість його виділення. В таких умовах реакції окислення, що почалися в системі, можуть завершитися лише процесом самонагрівання (крива 3) без переходу до процесу горіння (самоспалахування або самозаймання).

Різде збільшення температури навколишнього середовища у порівнянні з температурою початку самонагрівання сприяє більш інтенсивному зростанню температури горючої системи (крива 4). При збільшенні різниці температур системи і навколишнього середовища зростають втрати тепла, яке виділяється при реакції. Температура системи може підвищуватися доки швидкість тепловиділення превалює над швидкістю тепловіддачі. Коли температура системи досягне t_3 відбудеться її запалення. Для цього необхідний вплив джерела запалювання, яке має достатню потужність (наприклад високу температуру).

Період часу з початку перевищення температури горючої системи над температурою навколишнього середовища і до моменту досягнення точки виникнення горіння називається періодом індукції або часом індукції.



За період індукції в горючій системі протікають підготовчі процеси за рахунок тепла, що підводиться та виділяється в системі. Якщо горюча речовина знаходиться в конденсованому стані (тверде або рідке), то за цей період часу відбуваються:

- нагрів горючої системи;
- окислення газоподібних продуктів з виділенням тепла;
- самонагрівання горючої системи;
- виникнення горіння.

Характеристики різних видів виникнення горіння в значному ступені різноманітні, але загальним для всіх цих процесів є:

- температура системи перевищує критичне значення;
- тепловиділення в горючій системі за рахунок хімічної реакції окислення перевищує тепловіддачу від системи в навколишній простір;
- перехід від повільної реакції окислення до миттєвого перетворення (горіння) відбувається за період індукції.

Це загальні принципи виникнення горіння.

§ 2. Процес самоспалахування.

Якщо горючу суміш всю цілком нагрівати, то в певний момент часу відбувається різке стрибкоподібне зростання температури за рахунок саморозігрівання, при цьому система самостійно, без додаткового зовнішнього втручання, займається. Поява полум'я за рахунок різкого збільшення швидкості екзотермічних реакцій в відсутності джерела запалювання називається самоспалахуванням.

Процес самоспалахування є найбільш науково розробленим і легко описується математично. В основі процесу самоспалахування лежить особливість кінетики хімічних реакцій окислення - нерівномірність зміни швидкості протікання реакцій в залежності від зміни параметрів горючої

системи (температури та концентрації компонентів). Реакції горіння “вибухоподібно” змінюють швидкість протікання при самій незначній зміні будь-якого з цих параметрів.

Існує дві теорії самоспалахування - теплова та ланцюгова.

2.1. Теплова теорія самоспалахування горючих систем.

Якісні уяви Вант-Гоффа про запалення, як термічний саморозгін реакції, отримали кількісне тлумачення в теорії Семенова теплового вибуху. Ця теорія стала основою для подальшого розвитку фізико-хімічної теорії самоспалахування. Як вже було сказано, горіння виникне в тому випадку, коли кількість тепла, що виділяється в системі, перевищить кількість тепла, що відводиться з системи.

Теорія виходить з визначення критичних умов виникнення горіння, як рівності швидкості тепловиділення від хімічної реакції та швидкості тепловіддачі від газу, що реагує в середині судини, до стінок, які нагріті до температури запалення.

Аналітично інтенсивність процесу тепловиділення в фронті полум'я в залежності від виду пального, його концентрації та температури виражається рівнянням:

$$q(+) = Q_n V_{гс} \varphi_{гв} \varphi_{ок} \exp(-E_{акт}/(RT)),$$

де $E_{акт}$ - енергія активації системи, кДж/моль;

R - універсальна газова стала, кДж/(моль К);

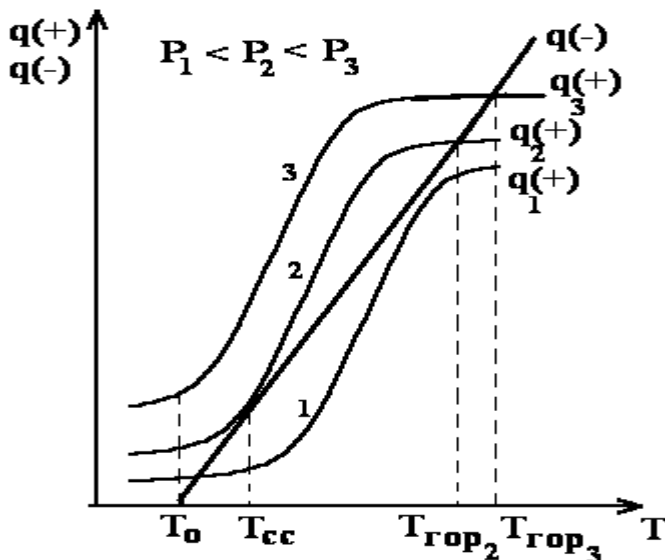
T - температура суміші, що реагує, К.

Q_n - теплота згоряння речовини, кДж/моль;

$V_{гс}$ - об'єм горючої суміші (посудини).

При відносно високих температурах відбувається поступове зниження концентрації реагентів внаслідок їхнього швидкого окислення. За рахунок цього швидкість хімічної реакції, а, отже, і інтенсивність тепловиділення при цих температурах прямує не до нескінченності, як витікає з рівняння, а асимптотично наближається до деякого максимального значення. Тому функція $q(+) = f(T)$ має точку перегину.

Зміна $q(+)$ з температурою при різноманітних початкових значеннях тиску показана на рисунку серією кривих 1, 2, 3.



Тепло, що виділяється в ході реакції окислення, буде витрачатися на нагрів суміші і відповідно на підвищення швидкості реакції. Як тільки температура пальної газової суміші всередині судини підвищиться за рахунок накопичення в ній тепла і стане вище температури стінок судини, виникає тепловий потік в довкілля. Якщо теплопередача від газу з температурою T здійснюється до стінок судини з поверхнею S і температурою T_0 тільки за рахунок теплопровідності (тобто при відсутності конвекційних потоків і турбулентного переносу тепла), то

швидкість віддання тепла не залежить від тиску, і її зміни з температурою визначається із рівняння Ньютона:

$$q(-) = \alpha S (T - T_0),$$

де T - температура газової суміші;

T_0 - температура стінок судини;

S - площа поверхні стінок реакційної посудини.

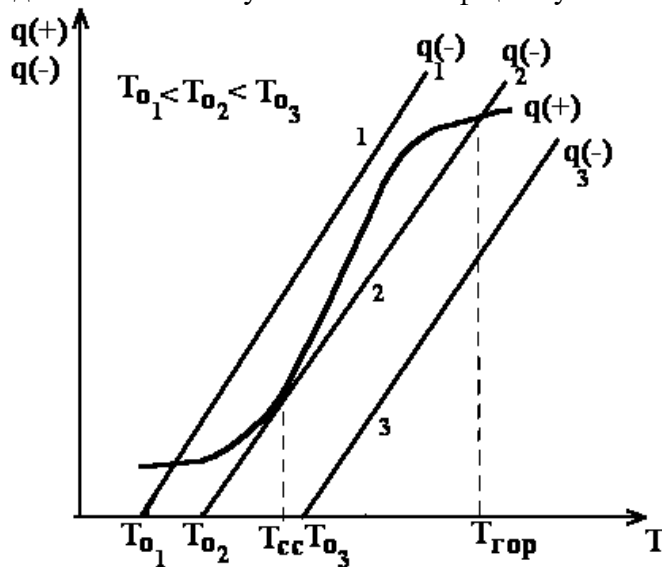
α - коефіцієнт тепловіддачі.

Графічно інтенсивність тепловіддачі можна представити прямою, що проходить через точку $(T_0, 0)$. При P_1 (крива 1) швидкість тепловиділення спочатку перевищує швидкість тепловідведення, що наводить до деякого розігріву газу від T_0 до T_1 . Але при більш високих температурах швидкість тепловідведення перевищує швидкість тепловиділення від реакції, тому подальше підвищення температури газу припиниться. Збільшення швидкості реакції в цих умовах виявляється неможливим.

Навпаки, при значно більш високому початковому тиску P_3 (крива 3) швидкість тепловиділення завжди буде перевищувати швидкість тепловіддачі, що призведе до прогресивного розігріву газу і збільшенню швидкості тепловиділення аж до запалення.

Між P_1 і P_3 є такий тиск, при якому пряма тепловіддачі дотикається кривій тепловиділення (крива 2). Це мінімальний тиск при даній початковій температурі газу, при якому швидкість тепловиділення дорівнює швидкості тепловідведення, і реакція обов'язково переходить в вибух.

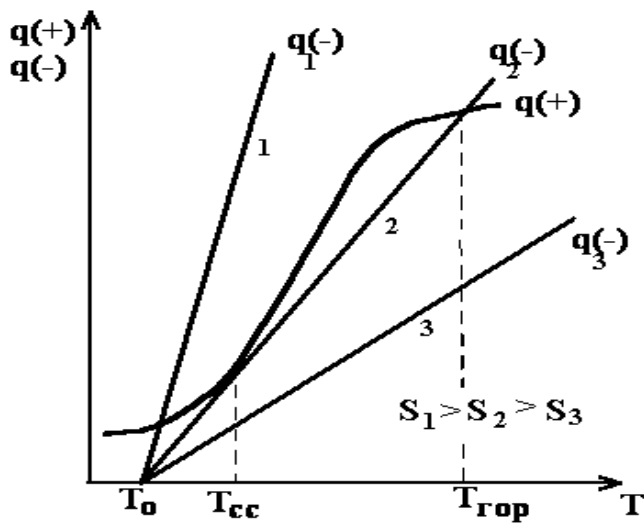
Можна, навпаки, поступово підвищувати початкову температуру газу (тобто температуру стінок судини T_0), при незмінному тиску P (мал.4). Тоді зміни швидкості тепловідведення при різних початкових температурах буде представлено серією прямих (1, 2, 3) однакового нахилу, відповідного незмінному значенню коефіцієнту тепловіддачі α .



При відносно низькій температурі стінок T_0 швидкість тепловідведення після нагріву газу до температури стінок перевищує швидкість тепловиділення від реакції, і подальший розігрів газу і запалення неможливі.

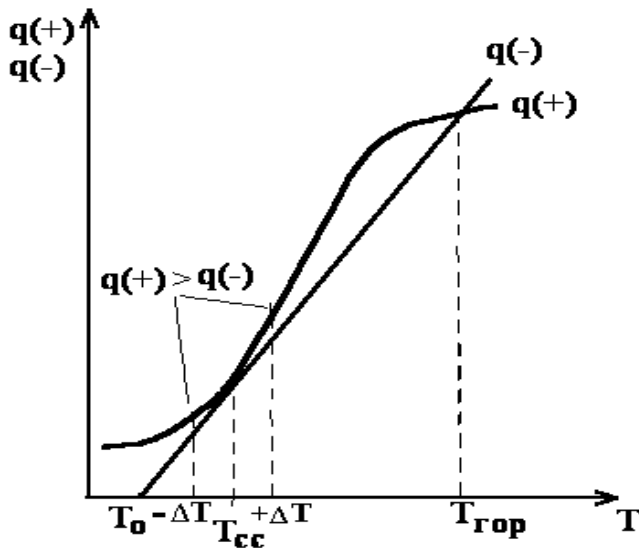
При значно більш високій температурі стінок швидкість тепловідведення різко знижена так, що швидкість тепловиділення перевищує швидкість тепловідведення, це призводить до прогресивного розігріву газу і займання. Деяке проміжне значення температури стінок відповідає такій швидкості тепловіддачі, коли пряма тепловідведення торкається кривої тепловиділення. Це значення температури відповідає мінімальній температурі виникнення горіння при даному тиску P_0 .

Змінити співвідношення між тепловиділенням при заданому тиску в системі і тепловіддачею можна змінюючи не тільки початкову температуру стінок судини, але й при зміні коефіцієнту тепловіддачі α .



Якщо систему довести до температури T_0 , то в ній почне виділятися і акумулюватися тепло за умови, що $\alpha \leq \alpha_2$. Тоді, як тільки система розігріється до температури T_{cc} (при $\alpha = \alpha_2$), інтенсивність тепловиділення стає рівною інтенсивності тепловіддачі. Якщо температуру в системі декілька підвищити, система різко самовільно перейде до самонагрівання і займання.

Таким чином, якщо окислювальний процес починається при відносно низьких температурах, швидкість тепловиділення може бути нижче або рівною швидкості тепловіддачі. В цьому випадку все тепло, що виділилося в системі в ході хімічної реакції, віддається в навколишнє середовище за рахунок тепловіддачі. Встановлюється стійка рівновага, тому що при відхиленні від рівноважного стану (при збільшенні або зменшенні температури на деяку величину ΔT) система самовільно вертається в точку рівноваги за рахунок перевищення інтенсивності тепловіддачі ($+\Delta T$) або тепловиділення ($-\Delta T$).



Точці дотику відповідають критичні умови займання системи при температурі T_{cc} . Аналізуючи стан системи в точці дотику методом малих змін, переконуємось, що система знаходиться в нестійкій рівновазі, і незначне підвищення температури на величину ΔT призводить до порушення теплового балансу (перевищення інтенсивності тепловиділення над інтенсивністю

тепловіддачі) і переходу системи в точку стійкої рівноваги в області високих температур, тобто при температурі горіння.

Співвідношення між граничними мінімальними значеннями тиску та температури, при яких можливо займання горючої системи, визначається умовою дотику кривої швидкості тепловиділення від реакції з прямою швидкості тепловідведення від горючої системи, що реагує, в стінки судини.

В точці дотику (при $T = T_{cc}$) виконуються умови:

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

$$\left. \frac{dq(+)}{dT} \right|_{T_{cc}} = \left. \frac{dq(-)}{dT} \right|_{T_{cc}} \quad \left. \frac{d^2 q(+)}{dT^2} \right|_{T_{cc}} > 0$$

Фактична поява полум'я в горючій системі відбувається не в момент розігріву її до температури самоспалахування, а згодом ще деякий проміжок часу. Проміжок часу, протягом якого горюча суміш саморозігрівається від температури стінок судини T_0 до появи полум'яного горіння, називається періодом індукції теплового вибуху.

Величина індукційного періоду теплового вибуху залежить від виду горючої речовини; складу суміші (концентрації пального, окислювача і нейтральних газів), температури стінок судини; тиску в системі. Чим нижче температура початкового розігріву системи, тим більший період індукції. Тому за температуру самоспалахування приймають ту температуру стінок судини, при якій період індукції є максимальним.

Отже, індукційний період не є фізичною константою горючої речовини або системи, але може бути використаний як показник ступеню пожежної небезпеки горючих речовин та матеріалів.

2.2. Ланцюгова теорія самоспалахування горючих систем.

В теорії теплового вибуху нагрів є єдиною причиною прогресивного збільшення швидкості хімічної реакції і внаслідок цього швидкості тепловиділення. Хімічне перетворення саме по собі, з точки зору цієї теорії, є тільки гальмуючим фактором, оскільки по мірі витрачання вихідної речовини зменшується швидкість хімічних реакцій. Між тим великий клас хімічних реакцій, до якого відносяться і всі реакції окислення вуглеводів повітрям і киснем, відносяться до хімічного перетворення, швидкість якого зростає по мірі накопичення продуктів реакції.

Для ініціювання таких реакцій необхідно стороннім джерелом забезпечити утворення деякої початкової концентрації каталізуючого продукту - активних центрів. Ці центри викликають хімічні перетворення, при яких знов утворюються активні центри, виникає розгалужена ланцюгова реакція. Швидкість ланцюгової реакції відображається рівнянням:

$$W_{\text{ланц.реакц.}} = W_o + W_f - W_g$$

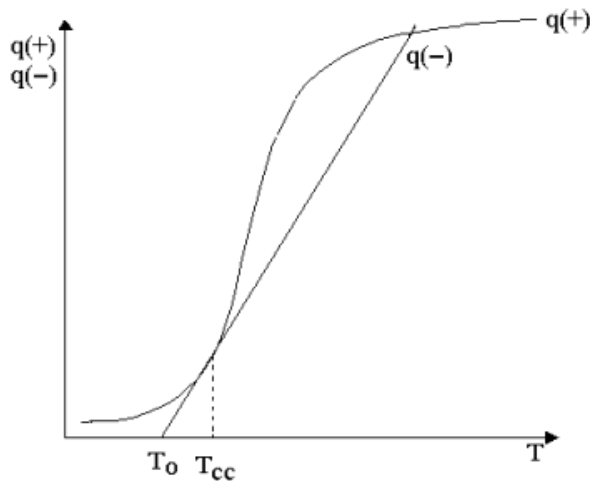
За умови перевищення швидкості ініціації W_o і розгалуження W_f над швидкістю обриву ланцюгів W_g в системі загальна швидкість хімічної реакції окислення збільшується, і при певному її значенні виникає займання.

ВИСНОВОК: у випадку екзотермічних реакцій окислення горючих речовин завжди існують такі умови, за яких швидкість виділення тепла від реакції перевищує швидкість тепловіддачі від газу, що реагує, через стінки судини. Так створюється безперервне, зростаюче в часу збільшення швидкості реакції і підвищення температури системи, доки не буде досягнута дуже велика та неконтрольована швидкість тепловиділення, що характеризує запалення.

§ 3. Температура самоспалахування речовин.

Температурою самоспалахування називається найменша температура системи, при якій відбувається різке збільшення швидкості екзотермічної реакції, що призводить до появи полум'яного горіння.

Згідно теорії, температура самоспалахування відповідає таким граничним умовам в горючій системі, за яких можливе запалення газу внаслідок порушення теплової рівноваги між швидкістю тепловиділення від реакції та швидкістю тепловідведення від газу в через стінки посудини в навколишнє середовище. Графічно це визначається умовою дотику кривої тепловиділення з прямою тепловідведення.



У точці дотику (при $T = T_{cc}$) виконуються умови:

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

$$\left. \frac{dq(+)}{dT} \right|_{T_{cc}} = \left. \frac{dq(-)}{dT} \right|_{T_{cc}} \quad \left. \frac{d^2q(+)}{dT^2} \right|_{T_{cc}} > 0$$

Підставляючи вирази для швидкості тепловиділення і тепловіддачі отримуємо в точці дотику (при $T = T_{cc}$):

$$Q_n V_{гс} \Phi_{гв} \Phi_{ок} \exp(-E_{акт}/RT_{cc}) = \alpha(T_{cc} - T_0) S \quad (1)$$

Диференціюємо це рівняння по температурі і отримаємо:

$$Q_n V_{гс} \Phi_{гв} \Phi_{ок} \frac{E_{акт}}{RT_{cc}^2} \exp(-E_{акт}/RT_{cc}) = \alpha S \quad (2)$$

Поділивши рівняння (1) на (2) одержимо:

$$RT_{cc}^2/E_{акт} = T_{cc} - T_0 \quad \text{або} \quad T_{cc}^2 - E_{акт}/(RT_{cc}) + E_{акт}/(RT_0) = 0$$

Вирішуючи дане рівняння відносно температури та використовуючи розкладання квадратного кореню в степеневий ряд, одержимо:

$$T_{cc} = E_{акт}/2R \pm E_{акт}/2R (1 - 2RT_0/E_{акт} - 2R^2T_0^2/E_{акт}^2)$$

Оскільки визначається мінімальна температура виникнення горіння, то з двох можливих розв'язань даного рівняння вибираємо менше, а одержане значення відповідає точці дотику при температурі самоспалахування.

$$T_{cc} = T_0 + RT_0^2/E_{акт} \quad \text{або} \quad \Delta T = T_{cc} - T_0 = RT_0^2/E_{акт}$$

Величина $RT_0^2/E_{акт}$ визначає початковий розігрів суміші, що реагує, від початкової температури T_0 до температури T_{cc} . Якщо температура стінок посудини T_0 нижче температури самоспалахування на величину більш ніж $RT_0^2/E_{акт}$, теплового самоспалахування не відбудеться.

По експериментальним даним для більшості вуглеводів температура самоспалахування в повітрі рідко буває нижче 500К. Прийнемо температуру стінок посудини $T_0 \approx 500$ К, тоді початковий розігрів становить 25-40°C. Тому на практиці температурою самоспалахування вважається температура стінок посудини, при якій відбувається самоспалахування горючої суміші.

При температурі самоспалахування горіння речовини ще не виникає, воно виникне лише при температурі горіння, яка значно перевищує температуру самоспалахування. Але при цій температурі складаються умови, що призводять до стрибкоподібного підйому температури за рахунок самонагрівання горючої суміші.

Оскільки виникнення горіння можливе внаслідок різної зміни тепловиділення і тепловіддачі (збільшення тепловиділення, зменшення тепловіддачі або одночасна зміна $q(+)$ і $q(-)$), то температура самоспалахування не є постійною величиною, а залежить від законів зміни інтенсивності тепловиділення і тепловіддачі. Для забезпечення пожежної безпеки технологічних процесів необхідно враховувати чинники, що впливають на температуру самоспалахування.

§ 4. Фактори, що впливають на температуру самоспалахування.

Існують такі умови, при яких самоспалахування горючої суміші неможливо. При збільшенні інтенсивності тепловиділення система раніше може досягнути критичного значення температури, при якому реакція окислення переходить до процесу горіння, тобто температура самоспалахування зменшується. Навпаки, збільшення інтенсивності тепловіддачі від горючої системи, знизить ймовірність виникнення горіння, тобто температура самоспалахування зростає. З математичного вираження критичних умов самоспалахування

$$Q_n V_{гс} j_{гв}^n j_{ок}^m \exp(-E_{акт}/RT) = \alpha(T - T_0) s$$

можна побачити параметри, зміна яких буде впливати на температуру самоспалахування.

На температуру самоспалахування речовин, а отже і на пожежну небезпеку того процесу, в якому обертається горюча речовина, будуть впливати три групи факторів, які характеризують

- 1) вид горючої речовини,
- 2) склад горючої суміші,
- 3) умови, в яких знаходиться горюча суміш.

До першої групи чинників відносяться:

теплотворна здатність горючої речовини Q_n (залежить від складу горючої речовини); середня довжина вуглецевого ланцюга (залежить від будови і просторової структури горючої речовини);

До другої групи відносяться:

концентрація горючої речовини в суміші $j_{гв}$; концентрація кисню в окислювальному середовищі $j_{ок}$; наявність негорючих газів в суміші $j_{нг}$; присутність каталізаторів або інгібіторів горіння.

До третьої групи можна віднести:

тиск в системі P ; об'єм $V_{гс}$ і діаметр посудини; площа тепловідводу s ; коефіцієнт тепловіддачі α ; початкова температура суміші T_0 .

Розглянемо докладніше деякі з перерахованих чинників, вважаючи, що досліджується зміна температури самоспалахування від одного параметра, зберігаючи всі інші параметри постійними для даної горючої суміші.

2.1. Хімічна будова горючої речовини.

Різні сполуки відрізняються чисельним значенням температури самоспалахування, оскільки схильність різних горючих речовин до реакцій окислення неоднакова. Температура самоспалахування у різних класів сполук залежить від схильності цих сполук до реакцій окислення. Окислювально-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 окислення, а отже, самонагрівання буде протікати повільно, температура самоспалахування при цьому підвищується.

Найбільшою температурою самоспалахування володіють ароматичні вуглеводні. Наприклад, бензол має температуру самоспалахування 864 К, а циклогексан – 543 К, ще менша температура самоспалахування у гексану – 534 К.

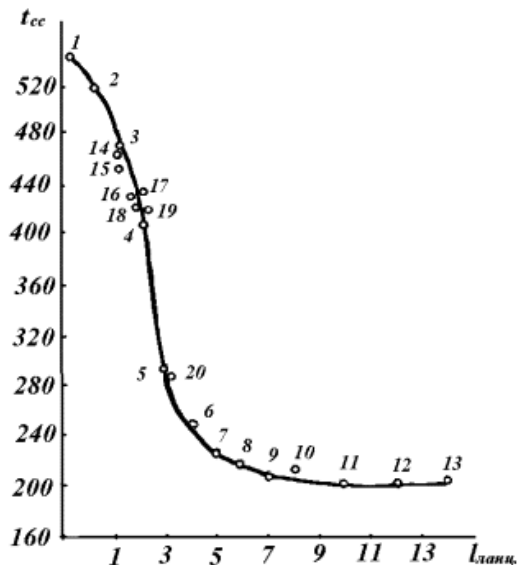
Сполуки з ненасиченими зв'язками окислюються легше, ніж насичені вуглеводні з тією ж кількістю атомів вуглецю, отже і температура їх самоспалахування в основному нижче.

Насичені вуглеводні	Формула	Фо	Температура самоспалахування, К	Ненасичені вуглеводні	Формула	Фо	Температура самоспалахування, К
етан	C_2H_6	C_2	788	етилен	C_2H_4	C_2	813
пропан	C_3H_8	C_3	777	пропілен	C_3H_6	C_3	683
бутан	C_4H_{10}	C_4	704	бутилен	C_4H_8	C_4	657
пентан	C_5H_{12}	C_5	557	амилен	C_5H_{10}	C_5	571
гексан	C_6H_{14}	C_6	534	гексилен	C_6H_{12}	C_6	545
гептан	C_7H_{16}	C_7	520	гептилен	C_7H_{14}	C_7	536

Для вуглеводнів ізомерної будови із збільшенням розгалужень в молекулі температура самоспалахування підвищується. Так, н-бутан має температуру самоспалахування 704 К, а ізобутан – 749 К.

Розглянемо як змінюється температура самоспалахування речовин в одному гомологічному ряду. В кожному гомологічному ряду найбільшу температуру самоспалахування має перший член, так як його молекула найбільш стійка до приєднання кисню. По мірі збільшення довжини вуглецевого ланцюга і молекулярної маси гомологів енергія зв'язку С-Н слабшає, тому що значна кількість її витрачається на внутрішні ступіні свободи: обертання і коливання. Відбувається зміна геометричної конфігурації молекули і полегшується можливість реагування горючої речовини з окислювачем, T_{cc} знижується. Наприклад, енергія розриву зв'язку С-Н в молекулі метану дорівнює 425,0 кДж/моль, а у етану – 410,1 кДж/моль. Температури самоспалахування для цих речовин відповідно рівні 810 і 788 К.

У кожному гомологічному ряду із збільшенням молекулярної маси відбувається зміна агрегатного стану сполук: від газів до рідин і твердих речовин. Тому з переходом до вищих гомологів ряду залежність T_{cc} від хімічної будови вже не виявляється так наочно: позначаються фізичні ефекти взаємодії в конденсованій фазі. При збільшенні довжини нерозгалуженого ланцюга в молекулах одного гомологічного ряду починаючи з C_9 - C_{10} енергія зв'язків відрізняється не на багато, а отже T_{cc} міняється мало. На малюнку показана залежність температури самоспалахування насичених вуглеводнів від їх будови і середньої довжини вуглецевого ланцюга.



Залежність температури самоспалахування парафінових вуглеводнів від середньої довжини вуглецевого ланцюжка:

1 - метан; 2 - етан; 3 - пропан, 4 - бутан; 5 - пентан; 6 - гексан; 7 - гептан, 8 - октан; 9 - нонан; 10 - декан; 11 - додекан; 12 - тетрадекан; 13 - гексадекан. 14 – 2-метилпропан; 15 - 2,2-диметилпропан; 16 - 2,2-диметилбутан; 17 - 2,2,3,3-тетраметилпентан; 18 – 2-метилбутан; 19 - 2,2-диметил, 4-метилпентан; 20 - 2,2-диетилпентан

Крім того, по мірі збільшення кількості атомів вуглецю в молекулі горючої речовини збільшується молекулярна маса, а отже збільшується теплота згоряння речовини, тому при протіканні реакцій окислення більше тепла піде на саморозігрів системи. Це приведе до того, що рівність між тепловиділенням і тепловіддачею наступить при більш низькій температурі. Отже, при збільшенні теплотворної здатності горючої речовини температура самоспалахування зменшується.

2.2. Склад горючої суміші

Як відомо, швидкість хімічних реакцій залежить від концентрації реагуючих компонентів, а у разі реакції горіння - від вмісту горючої речовини і окислювача. Оскільки інтенсивність тепловиділення є функцією швидкості хімічної реакції, то існують такі концентрації горючої речовини або окислювача, при яких тепловиділення буде недостатнім для самонагрівання системи і подальшого самоспалахування. Такі концентрації компонентів горючої суміші називаються критичними і відповідають концентраційним межам поширення полум'я. Зупинимося на якісній залежності температури самоспалахування речовин від складу горючої суміші.

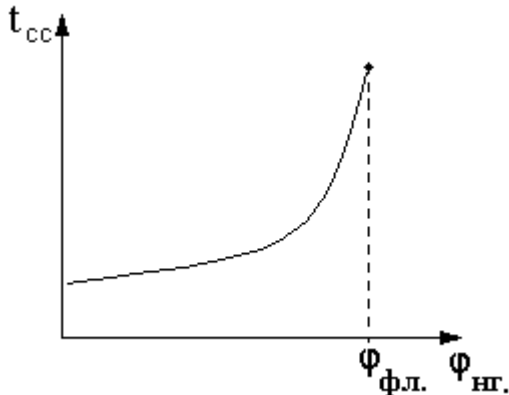
Концентрація горючої речовини

Оскільки швидкість хімічної реакції максимальна при стехіометричному співвідношенні горючої речовини і окислювача, то при цій концентрації горючої речовини спостерігається і мінімальне значення температури самоспалахування. При зміні концентрації пального від стехіометричної концентрації як у бік бідних сумішей (нестача горючої речовини і надлишок окислювача), так і у бік багатих сумішей (надлишок горючої речовини і нестача окислювача) температура самоспалахування підвищується. Це можна пояснити тим, що при зменшенні концентрації горючої речовини чи окислювача (відносно стехіометричного співвідношення) зменшується швидкість хімічної реакції, а, отже, і інтенсивність тепловиділення. При цьому рівновага між тепловиділенням та тепловіддачею

$$Q_n V_{гц} j_{гв}^n j_{ок}^m \exp(-E_{акт}/RT_{cc}) = a(T_{cc} - T_0) s$$
 буде виконуватися лише при більшій T_{cc} .

Починаючи з деякого граничного значення, суміші як бідні, так і багаті не здатні самоспалахувати. Таким чином, найбільш пожежонебезпечною концентрацією горючої речовини є

Таким чином, для запобігання самоспалахування горючих систем в умовах технологічного процесу можна використати введення в повітряну зону закритого технологічного обладнання інертних газів - розріджувачів. Запобігання виникненню горіння за допомогою розбавлення інертними газами називається флегматизацією, а гази-розріджувачі – флегматизаторами.



Наявність каталізаторів або інгібіторів

Певний вплив на температуру самоспалахування речовин надає присутність в суміші каталізатора або інгібітору.

Для підвищення температури самоспалахування в систему вводять інгібіруючі добавки, наприклад для зниження детонації палива в двигунах внутрішнього згоряння (так звані антидетонатори). Інгібітори, які в горючій суміші розкладаються з виділенням металу в дисперсному стані, гальмують процеси низькотемпературного окислення вуглеводнів, швидкість хімічної реакції зменшується, а температура самоспалахування збільшується.

При наявності в системі каталізатора швидкість хімічної реакції зростає, при цьому збільшується інтенсивність тепловиділення, а температура самоспалахування дещо падає. Каталітичними властивостями можуть володіти стінки посудини, в якій знаходиться горюча суміш. Так, в посудині із кварцу температура самоспалахування бензолу дорівнює 571°C, а в посудині із цинку – 721°C.

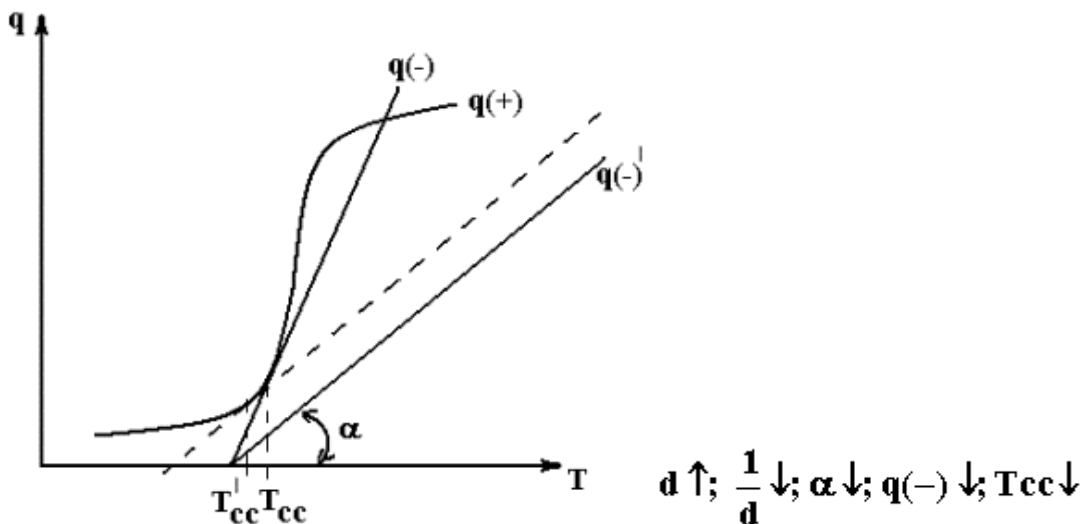
2.3. Умови, в яких знаходиться горюча суміш

Об'єм і діаметр посудини.

На температуру самоспалахування впливають не тільки чинники, що відносяться до швидкості протікання реакції окислення, але і зовнішні умови, такі як форма і об'єм посудини, в якому знаходиться горюча суміш.

Збільшення об'єму реакційної посудини приводить до збільшення тепловиділення і, отже, до зниження температури самоспалахування. При зміні об'єму від декількох десятків мл до 3-4 л температура самоспалахування знижується на десятки градусів. При подальшому збільшенні об'єму (більше за 5 л) зміна температури самоспалахування незначна.

Зміна розмірів або форми посудини, в якій протікає процес самоспалахування, приводить до зміни умов теплообміну і швидкості тепловіддачі в довкілля. Швидкість тепловіддачі визначається відношенням поверхні посудини до її об'єму при різних розмірах посудини: $S/V \sim d^2/d^3 \sim 1/d$. Відношення S/V називають визначальним розміром. Від цього відношення буде залежати кут нахилу прямої залежності швидкості тепловіддачі від температури.



Зміна співвідношення S/V з трьох прямих показує, що менший кут нахилу має пряма, яка відноситься до посудини більшого діаметра, при цьому швидкість тепловіддачі найменша і температура самоспалахування також знижується. В умовах, коли об'єм посудини зменшується, а кут нахилу прямих збільшується, досягнення температури самоспалахування при протіканні окислювальних процесів можливо якщо ці процеси почнуться при новому, більш високому значенні температури.

Таким чином, при заданих значеннях концентрації горючої речовини, тиску в системі, початкової температури (визначають однозначно інтенсивність тепловиділення) може бути знайдений критичний діаметр, при підвищенні якого відбувається тепловий вибух, а при його зменшенні - немає. Цей принцип лежить в основі використання в технологічних апаратах вогнеперешкоджувачів. Вогнеперешкоджувачами можуть служити щілині, сітки, касети, гравійні засипки, принцип дії яких полягає в розбиванні горючої системи на маленькі об'єми і різкому збільшенні площі тепловіддачі. При цьому температура самоспалахування горючої системи різко збільшується і запалити таку суміш вже практично неможливо. Вогнеперешкоджувачі використовуються для запобігання поширенню полум'я по горючих системах, що знаходяться в технологічному обладнанні.

Початкова температура і тиск в системі

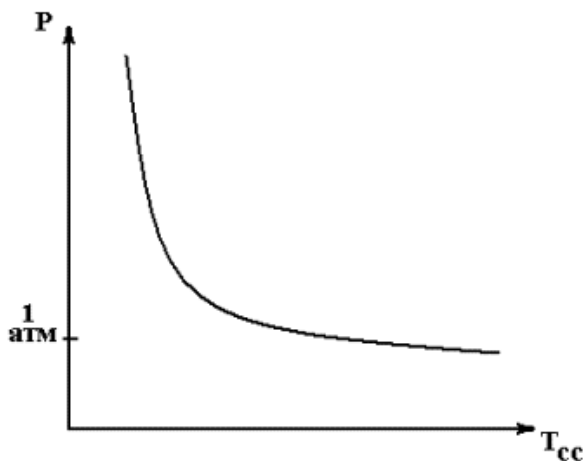
Підвищення початкової температури системи приводить до збільшення швидкості реакції окислення, а, отже, і підвищенню інтенсивності тепловиділення. Крім того, при більш високій початковій температурі суміші знижується інтенсивність тепловідвода. Все це приводить до зниження температури самоспалахування.

Підвищення тиску в системі також спричиняє збільшення швидкості реакції окислення, а, отже, зниження температури самоспалахування. Теорія встановлює наступне співвідношення між температурою самоспалахування і тиском суміші в реакційній посудині:

$$\lg(p/T_{cc}^2) = A/T_{cc} + B$$

де A і B - величини, що залежать від об'єму реакційної посудини, стану його стінок і інших чинників

Однак потрібно враховувати також ланцюгову природу процесу самоспалахування. Експерименти показують, що залежність температури самоспалахування від тиску дуже складна - при високому і низькому тиску характер кривих розрізнений і залежить від вигляду горючого. У загальному вигляді зміна температури самоспалахування від тиску можна зобразити на графіку



Розрізняють три межі виникнення горіння по тиску, природу яких можна пояснити виходячи з ланцюгової теорії самоспалахування.

ВИСНОВОК: Самозаймання виникає тим легше, ніж вище швидкість реакції, теплота згоряння речовини і чим менше швидкість тепловіддачі і передвибухове розігрівання. З збільшенням значень параметрів, що викликають зростання швидкості тепловиділення в системі, і зменшенням параметрів, які визначають зростання інтенсивності тепловідведення, температура самоспалахування буде знижуватися, а пожежна небезпека підвищується.

§ 5. Визначення температури самоспалахування горючих речовин.

Оскільки температура самоспалахування є одним з найважливіших параметрів, які характеризують пожежну небезпеку речовин, то Вам в своїй практичній діяльності необхідно буде уміти визначати значення цього параметра. Існує два основних способи визначення температури самоспалахування - експериментальний і розрахунковий.

Експериментально температуру самоспалахування можна визначити різними методами. Основними з них є 1) метод впускання заздалегідь готової холодної суміші у вакуумовану нагріту посудину; 2) метод адіабатичного стиснення заздалегідь готової суміші; 3) метод «краплі», коли горюча суміш утвориться в нагрітій посудині за рахунок випаровування горючої речовини.

Оскільки температура самоспалахування не є величиною постійною і може змінюватися при зміні умов проведення випробувань, то для того щоб можна було порівнювати пожежну небезпеку декількох речовин, необхідно зіставляти їх температури самоспалахування, які визначені в однакових (стандартних) умовах. Для отримання порівнянних результатів при пожежно-технічних дослідженнях застосовують установку СТС і методику, що описані в Державному стандарті 12.1.044-89.

Експериментальний спосіб визначення ми з Вами відпрацюємо на лабораторній роботі, а сьогодні зупинимося на розрахункових методах визначення цього параметра.

Розрахункове визначення стандартної температури самоспалахування.

Орієнтовно стандартну температуру самоспалахування для насичених вуглеводнів, одноатомних спиртів і ароматичних вуглеводнів можна визначити по середній довжині вуглеводневого ланцюга молекули.

Стандартну температуру самоспалахування газів і парів органічних сполук можна приблизно розрахувати по формулах:

$$t_{cc} = 300 + 116\sqrt{5 - l_{сер}} \quad \text{при } l_{сер} \leq 5$$

$$t_{cc} = 300 - 38\sqrt{l_{сер} - 5} \quad \text{при } l_{сер} \geq 5$$

де $l_{сер}$ - умовна середня довжина молекули.

Ланцюгом вважаються безперервні послідовності зв'язаних атомів вуглецю, що починаються і закінчуються кінцевими групами.

Умовна середня довжина $l_{\text{сер}}$ молекули дорівнює середньому арифметичному всіх можливих довжин l_i ланцюгів молекули:

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

де $n_{\text{ланц}}$ - число вуглецевих ланцюгів у молекулі;

l_i - довжина i -того ланцюга молекули.

Число ланцюгів в молекулі речовини можна визначити по формулі:

$$n_{\text{ланц}} = 0,5 m (m - 1)$$

де m - число кінцевих груп в молекулі.

Гідроксильна група в молекулі спирту вважається кінцевою, а фенільна група може бути і кінцевою і проміжною групою.

Розрахункове число атомів вуглецю в ланцюгу аліфатичного вуглеводню дорівнює фактичному числу атомів вуглецю в даному ланцюгу.

Розрахункове число атомів вуглецю в ланцюгу аліфатичного спирту, дорівнює фактичному числу атомів вуглецю плюс одиниця.

Розрахункове число атомів вуглецю в ланцюгу, що містить бензольне кільце, дорівнює фактичному числу атомів вуглецю мінус одиниця. Атоми вуглецю в бензольному кільці в розрахунок не беруться.

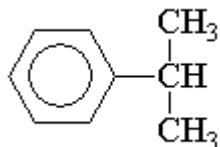
Методика визначення температури самоспалахування по середній довжині ланцюга.

1. Складають структурну формулу речовини.
2. Знаходять число ланцюгів в молекулі горючої речовини.
3. Визначають по структурній формулі довжину кожного ланцюга l_i .
4. Розраховують середнє значення довжини ланцюга.
5. Значення $T_{\text{ср}}$ знаходять по таблицях в залежності від $l_{\text{сер}}$.

Приклад рішення задач

Розрахувати стандартну температуру самоспалахування ізопропілбензолу $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}(\text{CH}_3)_2$. Порівняти отримане значення з експериментальним, рівним 424°C .

1. Записуємо структурну формулу ізопропілбензолу:



Визначаємо число кінцевих груп в молекулі m . Кінцевих груп 3:- дві групи CH_3 і фенільна група.

2. Визначаємо число ланцюгів: $m = 0,5 \cdot 3 \cdot (3-1) = 3$

3. Визначаємо склад ланцюгів, їх довжину і кількість ланцюгів однакової довжини:

Перший ланцюг радикалів $\text{CH}_3\text{-C-CH}_3$, довжина ланцюга $l_1 = 3$; число ланцюгів $m_1 = 1$.

Другий і третій ланцюг радикалів $\text{CH}_3\text{-C-Ph}$, довжина ланцюга з урахуванням фенільної групи $l_2 = 2 - 1 = 1$; число таких ланцюгів $m_2 = 2$.

4. Розраховуємо середню довжину ланцюга ізопропілбензолу

$$l_{\text{сер}} = (3 + 2 \cdot 1) / 3 = 1,7$$

5. Визначаємо стандартну температуру самоспалахування по значенню середньої довжини ланцюга молекули за таблицею: при $l_{\text{сер}} = 1,7$; $t_{\text{ср}} = 432^\circ\text{C}$.

Температуру самоспалахування інших класів органічних сполук можна розрахувати з більшою точністю по формулі:

$$t_{cc} = a \cdot t_{cc}^{\text{алк}} + b$$

де a, b - константи гомологічного ряду

$t_{cc}^{\text{алк}}$ - температуру самоспалахування алкану.

§ 6. Практичне значення температури самоспалахування.

Дані про температуру самоспалахування застосовують при оцінці пожежовибухонебезпеки речовин. Чим нижче температура самоспалахування речовини, тим легше виникне горіння, і, отже, тим вище його пожежна небезпека.

По температурі самоспалахування визначають групу вибухонебезпечних сумішей парів та газів з повітрям та групу вибухонебезпечних сумішей, необхідну для вибору вибухозахищеного енергоустаткування.

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

Значення температури самоспалахування використовують при розробці заходів щодо забезпечення пожежної та вибухової безпеки технологічних процесів відповідно до вимог ГОСТів 12.1.004-85 і 12.1.010-76 для визначення допустимої температури нагріву робочих поверхонь технологічного обладнання.

Для забезпечення безпеки технологічних процесів, в яких можливий контакт горючих речовин з нагрітими поверхнями (наприклад, сушильні камери у фарбувальному виробництві), необхідно підтримувати безпечні температури для запобігання самоспалахування речовинам. Максимальне допустиме значення температури, при якій процес самоспалахування неможливий, визначається як:

$$t_{\text{безп}} = 0,8 \cdot t_{cc}$$

Так, якщо відомо, що температура самоспалахування парів сірковуглецю дорівнює 90°C, то для забезпечення безпеки у виробничих приміщеннях в них забороняється використання навіть водяного опалювання, оскільки

$$t_{\text{безп}} = 0,8 \cdot 90 = 72 \text{ } ^\circ\text{C},$$

а температура нагріву батарей водяного опалювання сягає 95°C.

ВИСНОВОК: Розуміння процесів, що приводять до появи полум'яного горіння, сприяють практичній організації і проведенні профілактики пожеж, у виборі прийомів і способів припинення горіння, в ході проведення експертизи пожеж при визначенні можливості запалення горючих матеріалів.

Глава 3. Самозаймання речовин та матеріалів.

Самозаймання є одним з поширених видів виникнення горіння і служить причиною пожеж на виробництві набагато частіше, ніж самоспалахування (особливо в агропромисловому комплексі). Прикладами самозаймання можуть служити пожежі на елеваторах, вугільних складах, комбікормових заводах, в саунах, при транспортуванні деяких хімічних речовин і так далі. Знання суті процесу самозаймання речовин потрібне для в процесі вивчення дисципліни "Пожежна

профілактика в технології" і у подальшій практичній діяльності при розробці профілактичних заходів на підприємствах промисловості і сільського господарства.

§ 1. Сутність процесів самозаймання, їх класифікація.

Всі горючі речовини при контакті з повітрям при деяких температурах починають окислюватися. Цей процес супроводжується виділенням тепла і в разі перевищення швидкості тепловиділення за рахунок протікання екзотермічних процесів над швидкістю тепловіддачі в навколишнє середовище виникає самонагрівання, яке за критичних температур приведе до появи горіння. Найменша температура речовини, за якої виникає її самонагрівання, називається температурою самонагрівання.

Температура самонагрівання деяких горючих речовин дорівнює або нижче кімнатної температури. Такі речовини представляють велику пожежну небезпеку. В процесі їх зберігання, транспортування або переробки необхідно постійно контролювати температуру, щоб не виникло горіння. Деякі речовини необхідно зберігати та використовувати в умовах, при яких неможливий їх контакт з повітрям (під водою, в герметично закритій посудині та ін.) Тому всі речовини поділяють на дві групи: речовини, які мають температуру самонагрівання вище 50°C, і речовини, які мають температуру самонагрівання нижче 50°C. Речовини першої групи здатні до горіння тільки при їх нагріванні ззовні. Речовини другої групи здатні до горіння без додаткового підведення тепла, тому що температура навколишнього середовища дорівнює або може перевищувати температуру їх самонагрівання. Такі речовини називають пірофорними, а процес виникнення їх горіння за рахунок самонагрівання під впливом внутрішніх екзотермічних процесів у відсутності джерела запалювання називається самозайманням.

Серед горючих матеріалів, які мають низьку температуру самоспалахування, можуть бути гази, рідини та тверді речовини. Така рідина як триметилалюміній має температуру самоспалахування –68°C. Але найбільша кількість речовин, які схильні до самозаймання, знаходяться в твердому стані: деякі метали, вугілля, торф, матеріали рослинного походження. Наприклад, алюмінієва пудра починає самонагріватися вже при температурі навколишнього середовища 10°C, саме тому ще при виготовленні її відразу покривають шаром парафіну, для того, щоб уникнути контакту металу з окислювачем і запобігти процесу окислення.

Самозаймання є одним з видів виникнення процесів горіння і принципово не відрізняється від самоспалахування. Так, для виникнення горіння повинні виконуватися три умови:

- в системі протікають процеси, які супроводжуються виділенням тепла і при цьому інтенсивність тепловиділення перевищує інтенсивність тепловіддачі;
- процес самонагрівання приводить до розігріву горючої системи до критичної температури, при якій швидкість хімічного перетворення (окислення) різко збільшується;
- досягнення критичного значення температури відбувається за певний час – період індукції.

Але існують відмінності процесу самозаймання від самоспалахування, які дозволили виділити самозаймання в окремий вид виникнення горіння.

1. При самоспалахуванні горюча система нагрівалася вся повністю за рахунок зовнішнього нагріву судини, в якій вона знаходилася, і умови протікання процесу самонагрівання залежали від того, до якої початкової температури ми нагріємо посудину. При самозайманні нагрів системи ззовні відсутній, і тому для виникнення горіння необхідне виконання певних умов: а) поява первинного теплового імпульсу всередині системи, який викликає проходження подальшої хімічної реакції окислення горючої речовини б) підтримка певного температурного режиму, який забезпечує процес накопичення тепла всередині системи. При відсутності умови акумуляції тепла самозаймання матеріалів практично неможливе.

2. Оскільки для виникнення самозаймання необхідною умовою є акумуляція тепла, то горіння виникає не в усій системі, як це має місце при самоспалахуванні, а тільки в частині горючої системи, яка має найменшу тепловіддачу - в, так званому, осередку самозаймання.

3. До самозаймання схильні лише речовини, які мають низьку температуру самонагрівання. Для речовин, які мають високу температуру самонагрівання, без додатково тепла, що підводиться ззовні, виникнення горіння неможливо. Чим нижче температура самонагрівання речовини, тим більше небезпека виникнення процесу самозаймання.

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

5. Самозайманню передують порівняно тривалий процес самонагрівання матеріалу, оскільки лише внутрішні екзотермічні процеси приводять до підвищення температури системи. Тому період індукції при самозайманні значно більший, ніж при самоспалахуванні, і може досягати тижні і навіть місяці.

6. Самонагрівання при самоспалахуванні є результатом окислювальних процесів, первинним імпульсом яких служить тільки тепловий нагрів системи ззовні. При самозайманні самонагрівання може бути викликане і іншими екзотермічними фізичними, хімічними і мікробіологічними процесами, такими як: тепловиділення в процесі життєдіяльності мікроорганізмів, теплота хімічної реакції речовини з різними окислювачами, тепло, що виділяється при фізичних процесах. Залежно від природи первинного теплового імпульсу, розрізняють чотири види самозаймання: - мікробіологічне, - хімічне, - фізичне; - теплове.

Не треба вважати, що всі перераховані види самозаймання можуть відбуватися ізольовано один від одного, тобто в чистому вигляді. У більшості випадків процес самозаймання по виду виділяється з урахуванням тільки першопричини протікання екзотермічного процесу, а на якомусь його етапі даний процес закінчується і як би передає естафету іншому екзотермічному процесу.

Дамо коротку характеристику видам самозаймання.

Хімічне самозаймання виникає в місці контакту речовин, реагуючих з виділенням тепла. У залежності від характеру окислювача, який вступає в реакцію з горючим матеріалом, цей вид самозаймання можна поділити на самозаймання при контакті з киснем повітря, при контакті з водою і при контакті з хімічним окислювачем.

Фізичне самозаймання є наслідком тепловиділення фізичних процесів. До таких відносяться адсорбція - поглинання газів на поверхні твердих речовин, абсорбція - розчинення пари і газів в рідинах, тепловиділення при терті і інші.

Мікробіологічне самозаймання характерне для матеріалів, в яких можлива життєдіяльність мікроорганізмів. Переважно це рослинні матеріали, причому самозаймання відбувається в товщі скупчення матеріалу, що тривало зберігається при певній вологості. У процесі протікання даного вигляду самозаймання на різних його етапах при різних температурах можуть відбуватися і інші процеси, характерні для раніше перерахованих видів самозаймання.

Теплове самозаймання виникає при нагріванні речовини до температури, що забезпечує його термічне розкладання і подальше самоприскорене самонагрівання за рахунок теплоти екзотермічної реакції окислення продуктів термічного розкладання в об'ємі горючого матеріалу. Сам процес протікає в глибині матеріалу в формі тління, яке потім може перейти в полум'яне горіння на поверхні.

ВИСНОВОК: самозаймання є одним з видів виникнення процесів горіння і поширеною причиною початку пожежі. Самозаймання, в залежності від причин самонагрівання, поділяється на теплове, хімічне, фізичне і мікробіологічне. Всі перелічені процеси є причиною самонагрівання речовин лише на початковій стадії і не мають суттєвої ролі в період, коли почалися реакції окислення матеріалу, які приведуть до появи горіння при наявності умови акумуляція тепла в системі.

§ 2. Умови, які необхідні для виникнення самозаймання.

Основною відмінною рисою самозаймання є обов'язкова умова акумуляції тепла. Які ж умови сприяють накопиченню тепла в системі? Оскільки підведення тепла до системи відсутнє, умови віддачі тепла при самозайманні мають визначальне значення.

Кількісний опис явища самозаймання засновується на тепловому балансі між тепловиділенням і різними видами втрати тепла. Тепловиділення відбувається внаслідок окислення матеріалу киснем повітря, що поступає в скупчення матеріалу. Оскільки спочатку здійснюється окислення 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 при окисленні одиниці об'єму матеріалу dV , який самонагрівається, за час dt можна виразити:

$$q(+)=Q \cdot k' \cdot \varphi_{ок} \cdot S \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \cdot dV$$

де Q - питома теплота реакції окислення; k - константа швидкості адсорбції; $\varphi_{ок}$ - концентрація кисню. S – питома реагуюча поверхня матеріалу, m^2/m^3 ; T – температура, К, у точці з координатами x, y, z у момент часу τ ; E – енергія активації процесу окислення, кДж/кмоль;

Поряд з хімічною реакцією окислюванням в матеріалі проходять і фізичні процеси, які також впливають на процес самозаймання. Тепло, що виділилося, піде на нагрів самого матеріалу, повітря, яке поступає, втрати тепла теплопровідністю від осередку самонагрівання в сусідні шари матеріалу, частина тепла буде відводитися в навколишнє середовище за рахунок конвекційного теплообміну, на випаровування вологи та т.п.

За цей же час повітрям буде винесене тепло:

$$q_1 = -c_{пов} \rho_{пов} w_{пов} \frac{\partial T}{\partial x} dV$$

За рахунок теплопровідності від осередку тепловиділення віддається тепло:

$$q_2 = \lambda \nabla^2 T dV$$

У результаті цього тепловміст в об'ємі dV зміниться на величину

$$q_3 = c_m \rho_m \frac{\partial T}{\partial t} dV$$

ρ_m - густина скупчення матеріалу;

Тепло, що відводиться в навколишнє середовище за рахунок конвекційного теплообміну:

$$q_4 = \alpha S_o (T - T_o)$$

S_o — питома поверхня скупченого матеріалу, m^2/m^3 ;

Сумарні втрати тепла можна виразити формулою:

$$q(-) = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + W$$

Отже енергетичний баланс можна виразити:

$$Qk' \varphi_{ок} S e^{-\frac{E}{RT}} dV = c_{пов} \rho_{пов} w_{пов} \frac{\partial T}{\partial x} dV + \lambda \nabla^2 T dV + c_m \rho_m \frac{\partial T}{\partial t} dV + \alpha S (T - T_o) + W$$

де ρ_m – густина накопичення матеріалу; $\rho_{п}$ - густина повітря; $c_m, c_{п}$ - теплоємність матеріалу і повітря відповідно dT/dt - швидкість нагрівання матеріалу; $w_{п}$ - швидкість повітряного потоку; dT/dx - градієнт температури уздовж потоку; λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу; $\nabla^2 T$ - зміна в часі температурного поля; α - коефіцієнт

тепловіддачі; S - поверхня тепловіддачі; T_0 – температура навколишнього середовища; W - втрати тепла на випаровування вологи, яка міститься в матеріалі.

Рівняння теплового балансу враховує всі основні процеси, що відбуваються у накопиченні матеріалу, що окислюється, і може бути використаним при визначенні небезпеки його самозаймання і розробці заходів щодо попередження самозаймання в умовах промислового зберігання.

Хімічні умови самонагрівання речовини визначаються концентраціями початкових і кінцевих речовин, енергією активації молекул і вільних радикалів, що утворюються, тепловим ефектом реакції, залежністю швидкості реакції від температури і т.п.

Фізичну основу процесу самонагрівання речовини складають теплофізичні параметри реагуючих речовин, стан навколишнього середовища і фізичні процеси, які протікають при цьому в системі.

Фізичний стан реагуючих речовин визначається такими чинниками, як величина і геометрична форма накопичення матеріалу, дисперсність і пористість часток, питома поверхня часток, величина повітряного простору в шарі матеріалу, вологість, густина та інші.

Стан навколишнього середовища визначається його складом, температурою і гідродинамічними умовами тепло- і масообміну на границі об'єму з навколишнім середовищем.

Аналізуючи рівняння енергетичного балансу процесу самозаймання, можна сказати, що на протікання процесу самонагрівання найбільшим чином будуть впливати такі фактори, як:

- теплотворна здатність екзотермічних процесів;
- швидкість реакції окислення;
- фізичні і теплофізичні характеристики матеріалу (його 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 окислення, і тим легше почнеться процес самонагрівання, що приводить до самозаймання.

Велике значення в процесі самозаймання має приток повітря. Виділення тепла внаслідок хімічної реакції окислення в середині горючого матеріалу пропорційне концентрації окислювача, тому схильність системи до самозаймання визначається доступом кисню повітря до поверхні пального. Однак, потік повітря w в скупчення матеріалу, що окислюється, впливає не тільки на генерацію тепла, але і на винесення тепла вихідним повітрям. Тому при збільшенні швидкості потоку повітря збільшується також інтенсивність тепловіддачі за рахунок тепловтрат на нагрів повітря і конвекційної тепловіддачі. Чим вище значення коефіцієнта конвекційної тепловіддачі, тим менш сприятливі умови для накопичення тепла всередині системи, яке необхідне для виникнення самозаймання. При деякій швидкості потоку повітря замість самонагрівання в системі може виникнути охолодження матеріалу, що окислюється.

Звичайно процес самозаймання протікає при температурі навколишнього середовища не менше за 10°C (при більш низьких температурах збільшується інтенсивність тепловіддачі так, що тепловиділення може бути недостатнім для виникнення горіння). Однак, чим менше розсіюється тепло (у разі великого скупчення горючого матеріалу), тим при більш низькій температурі навколишнього середовища починається самонагрівання речовини.

Аналіз рівняння теплового балансу показує, що самозаймається лише велике скопичення матеріалу. Як правило, самозаймання виникає в тому випадку, коли відношення зовнішньої поверхні штабелю матеріалу (площі тепловіддачі) до об'єму невелике, а площа поверхні реагування багато більше зовнішньої поверхні матеріалу. Зменшуючи висоту штабелю, можна досягти такого максимального відношення S/V , при якому за рахунок значного тепловідведення саморозігрів і

самозаймання будуть неможливі. Ця безпечна висота штабелю матеріалу звичайно вказується в нормах зберігання (Протипожежні норми проектування складів).

§ 3. Теплове самозаймання.

3.1. Загальні відомості про теплове самозаймання.

Тепловим самозайманням називається явище виникнення горіння, викликане самонагріванням, що виникло при тривалому впливі зовнішнього нагріву речовини вище за температуру самонагрівання. Різке підвищення швидкості екзотермічних реакцій в об'ємі речовини пов'язане в основному із зростанням температури в зоні реакцій під впливом теплового імпульсу.

При цьому речовина нагрівається до температури, що забезпечує її термічне розкладання на газоподібні продукти і твердий вуглецевий залишок. Газоподібні продукти термічного розкладання вступають в екзотермічну реакцію окислення з киснем повітря. Тепло, що виділилося, не встигає розсіятися в довкілля, оскільки температура навколишнього середовища підвищена за рахунок зовнішнього підведення тепла. В результаті виникає самонагрівання, яке в свою чергу зумовлює підвищення температури матеріалу і прискорення процесів розкладання і окислення. Поступове підвищення температури матеріалу приводить до окислення твердого вуглецевого залишку, яке при сприятливих умовах акумуляції тепла може перейти в самозаймання спочатку у вигляді тління, а потім і з появою полум'яного горіння.

Самозаймання речовини спочатку відбувається в зоні максимальних температур (в "гарячій точці"), а потім горіння поширюється по всьому об'єму.

Оскільки теплове самозаймання відбувається при нагріві речовини в атмосфері повітря, воно не має різкої відмінності від хімічного самозаймання речовин при контакті їх з киснем повітря і від фізичного, викликаного адсорбцією.

Таким чином, для виникнення теплового самозаймання необхідне дотримання наступних умов:

- температура навколишнього середовища підвищена за рахунок зовнішнього підведення тепла;
- є скупчення горючого матеріалу, яке перешкоджає вільній віддачі тепла, а отже в товщі матеріалу виникає процес самонагрівання,
- горючий матеріал легко розкладається, при цьому утворюється достатня кількість газоподібних продуктів розкладання, які активно вступають в реакцію окислення;
- матеріал є пористим або роздрібненим, але нещільно утрамбованим, для того щоб був доступ кисню повітря до продуктів розкладання для можливості протікання реакції окислення.

Тривалість самонагрівання матеріалу може бути дуже великою і залежить вона від різниці швидкостей виділення та розсіювання тепла, фізичних та хімічних властивостей матеріалу, його розмірів. Відомі випадки самонагрівання, наприклад тирси, яка загорілася лише через рік контакту з теплоносієм, який мав температуру 110-120°C. Тому отримання залежності між температурою навколишнього середовища, розмірами матеріалу та часом до самозаймання (періодом індукції) становить велику практичну цінність.

3.2. Визначення схильності речовин до теплового самозаймання.

Як перший показник можна виділити мінімальну температуру середовища, при якій можливе теплове самозаймання певного об'єму (маси) матеріалу. Такою температурою є температура самонагрівання речовини. Це та умовна температурна межа, вище за яку при сприятливих умовах можливий розвиток екзотермічного процесу самонагрівання, пов'язаний з термічним розкладанням речовин та окисленням продуктів розкладу.

Другим показником є період індукції - час з того моменту, коли температура всього осередку самозаймання в матеріалі стане рівною мінімальній температурі самонагрівання до моменту виникнення горіння в найбільш "гарячій" точці об'єму.

Третій показник, що визначає схильність матеріалу до теплового самозаймання, це питома поверхня матеріалу, яка в свою чергу визначається розмірами і формою скупчення матеріалу. Знаючи цей показник, можна в кожному конкретному випадку визначити безпечні розміри об'ємів матеріалу і їх геометричну форму для даної температури середовища.

Для розрахункового визначення температури самонагрівання і часу нагріву матеріалу до небезпечної температури С.И.Таубкіним були отримані емпіричні залежності, які враховують зміну температури самонагрівання від геометричних розмірів матеріал, що досліджується:

$$\lg t_{сн} = A_p + n_p \lg S_{пит}$$

та період індукції від температури самонагрівання:

$$\lg t_{сн} = A_b - n_b \lg \tau_{инд}$$

де $t_{сн}$ - температура теплового самонагрівання. С:

τ - час теплового впливу до самозаймання, години;

A_p, n_p, A_b, n_b - емпіричні коефіцієнти, які визначають за довідником.

$S_{пит}$ - питома поверхня зразка, 1/м, яка визначається як відношення повної поверхні тепловідведення до об'єму матеріалу, в якому відбуваються екзотермічні процеси, по формулі:

$$S_{пит} = S_{повн} / V$$

де $S_{повн}$ - повна зовнішня поверхня зразка, м²;

V - об'єм зразка, м³.

Емпіричні константи A_p, n_p, A_b, n_b для цілого ряду речовин отримані експериментальним шляхом і є в довіднику Баратова і Корольченко "Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения".

Використовуючи дані рівняння, можна визначити як температуру самонагрівання, так і час протікання процесу.

Методика визначення температури самонагрівання і часу індукції

1. Визначається питома поверхня тепловіддачі матеріалу

2. Визначаються емпіричні константи A_p, n_p, A_b, n_b по довідкових посібниках.

3. Визначається температура самонагрівання:

$$\lg t_{сн} = A_p + n_p \lg S_{пит}$$

$$t_{сн} = 10^{(A_p + n_p \lg S_{пит})}$$

4. Визначається час нагріву матеріалу:

$$\lg \tau = (A_b - \lg t_{сн}) / n_b$$

$$\tau = 10^{(A_b - \lg t_{сн}) / n_b}$$

Приклад розрахунку безпечних параметрів технологічного процесу, в якому можливе теплове самозаймання, по величині і геометричній формі продукту, що переробляється.

Розрахувати показники пожежної небезпеки від самозаймання порошку нігрозину спирторозчинного.

1. Об'єм даного порошку в апараті має конічну форму. Висота конуса $h=1,0$ м, $r=1,5$ м. Нижня стінка апарату має хорошу теплоізоляцію.

Образуюча конуса l має величину:

$$l = \sqrt{h^2 + r^2} = \sqrt{1^2 + 1.5^2} = 1,8 \text{ м}$$

$$S_{повн} = \pi \cdot r \cdot l = 3,14 \cdot 1,5 \cdot 1,8 = 8,48 \text{ м}^2 \quad V = \pi \cdot r^2 \cdot h / 3 = 3,14 \cdot 1,5^2 \cdot 1 / 3 = 2,2 \text{ м}^3$$

$$S_{пит} = 8,48 / 2,2 = 3,8 \text{ м}^{-1}$$

2. Схильність порошку до теплового самозаймання виражається формулами:

$$\lg t_{сн} = 1,708 + 0,220 \lg S_{пит}$$

$$\lg t_{сн} = 2,254 - 0,260 \lg \tau$$

$$3. t_{сн} = 10^{1,708 + 0,220 \lg 3,8} = 10^{1,83} = 68,5^\circ\text{C}$$

$$\tau = 10^{(2,254 - 1,83) / 0,26} = 10^{1,63} = 42,7 \text{ (годин)}$$

Крім розрахункового визначення схильності і умов речовини до теплового самозаймання існують експериментальні методи визначення.

Методика практичного визначення схильності речовин і матеріалів до самозаймання заснована на виявленні приросту температури всередині матеріалу при фіксованому нагріві випробуваної речовини в спеціальному термостаті.

Термостатом може бути як спеціальна термостатична камера, так і утворена водяна баня з природним повітрообміном (прилад Маккея). Зразок нагрівається до певної температури (для твердих речовин 200°C, а для жирів і олій - 100°C) і проводиться контроль температури протягом певного часу. Якщо в матеріалі температура підіймається вище ніж в термостаті, значить всередині матеріалу протікають процеси, пов'язані з виділенням енергії і даний матеріал схильний до самозаймання.

ВИСНОВОК: Для розвитку процесу самонагрівання матеріалу і подальшого самозаймання необхідна наявність певного об'єму матеріалу, що самонагрівається, з розвиненою поверхнею окислення. Небезпека в багато разів збільшується, якщо речовина схильна до об'ємного або локального зовнішнього нагріву. Джерелами такого нагріву можуть бути: нагріта поверхня апарату, труби, потік нагрітого повітря, прямі сонячні промені та ін.

§ 4. Хімічне самозаймання .

Хімічним називається самозаймання, яке виникає внаслідок взаємодії речовин, реагуючих з виділенням тепла.

У залежності від характеру окислювача, який вступає в реакцію з горючим матеріалом, цей вид самозаймання можна поділити на три групи:

- самозаймання при контакті з киснем повітря,
- самозаймання при контакті з водою;
- самозаймання при контакті з хімічним окислювачем.

Крім того, самозаймання при контакті з хімічними окислювачами ділять на три підкласи в залежності від агрегатного стану окислювача.

4.1. Хімічне самозаймання при контакті речовин з киснем повітря.

Речовини, які здатні самозайматися при контакті з повітрям і мають температуру самонагрівання нижче за 50°C, називають пірофорними. До цієї групи речовин можна віднести:

1. Індивідуальні хімічні речовини, які мають високу хімічну активність і здатні бурхливо реагувати на повітрі:

- лужні метали, що мають велику молекулярну масу (рубідій та цезій);
- метали в порошкоподібному стані (цинкова, магнієва, алюмінієва пудра);
- білий фосфор.

2. Металоорганічні сполуки (МОС) - органічні речовини, що вмістять атоми металів (етилат натрію C_2H_5ONa , триетілалюміній $(C_2H_5)_3Al$).

3. Елементоорганічні сполуки - речовини, в структурі яких міститься атоми силіцію, фосфору, арсену (безбарвний газ силан SiH_4 , рідкий фосфористий водень P_2H_4 , арсенід водню H_3As)

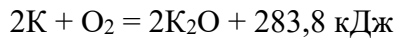
4. Пірофорне сірчисте залізо.

5. Жири і олії, а також матеріали на їх основі, такі як оліфа, лаки, фарби, лінолеум.

Всі ці речовини здатні окислюватися на повітрі з виділенням значної кількості тепла, за рахунок якого реакція самоприскорюється до виникнення горіння самих речовин або інших горючих речовин, які знаходяться в контакті. Деякі із перелічених речовин самозаймаються дуже швидко після зіткнення з повітрям, інші - через тривалий проміжок часу.

Розглянемо причини самозаймання цих речовин.

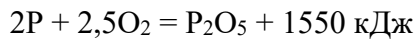
Лужні, лужноземельні метали та алюміній на повітрі окислюються. Рубідій та цезій - найбільш реакційноздатні, тому вони самозаймаються навіть в компактному вигляді, а інші - у вигляді порошоків.



Дисперсність часток, при якій виявляється схильність до самозаймання, різна для різних металів. Для цирконію, найбільше схильного до самозаймання, ця здатність виявляється при частках розміром до 3 мкм. Частки розміром 12 мкм не загоряються навіть при нагріві їх до почервоніння. Залізо, нікель, мідь самозаймаються при частках розміром 0,01 – 0,03 мкм. Натрій і цирконій при частках таких розмірів спалахують на повітрі миттєво.

Волога сприяє самозайманню, отже в вологому повітрі горіння виникає легше і скоріше, ніж у сухому. Тому алюмінієву пудру виготовляють лише в середовищі інертного газу і потім перетирають парафіном, плівка якого запобігає окисленню метала. У випадку, коли під дією розчинника парафін зникає з поверхні порошку, відбувається самозаймання.

Дуже небезпечним є фосфор (білий та жовтий). На повітрі він інтенсивно окислюється, внаслідок чого швидко самонагрівається та самозаймається. Температура його самоспалахування нижче 20°C.

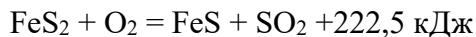


Зберігають фосфор під водою. Розчиняється фосфор лише у сірководню. Такі розчини використовували як запальні: після змочування ними горючих речовин відбувалось випаровування сірководню, а фосфор, що залишався на поверхні горючої речовини тонким шаром, швидко окислювався та самозаймався. При цьому займалася і горюча речовина.

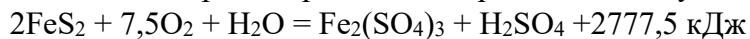
1.1. Самозаймання сульфідів заліза

Сірководневі солі заліза (сульфіди FeS, FeS₂, Fe₂S₃) здатні самозайматися при контакті з повітрям. Це явище може бути причиною виникнення пожежі.

В природі сульфід заліза знаходиться в виді FeS₂ і має назву сірчаний колчедан або пірит, вміщується в кам'яному вугіллі, залізній руді. Окислення піриту супроводжується виділенням тепла:



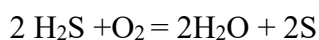
Окисленню пірита сприяє волога, реакція в цьому випадку протікає таким чином:



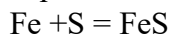
Сірчаноокислотне залізо, що утворюється, збільшуючись в об'ємі, спричиняє розтріскування шматків піриту і їх подрібнення, при цьому збільшується площа контакту осадка з окислювачем, що приводить до зростання швидкості реакції та сприяє процесу самозаймання того горючого матеріалу, в якому міститься пірит.

Інші сульфідів утворюються в технологічній апаратурі, в якій обробляються або зберігаються продукти, що вміщують сірководень або інші сірковмісні речовини. Вони представляють більшу небезпеку, ніж сірчаний колчедан, тому що їх самозаймання відбувається в суміші повітря з горючими парами та газами.

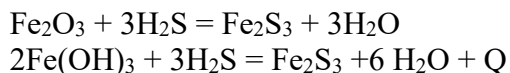
Механізм виникнення сульфідів заліза в резервуарах і технологічних апаратах залежить від температурних умов. Якщо температура в апараті вище за температуру дисоціації сірководню (вище за 583 К), сульфідів заліза утворюються при взаємодії заліза з елементарною сіркою, що вийшла внаслідок розкладання сірководню або інших сірчистих сполук.



Сірка, що виділилася, осідаючи на стінках апаратури, взаємодіє із залізом:



Пірофорне залізо утворюється і при температурах нижче 300°C при тривалому контакті окислених залізних поверхонь при зберіганні нафти, в якій міститься сірководень. При цьому сірководень впливає не на залізо, а на продукти його корозії, протікають реакції типу



Причиною самозаймання всіх сульфідів є їх здатність окислюватися киснем повітря при звичайній температурі. Пірофорний осадок може накопичуватися на поверхнях апарату і при їх оголенні (наприклад при зливі нафтопродукту) контактувати з повітрям. При цьому протікають реакції окислення пірофорного заліза киснем повітря, які супроводжуються значним тепловиділенням. Горіння пірофорного заліза, в своїй суті безпечно, але його тепловиділення викликає самозаймання пари горючих рідин в об'ємі резервуара.

Профілактика процесів самозаймання пірофорних осадків в технологічному обладнанні і резервуарних парках - одна із задач, що вирішуються інспекторським складом ДПО на об'єктах хімічної, нафтохімічної і нафтопереробної промисловості.

Боротьба з самозайманням сульфідів заліза ведеться різними методами:

- 1) очищення від сірководню продукту, що зберігається; при цьому не будуть утворюватися сульфід заліза;
- 2) обробка антикорозійним покриттям внутрішньої поверхні апаратури, при цьому не буде відбуватися контакт сірковмісних речовин з залізом;
- 3) продувка апаратури паром або продуктами горіння, для витіснення з обладнання пари горючих рідин та кисню;
- 4) заповненням апаратури водою і повільним спуском її для запобігання утворення горючого середовища всередині обладнання.

1.2. Самозаймання жирів і олій

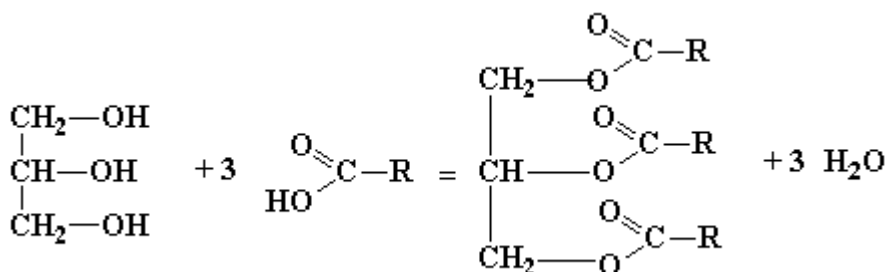
Даний вид самозаймання часто є причиною виникнення пожеж, тому працівникам пожежної охорони необхідно знати причини, механізм протікання цього процесу і, відповідно до цього, розробляти і застосовувати різні заходи профілактики.

За своєю природою жири і масла можна класифікувати на мінеральні, рослинні і тваринні.

До мінеральних відносять масла, отримані в процесі переробки нафти (машинне, трансформаторне, солярове і ін.). Такі масла являють собою суміш в основному насичених вуглеводнів, які окислюються на повітрі тільки при високих температурах, і тому до самозаймання не схильні.

Однак, в практиці бувають випадки пожеж, причиною яких є самозаймання ганчірок, що просочилися мінеральними маслами. Це пояснюється тим, що в складі відпрацьованих мінеральних масел, що зазнавали нагріву до високих температур, з'являється значна кількість ненасичених вуглеводнів, схильних до самозаймання.

Масла і жири рослинного і тваринного походження відрізняються по своєму складу від мінеральних. Вони являють собою суміш гліцеридів високомолекулярних органічних кислот. Гліцериди – це складні ефіри гліцерину і карбонових кислот, які утворюються за реакцією етерифікації.



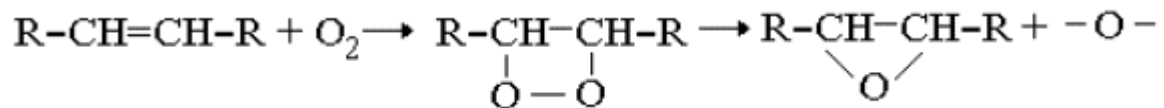
Отже, загальна формула гліцериду – $\text{C}_3\text{H}_5(\text{COOR})_3$, де R – радикал карбонової кислоти.

Гліцериди насичених кислот (R має вид C_nH_{2n+1}) являють собою тверді речовини і є головною складовою частиною тваринних жирів (яловичого, баранячого і ін.). Такі жири мають відносно низьку хімічну активність, полімеризуються і окислюються при температурі вище за 150°C і не здатні самозайматися.

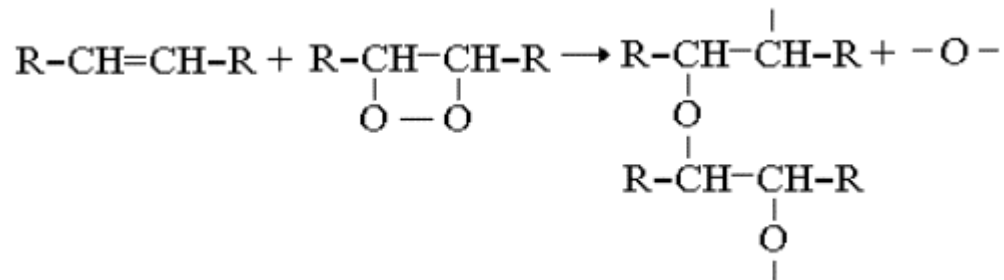
Гліцериди ненасичених високомолекулярних кислот (R має вид C_nH_{2n-x}) - рідкі речовини. Вони входять до складу майже всіх рослинних масел. Молекули цих гліцеридів мають ненасичені (подвійні) зв'язки, які при певних умовах обумовлюють здібність рослинних масел до самозаймання.

Самозаймання масел відбувається за рахунок тепловиділення при окисленні і полімеризації, що протікають по місцю ненасичених зв'язків.

Згідно з перекісною теорією А.Н.Баха механізм окислення масел можна представити таким чином:



Відомо, що пероксиди легко розкладаються з утворенням активного кисню, який може взаємодіяти навіть з гліцеридами насичених кислот. Одночасно з окисленням протікають реакції полімеризації:



Умови, що сприяють самозайманню олій:

1) вміст значної кількості гліцеридів ненасичених кислот;

Чим більше ненасичених зв'язків містить гліцерид, тим більше він приєднає молекул кисню. При збільшенні кількості кисню, що приєднується, росте кількість тепла, що виділяється, і загальна здатність масла до самозаймання.

2) наявність великої поверхні окислення $S_{\text{ок}}$ і малої поверхні тепловіддачі $F_{\text{тв}}$;

Високомолекулярні ненасичені речовини, що зберігаються в бочках, банках, каністрах, не самозаймаються через незначну площу поверхні взаємодії з киснем повітря. Для того щоб створити умови, які сприяють виникненню самозаймання, необхідно збільшити площу поверхні окислення, наприклад, нанести олію на волокнисті або пористі матеріали (бавовну, тирсу, паклю, вату, сажу і т.п.). Встановлено, що самозаймання рослинних олій, нанесених на скляну вату, можливе при співвідношенні $S_{\text{ок}}/F_{\text{тв}} > 90$, для вати із бавовни $S_{\text{ок}}/F_{\text{тв}} > 50$.

3) доступ повітря;

Якщо просочений матеріал має надлишок олії (пори матеріалу повністю заповнені рідиною), то зменшується площа поверхні, по якій може відбуватися контакт з киснем повітря, отже, зменшується інтенсивність тепловиділення і схильність до самозаймання.

4) температура навколишнього середовища не менше за 10°C ;

Чим нижче температура навколишнього середовища, тим інтенсивніше відбувається процес тепловтрат від системи і процес самонагрівання може не привести до виникнення горіння

5) певна щільність промасленого матеріалу.

Визначальною умовою серед перелічених є наявність великої кількості ненасичених (подвійних) зв'язків, бо, навіть якщо будуть виконані всі інші умови, але речовина не схильна до реакцій окислення й полімеризації, то тепловиділення в системі не буде відбуватися, отже, самозаймання не виникне.

Визначити кількість подвійних зв'язків можна за допомогою йодометричного методу.

Даний метод заснований на здатності галогенів приєднуватися до речовин по місцю ненасичених (подвійних) зв'язків. При цьому карбонові кислоти втрачають ненасиченість. По кількості йоду, що прореагував, можна кількісно судити про ступінь ненасиченості карбонових кислот і про схильність жиру або масла, до складу яких входять гліцериди цих кислот, до самозаймання. Критерієм в такій оцінці служить йодне число ($J_{\text{ч}}$), яке показує скільки грамів йоду приєднається в певних умовах до 100 грамів масла. Якщо $J_{\text{ч}} < 50$ - масло не схильне до самозаймання, а якщо $J_{\text{ч}} > 50$ - схильне.

Для того, щоб визначити йодне число розрахунком потрібно знати кількісний та якісний склад масла.

Методика розрахунку схильності масла до самозаймання

Визначити число подвійних зв'язків в молекулі гліцериду, що входить до складу масла.

загальна формула: $\text{C}_3\text{H}_5(\text{COOR})_3$, де R: $\text{C}_n\text{H}_{2n-x}$

$$z = 3 \frac{x+1}{2}$$

число подвійних зв'язків:

Визначити молярну масу гліцериду $M_{\text{гліц}}$.

Визначити йодне число гліцериду, враховуючи, що до кожного подвійного зв'язку приєднається одна молекула йоду.

$$100 \text{ г} \quad - \quad I_{\text{ч}}, \text{ г}$$

$$m_{\text{I}_2} = z \cdot 254, \text{ г}$$

$$M_{\text{гліц}} \quad - \quad m_{\text{I}_2}$$

$$I_{\text{ч}} = \frac{100 \cdot 254 \cdot z}{M_{\text{гліц}}}, \text{ г}$$

Визначити йодне число масла з урахуванням його кількісного складу.

$$I_{\text{ч}} \text{ масла} = \sum I_{\text{ч}i} \cdot g_i$$

де g_i – масова частка i -го гліцериду в маслі.

Зробити висновок про схильність масла до самозаймання.

4.2. Хімічне самозаймання при контакті речовин з водою.

Реакції деяких речовин з водою або вологою повітря протікають з виділенням значної кількості теплоти, під дією якої горючі продукти реакції і вихідні речовини займаються, а негорючі матеріали нагріваються до високої температури і можуть викликати займання горючих речовин, які знаходяться поблизу зони реакції.

В залежності від складу вихідних речовин при реакції з водою утворюються різні газоподібні продукти реакції: водень, ацетилен, метан, етан та інші гази. Саме ці гази спочатку будуть займатися під впливом теплоти хімічної реакції.

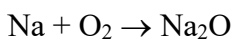
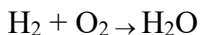
До групи речовин, які самозаймаються при контакті з водою, можна віднести лужні метали; гідриди металів (NaNH_2 ; KH ; CaH_2); оксиди і пероксиди металів (CaO , Na_2O_2), карбіди металів (CaC_2 , K_2C_2), фосфіди та силіциди різних металів, деякі металоорганічні сполуки.

Всі лужні метали взаємодіють з водою. Реакція супроводжується виділенням водню і значної кількості тепла.





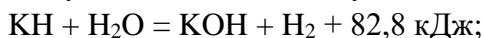
Водень, що виділяється, самозаймається і горить разом з металом.



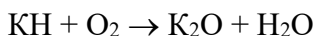
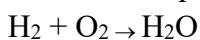
Іноді взаємодія вказаних металів з водою супроводжується вибухом з розбризкуванням розплавленого металу.

Крім того, велика реакційна спроможність лужних металів обумовлює протікання реакції взаємодії цих металів з вологою повітря. При цьому на поверхні металу швидко утворюється плівка гідроокису.

Гідриди лужних і лужноземельних металів взаємодіють з водою з утворенням водню і гідроокису відповідного металу.



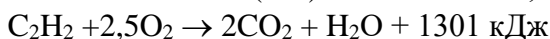
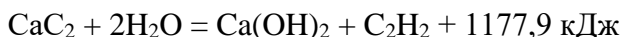
Від теплоти реакції самозаймаються водень і гідрид металу:



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



При взаємодії карбідів лужноземельних металів (карбід кальцію) зі стехіометричною кількістю води виділяється стільки тепла, що система розігрівається до 920°C і ацетилен, що утворюється в ході реакції, самозаймається:



При великій кількості води самозаймання ацетилену не відбувається.

Карбід берилію та алюмінію утворюють з водою метан:



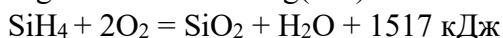
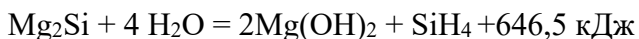
Самозаймання при контакті з водою характерно також для фосфідів і силіцидів різних металів.

Фосфід кальцію при взаємодії з водою утворює фосфористий водень (фосфін):

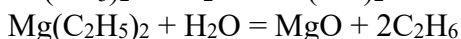
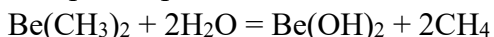


Це горючий газ, але його температура самоспалахування дуже висока. Одночасно з PH_3 виділяється деяка кількість рідкого фосфористого водню P_2H_4 , який самозаймається на повітрі і здатен стати причиною спалахування PH_3 .

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



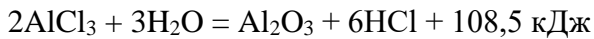
Деякі металоорганічні сполуки реагують з водою, утворюючи горючі гази. Наприклад, диметілберилій при взаємодії з водою виділяє метан, а діетілмагній - етан.



Теплота, що виділяється при цьому, приводить до запалення газу, що виділяється, і вихідної речовини.

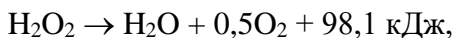
Деякі речовини при взаємодії з водою не утворюють горючі продукти, але теплота, що виділяється при реакції, розігріває ці речовини до високих температур, що сприяє виникненню горіння інших горючих матеріалів, які знаходяться поблизу зони реакції. До таких речовин відносяться оксиди і пероксиди металів, хлорид алюмінію, сірчана кислота, хлорсульфонова кислота та ін.

Реакція між хлоридом алюмінію і водою супроводжується утворенням негорючих продуктів – оксиду алюмінію та хлориду водню:



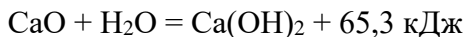
При зрошенні водою концентрованої сірчаної кислоти виникає небезпека її розбризкування через сильний місцевий перегрів. Виділення великої кількості тепла ($80 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$) відбувається внаслідок утворення гідратів типу $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$.

Оксиди і пероксиди лужних металів взаємодіють з водою без виділення горючих газів. Наприклад, при взаємодії перекису натрію з водою утвориться перекис водню і гідроксид натрію. В свою чергу перекис водню - нестійка сполука, яка здатна до самовільного розкладання з утворенням води і кисню також з виділенням теплоти.



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

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



Деякі органічні речовини розчиняються в воді з виділенням великої кількості теплоти. Від теплоти реакції збільшується швидкість випаровування горючої рідини, що сприяє утворенню великого об'єму вибухонебезпечної суміші пари з повітрям.

4.3. Самозаймання при взаємодії речовин з хімічними окислювачами.

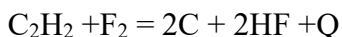
При контакті з хімічними окислювачами самозаймається більшість горючих матеріалів органічного походження. Можливість самозаймання при цьому в більшій мірі залежить від властивостей окислювачів. Розрізняють три підгрупи окислювачів в залежності від їхнього агрегатного стану.

Розглянемо особливості взаємодії найбільш характерних окислювачів.

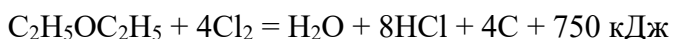
Газоподібні окислювачі.

До найбільш поширених газів-окислювачів відносяться гази шостого і сьомого ряду таблиці Менделєєва. Це фтор, хлор, кисень, озон (F_2 ; Cl_2 ; O_2 ; O_3). Вони активно сполучаються з рядом речовин, причому реакція супроводжується виділенням великої кількості тепла, внаслідок чого речовини самозаймаються.

Ацетилен, водень, метан і етилен в суміші з хлором самозаймаються навіть на денному світлі. Якщо ці гази присутні в момент виділення хлору з якої-небудь речовини, самозаймання їх відбувається навіть в темряві:



Хлор і інші галоїди не можна зберігати разом з легкозаймистими рідинами. Наприклад скипидар в атмосфері хлору самозаймається, якщо ним просочився пористий матеріал (папір, вата, дрантя). Пари діетилового ефіру також можуть самозайматися в атмосфері хлору:



Горіння органічних сполук в хлорі і фторі супроводжується виділенням вільного вуглецю у вигляді кіптяви.

При взаємодії з хлором і хлорвмісними речовинами можуть самозайматися лужні метали:



Суміші чотирьоххлористого вуглецю або чотирьохбромистого вуглецю з лужними металами при нагріванні до 70°C вибухають.



Порошок сурми і мідна фольга самозаймаються в хлорі за нормальної температури:



Стислий кисень є енергійним окисником, який викликає самозаймання речовин, які не самозаймаються в кисні за нормальних умов. Так трихлорметан чи трихлоретилфосфат в повітрі не горять, а в атмосфері кисню стають горючими.

Стислий кисень зберігається в балонах і якщо всередину вентиля або редуктора потрапляє мінеральне масло, то при стиканні зі стислим киснем воно самозаймається і викликає вибух балона.

Дисперсні горючі речовини (сажа, борошно) з рідким киснем утворюють вибухову речовину – оксіліквіт.

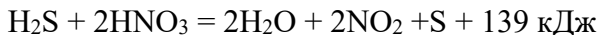
Рідкі окислювачі.

До основних рідких окислювачів відносять такі як: пероксид водню, пероксиди лужних і лужноземельних металів, кисневмісні кислоти (азотна кислота, сірчана кислота, марганцева кислота HMnO_4 ; хлорнуватиста кислота HClO_3 ; хлорна кислота HClO_4 і т.п.).

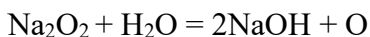
Азотна кислота - сильний окислювач, розкладаючись, виділяє кисень, тому є сильним окислювачем, здатним викликати самозаймання ряду речовин:



При зіткненні з азотною кислотою самозаймаються рослинні продукти (солома, льон, деревина) скипидар і етиловий спирт. Сірководень самозаймається при контакті з димлячою азотною кислотою зі слабим вибухом.



Пероксид водню при концентрації 65% а також пероксиди лужних і лужноземельних металів здатні викликати самозаймання багатьох горючих речовин (паперу, спиртів, тирси і ін.), що містять невелику кількість води, за рахунок окислення атомарним киснем, який виділяється при розкладанні пероксидів.



З перекисом натрію інтенсивно реагує сірчистий газ, причому він розжарюється до свічення, а реакція супроводжується розльотом іскор.

Тверді окислювачі.

До них відносяться:

- оксиди металів з високою мірою окислення, такі як оксид хрому CrO_3 ; оксид марганцю Mn_2O_7 ; оксид свинцю PbO_2 ; оксид срібла Ag_2O ;

- солі кисневмісних кислот з високим ступенем окислення; хромат калію K_2CrO_4 ; дихромат калію $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$; перманганат калію KMnO_4 ; азотнокисле срібло AgNO_3 ; сірчанокисла мідь CuSO_4 . також відносяться персульфат амоній $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$; персульфат калію $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$; аміачна селітра NH_4NO_3 , калієва селітра KNO_3 і інші речовини, що застосовуються як добрива і отрутохімікати в сільському господарстві, перекиси лужних і лужноземельних металів (Na_2O_2 і ін.).

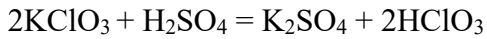
Наприклад при контакті такого сильного окислювача як перманганат калію з багатоатомними спиртами (етиленгліколь, гліцерин і т.п.) відбувається самозаймання буквально через декілька секунд після змішування.



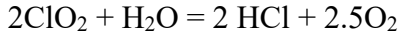
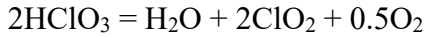
Суміші перманганату калію з твердими горючими речовинами надто небезпечні. Вони самозаймаються від дії концентрованих сірчаної і азотної кислот, а також від удару і тертя.

Сильним окислювачем є також хромовий ангідрид. При попаданні на хромовий ангідрид самозаймаються наступні рідини: метиловий, етиловий, бутиловий, ізобутиловий і ізоаміловий спирти; оцтовий, масляний і інш. альдегіди, цілий ряд ефіру, карбонові кислоти, ацетон і т.д.

Такі окислювачі, як селітри, хлорати, перхлорати, небезпечні, якщо вони знаходяться в контакт з горючими речовинами і здатні вибухати від удару і нагрівання, а також самозайматися при дії на них сірчаної або азотної кислоти. Причиною самозаймання є виділення кисню:



Хлорновата кислота не існує у вільному стані і вмиг розпадається:



ВИСНОВОК: знаючи особливості поведінки речовин і матеріалів в різних умовах, працівники пожежної охорони можуть здійснювати кваліфікований контроль умов зберігання і переробки горючих речовин, розробляти профілактичні заходи, які допоможуть запобігти пожежам внаслідок самозаймання.

§ 5. Фізичне самозаймання.

Аналіз пожеж і вибухів за останні роки на підприємствах галузі хлібопродуктів свідчить про те, що істотно виросло за останнє десятиріччя в порівнянні з попереднім число пожеж і вибухів передусім внаслідок самозаймання, а самим небезпечним видом обладнання є силоси і бункери. Аварії в них приводять до самих складних і руйнівних пожеж і вибухів. За даними державних наглядових органів в цій галузі по Україні самозаймання є причиною 25% всіх вибухів. Тільки за останні роки великі аварії, що супроводжувалися вибухами і пожежами внаслідок самозаймання рослинної сировини, сталися на елеваторах і комбикормових заводах Харківської, Сумської, Дніпропетровської, Одеської областей і республіки Крим.

Фізичним називається самозаймання, викликане самонагріванням матеріалу внаслідок тепловиділення фізичних процесів.

Характерними фізичними процесами, що приводять до самозаймання, є процес тертя та адсорбції.

Адсорбція – поглинання та утримання парів та газів на поверхні твердої речовини за рахунок міжмолекулярної взаємодії.

До фізичного самозаймання схильні лише тверді горючі матеріали з розвиненою поверхнею, серед яких найбільш характерним є вугілля.

5.1. Механізм фізичного самозаймання вугілля.

Найбільш схильне до фізичного самозаймання кам'яне і буре вугілля, а також активоване вугілля. Активоване вугілля спеціально застосовується для поглинання парів і газів в технологічних повітроочисних установках, кондиціонерах і системах життєзабезпечення деяких об'єктів.

Вугільна промисловість є однією з основних галузей промисловості України, яка забезпечує роботу практично усіх підприємств, які працюють на твердому паливі. Однак при видобутку та зберіганні вугілля проходять складні процеси, які призводять до самоокислення, самозаймання та вивітрювання. Із статистичних даних відомо, що кожна третя пожежа у вугільній промисловості відбувається внаслідок самозаймання, у результаті якого відбуваються величезні втрати пального і погіршуються якісні показники вугілля.

Первинним імпульсом, що приводить до появи самонагрівання вугілля, є тепловиділення при адсорбції парів та газів на поверхні вугілля при низьких температурах за рахунок міжмолекулярної взаємодії на поверхні. Потім починаються хімічні реакції окислення. Процес взаємодії складається

з наступних послідовних стадій: перенос реагуючого газу до поверхні, адсорбція газу, хімічна реакція на поверхні, десорбція продуктів реакції і їхній відвід від реакційної поверхні.

Кількість тепла, що виділяється в процесі адсорбції залежить, передусім, від природи парів і газів, що поглинаються, і від природи самого вугілля. Зі збільшенням кількості атомів в молекулі продукту, що поглинається, тепловиділення при його адсорбції збільшується. Чим більше адсорбційна та реакційна здатність поверхні вугілля (чим більше радикалів знаходиться на поверхні), тим активніше йде процес. Місця порушень кристалічної структури твердої речовини уловлюють мігруючі електрони, де вони локалізуються, отже зі збільшенням дефектів структури (тріщин, розривів і т.п.) активність матеріалу зростає. Кількість тепла, яка може виділитися в процесі адсорбції, може бути оцінена по формулі Трунова:

$$Q_{\text{адс}} = A T_{\text{кип}}$$

де $Q_{\text{адс}}$ - теплота адсорбції, Дж/моль;

A - константа для даного адсорбенту, (для активованого вугілля $A = 218 \cdot 10^4$ Дж/(моль К);)

$T_{\text{кип}}$ - температура кипіння речовини, що адсорбується.

Первинне самонагрівання вугілля за рахунок адсорбції повітря і парів води на поверхні вугілля носить загальний характер по всьому штабелю, однак в поверхневому шарі товщиною 30-50 см за рахунок великої інтенсивності тепловіддачі підвищення температури не відбувається. У глибині штабеля тепло, що виділяється, не встигає розсіюватися в навколишній простір, відбувається дуже повільне зростання температури до 60°C. На цьому етапі процес самонагрівання може бути припинений провітрюванням штабеля. По мірі підвищення температури самонагрівання набуває гніздового характеру, і починаючи з 60°C різко прискорюється. Тому цю температуру вугілля називають критичною.

Первинний імпульс тепловиділення за рахунок протікання фізичного екзотермічного процесу адсорбції зумовлює виникнення вже потім хімічних процесів окислення, які приведуть до подальшого самонагрівання матеріалу.

Процес окислювання органічної речовини викопного вугілля і вуглевмісних порід є надзвичайно складним, що обумовлено гетерогенністю процесу і складністю структури вугільної речовини. Мікроскопічні дослідження показують, що по краях часток вугілля, а також у тріщинах і доступних кисню порах розвивається зона окислювання. Молекули кисню проникають через пори в глибину часток вугілля. Ширина зони окислювання залежить від структури вугілля, ступеня його метаморфізму, пористості і реакційної здатності до окислювання (хімічної активності).

Адсорбований кисень починає взаємодіяти з матеріалом вугілля. Хімічне зв'язування адсорбованих компонентів з поверхнею матеріалу називається хемосорбцією. Відповідно до ланцюгової теорії окислювання органічних сполук первинними проміжними продуктами окислювання є перекисні радикали, які здатні вступати в реакцію з утворенням нових радикалів при значно меншій енергії розриву зв'язків, ніж це потрібно при прямих реакціях. Вільні радикали легше вступають у реакцію з валентно-насиченими молекулами, причому в цьому випадку вільні валентні зв'язки не зникають і один із продуктів реакції буде радикалом, здатним вступати в реакцію з насиченою молекулою.

Утворення пероксидів при окислюванні вугілля обумовлюється взаємодією кисню з активними групами. Число реакційноздатних груп зменшується з ростом метаморфізму палива. Вугілля саморозігрівається до 120-140°C.

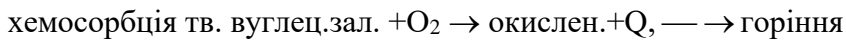
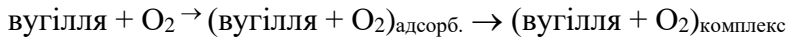
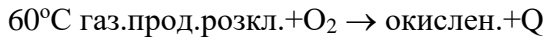
При низьких температурах комплекси "вугілля-кисень" відносно стабільні, але при підвищених температурах (більше 150°C) відбувається їх розкладання з виділенням газоподібних продуктів – окису і двоокису вуглецю і води.

При підвищенні температури в масі вугілля відбувається посилене окислення летючих сполук, які виділяються при розкладанні вугілля; що в свою чергу приводить до прискорення саморозігріву. Температура в осередку підіймається до 200-210°C.

Паралельно окисленню летючих компонентів виникає також окислення вуглецю в складі вугілля. Такі процеси приводять до додаткового самонагрівання осередку до 450°C. При такій

температурі швидкість реакцій окислення різко збільшується і процес самонагрівання переходить в самозаймання.

Таким чином, механізм самозаймання вугілля носить ступінчастий характер і може бути представлений у вигляді наступної схеми:



Маса вугілля, яка реагує з киснем, генерує тепло реакції в об'ємі, але буде мати в кожній точці об'єму різну температуру, оскільки умови тепловіддачі різні. У тій частини об'єму, де відведення тепла в довкілля найбільш ускладнено, температура матеріалу буде самою високою. Ця частина об'єму буде "гарячою точкою" або його тепловим центром. Якщо в штабелі є осередки самозаймання, то надалі відбувається поширення горіння по всьому об'єму матеріалу.

5.2. Чинники, що впливають на процес фізичного самозаймання.

Різноманітність характеру вугілля, їхніх властивостей, велике розходження в петрографічному складі створюють значні труднощі у визначенні схильності того чи іншого вугілля до самозаймання, тому при оцінці вугілля до самозаймання необхідно враховувати сукупність хімічних та фізичних властивостей вугілля, що спливають на швидкість та ступінь окислення. На швидкість самонагрівання вугілля, а отже на пожежну небезпеку вугілля впливають такі чинники:

Хімічні:

вид вугілля (ступінь метаморфізму), що обумовлює здатність матеріалу окислюватися киснем повітря при низьких температурах;

наявність сірчистих сполук у вугіллі (сірчистого і залізного колчедану),

Фізичні:

міра дисперсності (величина шматків) вугілля;

щільність укладання,

пористість вугільного матеріалу;

температуру, при якій зберігається вугілля;

вологість вугілля;

приток повітря до матеріалу, що окислюється;

адсорбційна здатність;

вміст кисню в навколишній атмосфері.

Хімічна активність вугілля відносно кисню, тобто схильність його до самозаймання, залежить від ступеня метаморфізму. У відношенні кам'яного вугілля можна відзначити, що більш молоде і багате киснем вугілля — довгополум'яне і газове — окислюється швидше, ніж вугілля з меншим вмістом кисню і великим вмістом вуглецю (пісне й антрацит), однак навіть для останніх типів вугілля при неправильному їхньому зберіганні не виключена можливість самозаймання. Різностійкість до окислювання молодого і більш зрілого вугілля може бути пояснена його різною структурою. При окислюванні кисень у першу чергу вступає у взаємодію з менш полімеризованою частиною вугільної маси. У більш зрілого вугілля процес вуглефікації пройшов значно глибше і тому на першій стадії окислювання має місце не перетворення молекули завдяки полімеризації і поліконденсації під впливом кисню, а процес прямого окислювання, тобто зміни елементного складу.

Крім того, найбільш схильне до самозаймання вугілля, що містить в своєму складі велику кількість летючих сполук. З збільшенням вмісту летючих компонентів збільшується кількість тепла, що утворюється при окисленні газоподібних продуктів розкладання, а, отже, температура самонагрівання вугілля знижується. При вмісті летючих більше за 12% температура самонагрівання вугілля знижується до 130°C. Ця температура прийнята як граничний показник при класифікації вугілля по схильності до самозаймання.

Відповідно до прийнятої класифікації вугілля поділяється на:

- клас А – небезпечне, що містить летючих компонентів більше за 12%, температура самонагрівання менше за 130°C;

- клас Б – стійке, вміст летючих менше за 12%, температура самонагрівання більше за 130°C.

До небезпечного вугілля класу А відносять таке вугілля як буре, молоде кам'яне (газове і полум'яне). До стійкого вугілля відносять коксове, жирне, пісне вугілля і антрацит. Так у антрациту вміст летючих сполук не перевищує 3-5%, а температура самонагрівання більше за 160°C.

Пожежну небезпеку вугілля можна охарактеризувати більш докладно:

1 група – стійке, не схильне до самозаймання (з температурою самонагрівання вище 170°C): антрацит донецький, пісне вугілля марки Т.

2 група - середньої стійкості (з температурою самонагрівання від 150 до 170°C): антрацити деяких сортів, донецьке та кузнецьке вугілля марки ОС, Ж, Д, Г.

3 група - нестійке (з температурою самонагрівання нижче 150°C): вугілля марки Д; артемівське і підмосковне буре вугілля.

4 група - схильне до самозаймання (з температурою самонагрівання нижче 120°C): буре вугілля України.

5 група - особливо схильне до самозаймання (з температурою самонагрівання нижче 100°C): буре вугілля.

Основне значення для виникнення осередків самозаймання мають потоки повітря всередині штабеля. Потік повітря в скупчення матеріалу, що окислюється, впливає на дві стадії теплового балансу: на генерацію тепла, внаслідок того, що він збільшує концентрацію кисню, і на винесення тепла вихідним повітрям. При збільшенні швидкості повітря від нуля концентрація кисню в копиченні матеріалу спочатку збільшується швидко. Внаслідок цього генерація тепла прискорюється більше, ніж винесення тепла повітрям. Але коли різниця концентрації кисню в копиченні і у вхідному повітрі стане невеликою, подальше збільшення швидкості повітря приведе тільки до збільшення тепловіддачу.

Виникнення цих потоків зумовлене різницею температур в штабелі і навколишньому повітрі, а також під впливом вітру. Вплив вітру виявляється в тому, що осередки самозаймання виникають переважно з навітряної сторони на висоті 0,5-1 м від основи і на глибині 0,5 м від поверхні. У випадку, коли штабель неоднорідний по щільності і розмірам шматків, осередки самозаймання зароджуються в більш рихлих місцях.

Відведення тепла від осередків самонагрівання зумовлене не тільки рушенням повітряних потоків, але і розмірами штабеля.

З збільшенням пористості шару в ньому зростає частка повітря, поліпшується транспортування його в зону реакції, меншають теплоємність і теплопровідність. Це сприяє більш інтенсивному самонагріванню, так як відведення тепла із зони реакції ускладнено (через малу теплопровідність повітря), а мала теплоємність сприяє швидкому нагріванню, навіть при слабому тепловиділенні.

З збільшенням щільності знижується небезпека самонагрівання і самозаймання дисперсних горючих речовин, так як зменшується проникність матеріалу для повітря. До того ж збільшуються теплопровідність і теплоємність шару, тобто тепло "гарячої точки" буде інтенсивніше розсіюватися в об'ємі на нагрівання сусідніх шарів матеріалу. Тому критичні умови самозаймання створюються при більш високій температурі навколишнього середовища.

Зі збільшенням дисперсності часток самозаймання виникає легше, оскільки різко збільшується площа контакту матеріалу з окислювачем і, отже, зростає інтенсивність тепловиділення і явище самозаймання виникає при більш низьких температурах навколишнього середовища. При збереженні вугілля відбувається його подрібнення у результаті розпаду великих шматків. Зміна складу за дисперсністю вугілля у процесі зберігання має велике практичне значення, тому що розпад великих шматків на більш дрібні сприяє розкриттю нових не окислених поверхонь, що несприятливо впливає на стійкість вугілля при подальшому його зберіганні.

У присутності невеликої кількості вологи самонагрівання кам'яного вугілля прискорюється, оскільки при адсорбції вологи вугіллям виділяється тепло. Крім того, присутність вологи значно прискорює процес окислювання вугілля. Так, експериментальні досліді з одним і тим же вугіллям при 30°C показали, що 100 г сухого вугілля за 95 годин поглинули 260 - 270 см³ кисню, тим часом як при вмісті 7% вологи поглинання кисню досягло 400 - 440 см³. Однак, підвищений вміст вологи у вугіллі може затримати самозаймання, тому що із збільшенням ступеню вогкості зростає витрата тепла на випаровування вологи, що сповільнює самонагрівання матеріалу. Для підйому температури вище 100°C насамперед повинна випаруватися волога при цьому випаровування 10% вологи може забрати всю кількість тепла, що виділяється при поглинанні кисню.

Важливою властивістю кам'яного вугілля є адсорбційна здатність. Причини самозаймання вугілля полягають у тім, що повітря, проникаючи усередину штабеля, викликає процес окислювання вугілля. Взаємодія кисню з вугіллям йде за рахунок його адсорбції. Адсорбційні властивості вугілля залежать від його структури і різні для різних сортів вугілля. Адсорбційна здатність вугілля зменшується з ростом метаморфізму вугілля, і при цьому зменшується його здатність до хімічних перетворень і адсорбції. Більш молоде вугілля, таке, як буре, має найбільш пористу будову і тому має найбільшу адсорбційну здатність, що приводить до найбільш легкого самозаймання.

Самозаймання кам'яного вугілля більш активно протікає при позитивній температурі навколишнього середовища. Вугілля, закладене у штабель у літню пору, окисляється значно швидше, ніж закладене у зимовий час. При підвищенні температури навколишнього середовища процес окислювання прискорюється. Однак не слід вважати, що при низьких температурах окислювання не відбувається. Підвищення температури навколишнього середовища лише підсилює процес, що почався з моменту контакту вугілля з повітрям при будь-якій температурі.

5.3. Заходи профілактики самозаймання вугілля.

Самозаймання вугілля можна розглядати як сукупність трьох процесів, які протікають одночасно:

термохімічна реакція між вугіллям і киснем повітря;
тепловиділення і перенос тепла;
газодинаміка в пористому середовищі.

Для того щоб не допустити виникнення процесу самозаймання необхідно домогтися зменшення інтенсивності тепловиділення і збільшення інтенсивності тепловіддачі від системи в навколишнє середовище. Профілактика пожеж заснована на придушенні й усуненні фізичних умов самозаймання. Для цього потрібно зменшити хімічну активність вугілля, перешкодити накопиченню тепла і припливу повітря.

Оскільки тепловиділення відбувається за рахунок протікання процесів адсорбції і окислення вугілля і для початку самонагрівання достатньо дуже слабкого притоку повітря, то для того щоб перешкодити тепловиділенню необхідно забезпечити повну ізоляцію матеріалу, чого неможливо досягти в промислових умовах. Однак навіть не дуже хороша ізоляція перешкоджає переходу самонагрівання в самозаймання. Тому основними заходами, перешкоджаючими самонагріванню і самозайманню вугілля є:

1) пошарове укладання вугілля в штабель шарами по 0,5 - 0,6 м з ущільненням кожного шару, що дозволяє значно зменшити кількість пустот в штабелі і ускладнює проникнення в нього повітря, перешкоджає проникненню в штабель атмосферних осадків, які сприяють самозайманню вугілля;

Ущільнення має ряд істотних недоліків. Застосування укочення вимагає закладення дуже великих штабелів, що дорого і порівняно неефективно. Його недоцільно застосовувати для вугілля, що підлягає збагаченню. При ущільненні вміст дрібного вугілля збільшується приблизно на 10%, що небажано при збагаченні.

2) обмащення матеріалу відходами нафтопереробної або коксохімічної промисловості, що приводить до ізоляції поверхні вугільних часток;

3) майданчик під штабель повинен мати м'який ґрунт, оскільки на твердому настилі (асфальт, дошки і інші.) повітря легко проникає в штабель.

Перелічені заходи в декілька разів знижують проникнення повітря в скупчення кам'яного вугілля, що приводить до зниження швидкості окислення і тепловиділення. Крім того знизити хімічну активність вугілля можна застосуванням антипірогенів і дезактивацією вугілля повільним окислюванням.

Запобігти підвищенню температури в штабелі можна також шляхом забезпечення посиленої тепловіддачі від маси вугілля за рахунок:

обмеження висоти штабеля (збільшення відношення S/V).

Для зберігання вугілля велике значення мають розміри штабеля, особливо його ширина. Висота штабеля визначається застосовуваними механізмами. Однак укласти високі і вузькі штабелі недоцільно. Повітря здатне проникнути усередину штабеля на глибину 1 – 1,5 м від поверхні. Чим крупніше вугілля, тим більше глибокий шар стикається із зовнішнім повітрям. Тому штабель повинний бути досить широким, щоб зовнішній шар складав невелику частку стосовно всієї маси вугілля, закладеного в штабель. Ширина штабелів повинна бути не більш 3-кратної висоти. Однак ширина верхньої основи штабеля не повинна бути менш 6 – 8 м, щоб не створювати труднощів у процесі ущільнення вугілля.

примусового вентиляювання штабеля;

закладення штабелю на мерзлий ґрунт (практикується в зимовий час)

За сучасною технологією зберігання твердого палива попередження самозаймання кам'яного вугілля здійснюється за допомогою механічного ущільнення, закладання на зберігання у більш зручний час(зимовий).

Останнім часом для попередження самозаймання вугілля усе більш широке поширення одержали методи з використанням різних речовин, названих антипірогенами. Вони активно гальмують процеси окислювання і самозаймання вугілля. Їх застосовують для придушення вогнищ самонагрівання і самозаймання.

§ 6. Мікробіологічне самозаймання.

За останні 20 років на підприємствах хлібопродуктової і комбікормової промисловості країн СНД зареєстроване 195 вибухів, при цьому загинуло 144 і травмовано 416 чоловік.

У таблиці представлені дані, що характеризують розподіл вибухів по типах підприємств

тип підприємства	число вибухів	%
Елеватори	50	25.5
Комбікормові заводи	73	37.5
Борошномельні заводи	33	17.0
Склади комбікормової сировини	31	16.0
Хлібокомбінати і інші підприємства	8	4.0
УСЬОГО	195	100

Найбільше число вибухів сталося на елеваторах і комбікормових заводах. Аналіз причин аварій на підприємствах по зберіганню і переробці зерна показує, що найбільше число вибухів викликана несправностями або порушенням правил експлуатації виробничого обладнання (27,7%), самозайманням рослинної сировини (22,5%), вогневими роботами з порушенням правил виконання цих робіт (20%).

6.1. Механізм мікробіологічного самозаймання рослинної сировини.

До числа речовин, схильних до самозаймання під впливом мікробіологічного імпульсу, відносяться продукти рослинного походження, такі як сіно, солома, солод, бавовна-сирець, зерно і продукти його переробки, а також торф.

Первинним імпульсом саморозігріву рослинних продуктів є тепловиділення при життєдіяльності рослинних клітин і мікроорганізмів, які розвиваються у вологому середовищі органічного матеріалу. Таке самозаймання носить назву мікробіологічне самозаймання.

Процес самозаймання можна розділити на два основні етапи: самонагрівання та, власне, самозаймання і горіння. Перший етап характеризується порівняно плавною зміною параметрів (температури, газового складу атмосфери та інш.) і протікає протягом значного проміжку часу. Початку ж другого етапу властивий високий динамізм фізичних та хімічних процесів і стрімлива зміна параметрів. Зростання температури рослинної сировини в процесі самонагрівання обумовлено накопиченням тепла в умовах, сприяючих хорошій теплоізоляції (велика маса продуктів і низька теплопровідність рослинної сировини).

Утворення тепла відбувається послідовно в результаті: а) життєдіяльності рослинних клітин (тепло ферментації); б) життєдіяльності мікроорганізмів (теповиділення при низькотемпературному окисленні в процесі дихання); в) поглинання пористими продуктами розкладання рослинного матеріалу парів та газів із газового середовища (тепло адсорбції); г) реакцій окислення.

Фізичною основою самонагрівання є низька теплопровідність рослинної сировини, внаслідок чого навіть при виникненні в останній джерел тепла малої потужності інтенсивність тепловиділення перевищує інтенсивність тепловіддачі (розсіювання тепла) в навколишнє середовище. Іншими словами, створюються умови для розвитку процесу.

Фізіологічною основою процесу самонагрівання є поведінка РС як складної біологічної системи з властивим їй обміном речовин та енергії: дихання усіх живих компонентів, ферментативна активність клітин, яка підвищується при збільшенні вологості РС.

Для кожної рослинної сировини існує своя критична вологість, яка характеризує можливість активного розвитку мікроорганізмів, життєдіяльність яких є основною причиною самонагрівання.

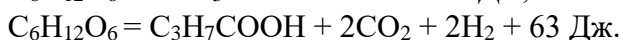
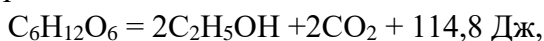
Рослинні клітини є біополімерами білків, нуклеїнових кислот, поліцукридів. Оболонка рослинної клітини складається з клітковини - целюлози $(C_6H_{10}O_5)_n$ – поліцукрида, який при вологості більше 14% для зернових культур і від 6 до 8% для олійних культур гідролізується до глюкози $C_6H_{12}O_6$.

Біологічне окислювання у клітинах рослин відбувається частіше всього шляхом дегідрогенізації. Перенос водню (електрона) від окисника до акцептора здійснюється різними окислювальними ферментами. В залежності від кінцевого акцептора водню, окислювання (дихання) може бути аеробним або анаеробним.

При аеробному процесі окислення РС здійснюється молекулярним киснем повітря з утворенням кінцевих продуктів (води та діоксиду вуглецю):



При анаеробному процесі дихання (бродиння) окислення відбувається без витрачання кисню повітря:



Вивільнена у процесі дихання енергія не може бути безпосередньо використана клітиною. Частина енергії переводиться у доступну для клітини форму, а інша, більш значна, акумулюється у виді теплової енергії маси РС.

Отже процес мікробіологічного самонагрівання можна умовно розділити на декілька етапів:

Перший етап - зростання температури внаслідок тепловиділення при диханні рослинної сировини і життєдіяльності мікроорганізмів і грибків. Температура підіймається до 60-70°C. При цій температурі мікроорганізми гинуть або залишають рослинну сировину, але вже починають розкладатися пектинові, білкові та інші органічні сполуки з утворенням газоподібних продуктів розкладання і твердого пористого вуглецевого залишку.

Проте не всяке підвищення температури у масиві РС слід розглядати як початок процесу самонагрівання, який призводить до займання. Експериментально встановлено, що утворення у РС колонії кліщів може призвести до локального підвищення температури до 35 – 40 °С, при цих температурах вони утрачають свою фізіологічну активність, залишають зону нагріву або гинуть. Якщо інші джерела тепла відсутні, зростання температури припиняється, незважаючи на те, що область нагріву може збільшуватися.

Другий етап - фізична і хімічна адсорбція парів і повітря на поверхні пористого вугілля, що утворилося в процесі розкладання. Процес протікає з виділенням тепла і температура в масі продуктів підіймається до 100-130°C. При цій температурі відбувається розклад нових сполук з утворенням газоподібних продуктів розкладу та нових порцій пористого вугілля. У процесі піролізу рослинної сировини вже починається виділення горючих газів: оксиду вуглецю, метану, водню та інших.

Третій етап. Підвищення температури в об'ємі сприяє прискоренню екзотермічних реакцій, тобто виникає повторний процес самонагрівання за рахунок протікання реакцій окислення, які можуть привести до самозаймання. Починається окислення газоподібних вуглеводнів, що виділилися, внаслідок чого температура підіймається до 180-200°C.

Четвертий етап - окислення твердого вуглецевого залишку, що утворився (ненасичені вуглеводні і клітковина). При наявності розвиненої поверхні окислення і доступу повітря утворюються осередки тління - гетерогенного горіння матеріалу.

Самозайманню сприяє розвинена поверхня матеріалу і його легка займистість. На швидкість самонагрівання при мікробіологічному самозайманні впливають:

- вид матеріалу, що зберігається;
- вологість матеріалу;
- доступ повітря;
- умови акумуляції тепла;
- температура навколишнього середовища.

При виникненні самозаймання вигляд зовнішньої частини скупчення матеріалу не зазнає значних змін. У внутрішній же частині відбувається обвуглювання і тління. Оскільки тління органічних матеріалів виникає на обвугленій поверхні, можна сказати, що проміжним продуктом розкладання цих матеріалів, сприяючим їх самозайманню, є вугілля, що активно окислюється і при кімнатній температурі. Цією властивістю вугілля пояснюється можливість самозаймання матеріалу і після припинення дії первинного імпульсу самонагрівання.

6.2. Пожежна небезпека торфу і заходи профілактики його самозаймання.

За ступенем пожежної небезпеки торф поділяють на 3 категорії:

1) А - безпечний. Характеризується відсутністю або рідкою появою осередків самонагрівання протягом перших 3-4 місяців зберігання. Зростання температури в товщі матеріалу становить 0,5°C/добу. $T_{сн.}$ більше за 60°C.

2) Б - середньонебезпечний, наявність 2-3 осередків протягом 3-4 місяців зберігання. Зростання температури 0,5-1,5°C/добу. $T_{сн.}$ = 50 °С.

3) В - небезпечний. Характеризується масовим розвитком осередків самозаймання. Зростання температури 1,5-4,5°C/добу. $T_{сн.}$ менше 40°C.

Найбільш небезпечним є фрезерний торф.

Для профілактики самозаймання торфу необхідно проводити першочергове вивантаження торфу, що самонагрівається, або ізолювати каравани сировою торфокрихтою, вогкістю не менше за 65% для припинення надходження повітря.

Торфовий пил також здібний до самозаймання, але його причиною є тільки процеси окислення.

ВИСНОВОК: Процес самозаймання є однією з можливих причин виникнення процесу горіння при зберіганні і переробці матеріалів, схильному до самозаймання. Знання цих причин дозволить Вам розробляти ефективні заходи профілактики самозаймання.

Здатність схильних до самозаймання матеріалів поширювати тління всередині своєї маси і поглинати продукти горіння створює особливу небезпеку виникнення пожежі від самозаймання. Небезпека полягає в тому, що не завжди можна своєчасно встановити початок пожежі. У найбільшій мірі вказані властивості характерні горючим волокнистим і дисперсним матеріалам.

Глава 4. Вимушене запалювання горючих систем.

Аналіз статистичних даних говорить про те, що на практиці найбільш частим шляхом виникнення процесів горіння є не самоспалахування або самозаймання, а вимушене запалення (запалювання) горючих сумішей, речовин і матеріалів. У якості джерела запалювання можуть бути відкрите полум'я, технологічне обладнання, що нагрівається при експлуатації, іскри з топок, фрикційні іскри двигунів, різні прояви електричної енергії, наприклад коротке замикання. Далі буде розглянуто в яких випадках ці теплові імпульси здатні ініціювати горіння.

§ 1. Поняття і особливості процесу запалювання.

Вимушеним запалюванням називається процес виникнення горіння внаслідок дії джерела запалення на невелику частку горючої системи, при цьому основна маса горючої системи залишається холодною.

Джерелом запалювання називається тіло, що горить, або розжарене тіло, а також електричний розряд, які мають енергію і температуру, достатні для виникнення горіння інших речовин.

В залежності від виду зовнішнього теплового імпульсу розрізняють наступні види джерел запалювання:

- теплові прояви хімічної енергії;
- теплові прояви електричної енергії;
- теплові прояви механічної енергії;
- відкрите полум'я, розжарені продукти горіння або нагріте ними тіло.

Принципово вимушене запалювання не відрізняється по своїй фізичній суті від самоспалахування, оскільки умови появи горіння залишаються однаковими: згідно з теорією теплового вибуху це перевищення швидкості тепловиділення екзотермічної реакції окислення над швидкістю тепловіддачі від системи, або згідно з теорією ланцюгових реакцій перевищення швидкості утворення активних центрів над швидкістю їх загибелі. Виконання цих умов означає, що внаслідок підвищення температури системи вище певного критичного значення станеться різке самоприскорення екзотермічної реакції взаємодії горючої речовини і окислювача, що приводить до появи горіння.

Однак запалювання має і відмінності від самоспалахування, які полягають в наступному:

1. При самоспалахуванні вся суміш розігрівається рівномірно і її температура поступово підіймається до температури самоспалахування. Внаслідок цього реакція окислення виникає в усьому об'ємі відразу, з цієї причини процес переходу реакції окислення в полум'яне горіння може виникнути в будь-якій точці суміші або по всій суміші одночасно. При вимушеному запаленні процес нагріву горючої суміші до критичної температури відбувається локально, тобто в невеликому об'ємі, що примикає до джерела запалювання. Вся інша маса реакційноздатної суміші

залишається відносно холодною. Полум'я ж поширюється із зони виникнення горіння на всю іншу суміш з певною швидкістю.

2. При самоспалахуванні критичною температурою, до якої розігрівається горюча суміш, є температура самоспалахування t_{cc} , а при вимушеному запаленні критичною температурою, до якої розігрівається локальний об'єм горючої суміші, є температури запалення $t_{зап}$.

3. При самоспалахуванні тепловіддача з точки ініціації горіння у бік всієї іншої горючої суміші мінімальний через мінімальний перепад температур, а основний перепад температур існує на межі "горюча суміш - навколишнє середовище". Отже, тепловтрати визначаються тільки конвекційною тепловіддачею від системи в навколишнє середовище. При запалюванні нагрів здійснюється тільки у невеликій частині об'єму, а решта горюча суміш залишається холодною, тому система характеризується значною інтенсивністю тепловідводу у початкову суміш. У цьому випадку тепловіддача буде визначатися переважно теплопровідністю, тобто $q(-) = -\lambda d^2T/dx^2$.

4. При запалюванні нагрівається малий об'єм горючої суміші, а вихідна система залишається холодною, внаслідок цього інтенсивність тепловіддачі при запаленні значно більша, ніж при СС.

5. Температура запалення горючої суміші більша ніж її температура самоспалахування. Це пояснюється тим, що для перевищення тепловиділення $q(+) = V_{гс}Q_{н}W_{хр}(T)$ над тепловіддачею $q(-)$ необхідно, щоб швидкість хімічної реакції окислення була значною. Для цього потрібно насамперед збільшити температуру, до якої нагрівається частка холодної горючої суміші.

6. При самоспалахуванні процес самонагрівання відбувається повільніше, ніж при запалюванні, тобто період індукції відносно великий. При запалюванні потрібно швидко підвести значну кількість тепла до частки горючої суміші, для того щоб вона не встигла охолонути і розігрілася до температури запалення. Отже процес виникнення горіння при вимушеному запаленні відбувається значно швидше, оскільки розігрівання суміші від зовнішнього джерела тепла проводиться значно інтенсивніше і до більш високої температури. Період індукції при цьому є найменшим.

7. Через високу інтенсивність тепловідводу при запалюванні температура зони горіння, що виникає внаслідок дії джерела запалювання, буде нижчою, ніж при самоспалахуванні.

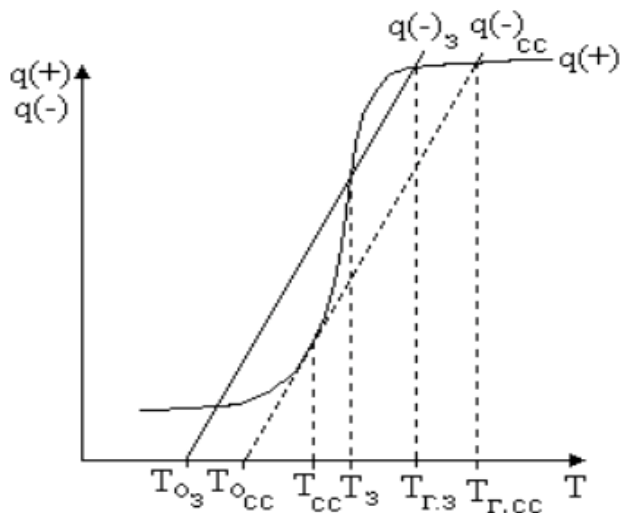
8. При самоспалахуванні горіння, яке виникає, є гомогенним кінетичним, а при вимушеному запалюванні може виникати як полум'яне горіння, так і гетерогенне дифузійне (тління) при впливі джерела запалювання на деякі тверді горючі матеріали.

9. При самоспалахуванні тепловим імпульсом був зовнішній нагрів всієї системи через стінки судини. При вимушеному ж запалюванні зовнішнім джерелом тепла можуть бути відкрите полум'я, розігріте стороннє тіло, різні прояви електричної енергії, раптове адіабатичне стиснення.

Енергетичний баланс, що характеризує критичний стан системи при вимушеному запалюванні, виражається рівністю між тепловиділенням в тій частині горючої системи, на яку діє джерело запалення, і тепловіддачею від цієї частини системи у навколишню холодну горючу суміш.

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

$$V_{гс}Q_{н}W_{хр}(T) = -\lambda d^2T/dx^2$$



де λ - коефіцієнт теплопровідності газової суміші.

Графічно критичну умову запалювання системи можна відобразити в наступному вигляді:

Практично зручним критерієм наявності або відсутності запалювання є факт поширення полум'я від місця дії джерела запалювання на весь об'єм системи. Тому чинники, що визначають критичні

умови у разі запалювання, пов'язані, з одного боку, з властивостями самого джерела і, з іншого – з умовами поширення полум'я в газовій суміші, які, в свою чергу, визначаються видом горючої суміші та її фізичними параметрами.

Розглянемо механізм запалення горючих сумішей деякими джерелами запалювання.

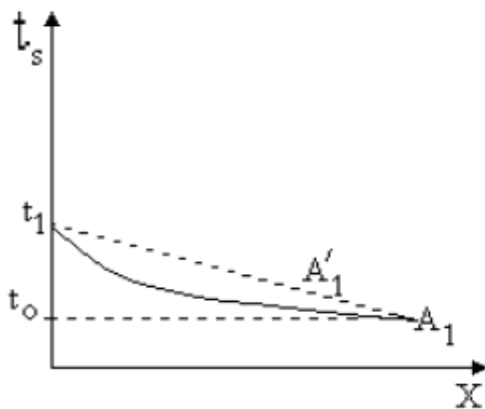
§ 2. Запалення від нагрітої поверхні.

Обладнання, яке використовується у вибухонебезпечних приміщеннях і нагрівається при експлуатації, здатно стати джерелом запалювання. Горіння може виникнути по механізму самоспалахування всередині нагрітого реактора, однак набагато частіше можливо ініціювання горіння внаслідок підпалення при контакті холодного в більшій частині газу з нагрітою поверхнею. Умови виникнення прогресивного саморозігріву в останньому випадку істотно інші.

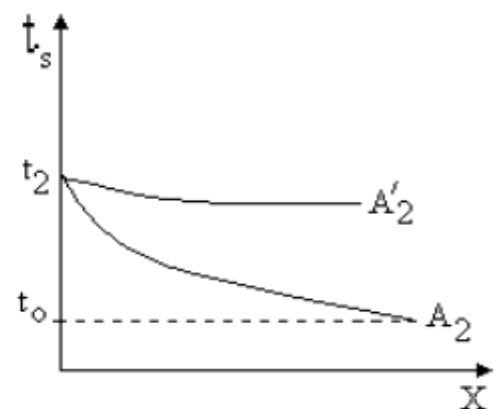
§ 2.1. Стаціонарна теплова теорія запалювання. Критичні умови запалювання.

Для того щоб уявити собі механізм запалювання від розжареного тіла, розглянемо систему “холодний газ - нагріта стінка”. Не будемо враховувати при цьому дифузію реагуючих речовин, вважаючи, що концентрація їх скрізь однакова і дорівнює початковій. Прийmemo, що газ і нагріте тіло не рухаються.

Розглянемо стаціонарний розподіл температури в газовому середовищі з початковою температурою T_0 поблизу стінки вздовж нормальної до площини координати x .



а)

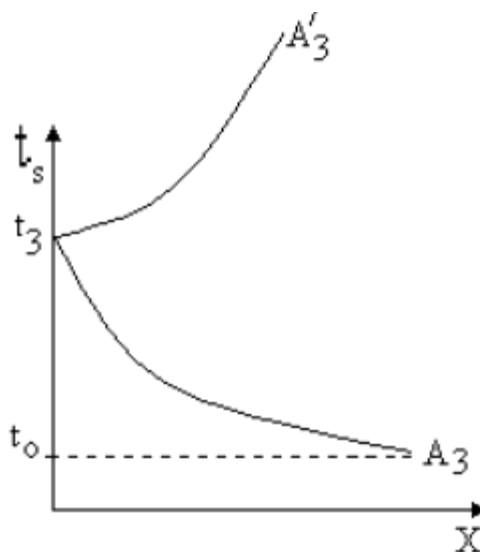


б)

Припустимо, що поверхня тіла має декілька підвищену в порівнянні з газом температуру T_1 . Деякий пристінний шар газу також розігрівається, але внаслідок інтенсивного тепловідводу температура газу швидко знижується від T_1 до T_0 . У інертному, не здібному до реакції середовищі розподіл температури зобразиться кривою T_1A_1 (рис. а). Якщо ж середовище є реакційноздатним, то при підвищенні температури в шарі горючої суміші, прилеглої до нагрітої поверхні тіла, почнуть протікати реакції окислення, що йдуть з виділенням тепла. Теплота реакції може відводитися із зони, що примикає к нагрітій поверхні, в нескінченний простір, заповнений вибуховим середовищем з температурою T_0 . Внаслідок додаткового тепловиділення розподіл температури можна зобразити у вигляді кривої $T_1A'_1$.

Підвищимо температуру тіла до T_2 (рис. б). У інертному середовищі при цьому розподіл температури буде подібний, але з більш різким спадом (крива T_2A_2). У вибуховому середовищі із збільшенням температури збільшуються і швидкість реакції окислення і, отже, виділення тепла. При цьому реакція біля поверхні настільки інтенсивна, що тепловиділення компенсує тепловіддачу в холодну суміш. Внаслідок цього додаткового тепловиділення в деякому пристінному шарі

горючої суміші температура не зменшиться, а залишиться рівною T_2 (крива $T_2A'_2$). Тепловіддача від стінки до газу припиняється.



В)

Якщо ще підвищити температуру стінки до T_3 (рис. в), то стаціонарний стан в горючій системі буде неможливий. Суміш в пристінному шарі почне реагувати з такою швидкістю, що внаслідок інтенсивного тепловиділення температура суміші підніметься вище за температуру поверхні T_3 і знак градієнта температури поміняє знак. Нагріта поверхня з "постачальника" енергії перетвориться на поверхню, яка сприймає тепловиділення горючої суміші. З цього моменту вона бере участь в процесі запалення тільки як теплоізолююча поверхня.

Теплота реакції почне відводитися із зони, що примикає до нагрітої поверхні, в навколишній простір, заповнений вибуховим середовищем. Температура в газовому середовищі буде прогресивно зростати доки не станеться запалення (крива $T_3A'_3$).

Таким чином при температурі стінки нагрітого тіла T_s , рівній T_2 , виконується критична умова запалювання, а температура є критичною граничною температурою, тобто температурою запалювання, і по своєму значенню аналогічна температурі самоспалахування у разі процесів самоспалахування.

Потрібно звернути увагу на те, що при запалюванні розжареним тілом температура поверхні тіла значно вище, ніж температура самоспалахування даної горючої суміші через наявність тепловідводу від гарячої стінки в холодний горючий газ.

З моменту, коли температура газу стане рівною $T_{зап}$ джерело більш не бере участь в процесі виникнення горіння, і тепер визначальними стають умови в шарі газу, який знаходиться в контакті з нагрітим тілом.

Основні закономірності запалювання у відсутності каталітичної реакції на стінці сформульовані Я. Б. Зельдовичем.

Розглянемо нескінчену поверхню, що нагріта до температури T_s і контактує з реакційноздатною нерухомою газовою сумішшю.

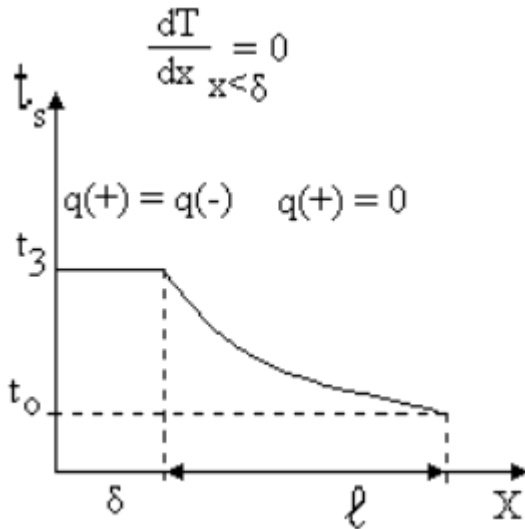
По мірі віддалення від гарячої стінки температура газової суміші падає, а оскільки швидкість хімічної реакції окислення різко залежить від температури

$$w_{хим.р.}(T) = k \varphi_{ок} \varphi_{гр} e^{-E_{акт}/RT},$$

то відбувається і швидке падіння тепловиділення. Тому, якщо швидкість хімічних реакцій була відчутною при T_s , то при віддаленні від стінки вона знизиться. Отже інтенсивна реакція з виділенням достатньої кількості тепла буде йти тільки у вузькому шарі газу δ , прилеглому до гарячої стінки. Виникнення горіння (перехід до запалювання) визначається моментом, коли

градієнт температури dT/dx в пристінному шарі товщиною δ стає більше нуля. Таким чином критичною умовою стаціонарного теплового запалення є:

$$(dT/dx)_{x=\delta} = 0$$



В пристінному шарі охолодження газу за рахунок теплопровідності компенсується тепловиділенням, що супроводжує реакцію окислення в горючій суміші. Вважаючи концентрацію компонентів горючої суміші постійною і не розглядаючи процесів дифузії молекул, розподіл температури і хід реакції в зоні δ описується рівнянням теплового балансу:

$$Q_{\text{н}} w_{\text{xp}}(T) = -\lambda d^2T/dx^2 \quad (1)$$

де $Q_{\text{н}}$ - тепловий ефект хімічної реакції в пристінному шарі.

Якщо проінтегрувати це рівняння враховуючи залежність швидкості реакції від температури, можна отримати вираження dT/dx :

$$dT/dx = \sqrt{\frac{2Q_{\text{н}} w_{\text{xp}} RT_s^2}{E_{\text{акт}} \lambda}} \quad (2)$$

Тепловий потік із зони реакцій в сусідній шар суміші визначається теплопровідністю і може бути зображеним у вигляді:

$$q_1 = \lambda dT/dx$$

На підставі цього з урахуванням (2) тепловий потік із зони реакцій в сусідній шар суміші дорівнює:

$$q_1 = \sqrt{\frac{2\lambda Q_{\text{н}} w_{\text{xp}} RT_s^2}{E_{\text{акт}}}}$$

При $x > \delta$ вплив тепловиділення реакції окислення незначний, і тому температура починає зменшуватися за рахунок тепловіддачі. Градієнт температури між нагрітою поверхнею і холодною сумішшю не буде відрізнятися від градієнту в інертному середовищі. Якщо прийняти, що l – це відстань, на якій температура газової суміші змінюється від T_s до T_0 , а розміри δ значно менші, ніж l , то градієнт температури при $x > \delta$ можна виразити так

$$(dT/dx)_{x > \delta} = (T_s - T_0)/l$$

При цьому потік тепла в холодну суміш буде дорівнювати:

$$q_2 = \lambda dT/dx = \lambda (T_s - T_0)/l$$

Це тепло береться із зони δ і дорівнює при критичних умовах загальному теплу, що виділяється в цій зоні за рахунок реакції.

Оскільки при критичних умовах ці теплові потоки рівні, то прирівнюючи їх можна встановити взаємозв'язок геометричних розмірів системи, температури нагрітого тіла і фізико-хімічних параметрів середовища при його запаленні.

$$\lambda(T_s - T_0)/l = (2\lambda Q_{\text{н}} w_{\text{хим.р.}}(T)RT_s^2/E_{\text{акт}})^{1/2}$$

$$l = \sqrt{\frac{E_{\text{акт}} \lambda (T_s - T_0)^2}{2Q_{\text{н}} w_{\text{xp}} RT_s^2}}$$

Якщо як джерело запалювання в горючу газоповітряну суміш вноситься нагріте до високої температури тверде тіло кінцевих розмірів, то картина процесу запалювання буде аналогічна розглянутій. Градієнт температури при тепловіддачі буде залежити від характерного розміру цього тіла.

У випадку запалювання газу розжареною металевою кулею або краплею розплавленого металу з радіусом r потік тепла із зони реакції товщиною δ складає:

$$Q_2 = 4\pi (r + \delta)^2 \lambda (2 Q_{\text{н}} w_{\text{хим.р.}}(T)RT_s^2/E_{\text{акт}\lambda})^{1/2}$$

А потік тепла до холодного шару газу

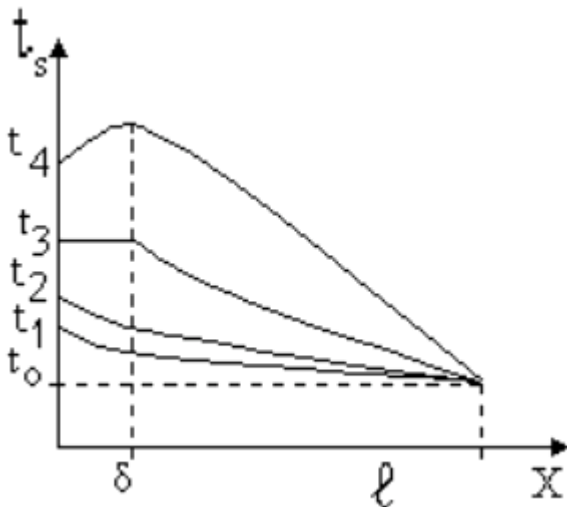
$$Q_1 = 4\pi (r + \delta) \lambda (T_s - T_0)$$

При умові $\delta \ll r$ можна отримати:

$$r = \sqrt{\frac{E_{\text{акт}} \lambda (T_s - T_0)^2}{2Q_{\text{н}} w_{\text{xp}} RT_s^2}}$$

Таким чином можна отримати зв'язок між властивостями горючої суміші, температурою нагрітого тіла і розмірами цього тіла.

Потрібно зазначити, що розглянута нами стаціонарна теплова теорія запалювання не враховує витрату горючих компонентів в пристінному шарі. У реальних умовах така витрата немінуча і концентрація пального в реагуючому шарі буде поступово падати. По мірі зниження концентрації реагентів меншає швидкість реакції окислення і, отже, інтенсивність тепловиділення в реагуючому прикордонному шарі.



Тому для виникнення горіння буде потрібна ще більш висока температура нагрітої стінки, щоб за рахунок реакції окислення при більш високих температурах компенсувати зниження швидкості хімічної реакції, яке зумовлено витратою горючих компонентів суміші.

2.2. Чинники, що впливають на процес запалювання.

Розмір і термодинамічні параметри зони розігрівання горючої газової суміші (товщина шару суміші, її температура, швидкість прогрівання і інші) будуть залежати від розмірів, форми і температур запалюючого тіла, кількості запасеного тепла (запасу енергії) джерела запалювання і інших чинників.

Температура запалення (температура нагрітого тіла) повинна забезпечити необхідний початковий запас тепла в прогрітому шарі горючого газу.

На $T_{зап}$ впливають фактори, які характеризують:

- 1) вид горючої речовини,
- 2) склад горючої суміші,
- 3) умови, в яких знаходиться горюча суміш,
- 4) властивості самого джерела запалення (нагрітого тіла).

Вид горючої речовини

- теплотворна здатність Q_H : $Q_H \uparrow q(+)$ $T_{зап} \downarrow$
- температура самоспалахування: $T_{cc} \downarrow T_{зап} \downarrow$
- агрегатний стан:

найменша $T_{зап}$ у горючих газів,
найбільша - у твердих горючих матеріалів.

Склад горючої суміші

- концентрація кисню в окислювальному середовищі

$\varphi_{O_2} \quad W_{xp} \quad q(+)$ $T_{зап} \downarrow$

- концентрація негорючих газів

$\varphi_{нг} \quad W_{xp} \downarrow q(+)$ $\downarrow T_{зап}$

- концентрація горючої речовини

$\varphi_{нг} = \varphi_{стм} \quad T_{зап} = \min$

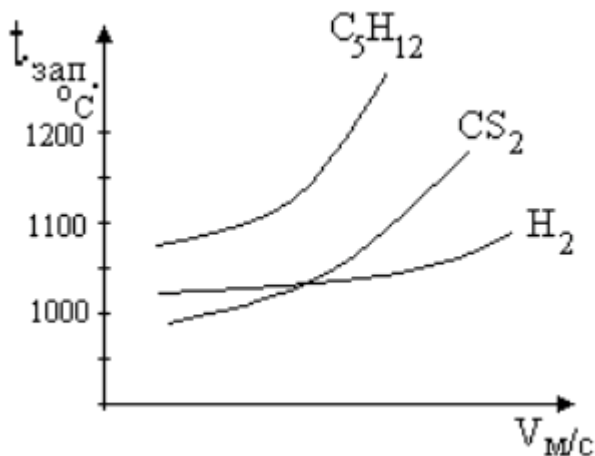
Умови, в яких знаходиться горюча суміш

- початкова температура горючого середовища $T_0: T_0 \downarrow q(-)$ $\downarrow T_{зап} \downarrow$
- тиск, під яким знаходиться горюча суміш: $P \quad W_{xp} \quad q(+)$ $T_{зап} \downarrow$

Температура запалювання знижується при підвищенні тиску в системі. Температура вимушеного запалювання горючих газових сумішей і повітряних сумішей парів горючих рідин при високому тиску монотонно знижується до 600-650°C для метано-повітряних сумішей при тиску 6 атм і до мінімальної температури запалення вуглеводнів порядку 200°C для суміші парів нафти з повітрям при тиску порядку 25-30 атм.

- швидкість руху газової суміші: $v_{руху} \propto q(-)$ $T_{зап}$

Якщо тіло або горюча суміш рухаються, тепловий потік передається не тільки теплопровідністю, але й конвекцією. При цьому запас тепла передається більшій кількості газу, а суміш буде нагріватися до меншої температури. Тому для займання горючої суміші, що рухається, джерело запалювання повинно мати більший запас енергії.

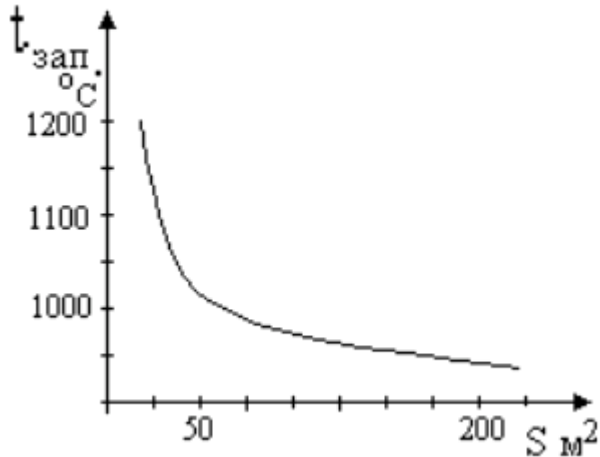


Властивості джерела запалювання

Для забезпечення необхідного початкового запасу тепла в прогрітому шарі горючого газу температура нагрітого тіла повинна бути тим більше, чим менший розмір нагрітого тіла, власна теплоємність або поверхня контакту нагрітого тіла з газовим середовищем.

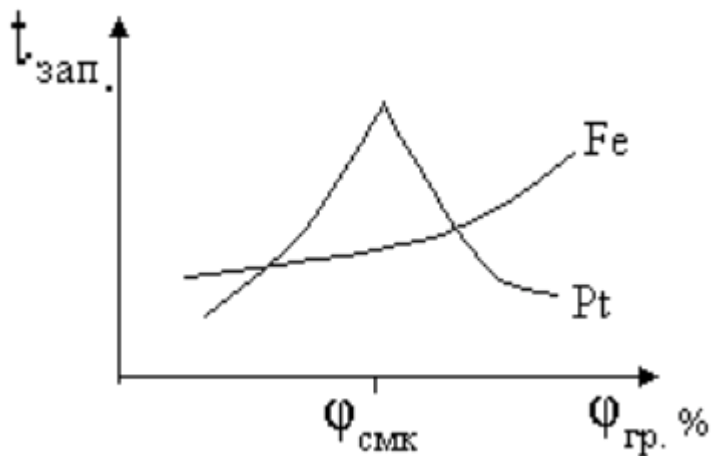
- теплоємність матеріалу c_p : $c_p \downarrow T_{\text{зап}}$
- розміри нагрітого тіла: $d_{\text{ДЗ}} \downarrow T_{\text{зап}}$
- загальна площа поверхні нагрітих тіл: $S \downarrow T_{\text{зап}}$

При достатньо великій площі підпалюючої поверхні ($S_p > 200 \text{ см}^2$) критична температура запалювання суміші природного газу з повітрям асимптотично наближається до свого мінімального значення $\approx 975^\circ\text{C}$. При зменшенні діаметру підпалюючої кульки з 5 до 1 мм її температура збільшується на $250\text{--}400^\circ\text{C}$ в залежності від виду горючої речовини.



Температура запалювання тим більша, чим більшими каталітичними властивостями володіє поверхня джерела запалювання.

Так, найбільша температура запалювальної поверхні у каталітично активної платини, трохи нижче у золота, ще нижче у нікелю і молібдену, а сама низька - у некаталітичної поверхні із звичайної сталі. Причому характерно, що температура запалювальної поверхні у каталітично активної платини тим вище, чим склад горючої суміші ближче до стехіометричного: вона на $200\text{--}300^\circ\text{C}$ вище, ніж для суміші іншого складу, тобто для бідних і багатих сумішей.



Цей парадоксальний на перший погляд висновок зумовлений саме інтенсивною витратою компонентів горючої суміші поблизу каталітичної поверхні. У прикордонному шарі так інтенсивно витрачається паливо, що поширення хімічних реакцій окислення за межі прилеглої зони і виникнення процесу горіння у всій суміші стає неможливим при тих температурах, при яких воно

виникає від некаталітичних металевих поверхонь. І чим склад суміші ближче до стехіометричного, тим більше швидкість хімічних реакцій взаємодії.

Незважаючи на те, що індукційний період при запалюванні виявляється найменшим, він все ж таки існує, і величина його залежить від температури джерела запалювання, виду горючої речовини і складу суміші. З пониженням температури запалювальної поверхні період затримки запалення зростає з 0,5 до 2–3 сек.

Найбільшим він виходить, коли в нього включаються і фазові перетворення компонентів горючої суміші (частіше за все пального). Для підпалення конденсованих видів горючих речовин (рідини або тверді матеріали) необхідний такий запас теплової енергії зовнішнього джерела запалювання, щоб його вистачало на процес фазового переходу в самому матеріалі (процес розкладання або випаровування) і утворення газоповітряної суміші, або на створення малого осередку гетерогенного горіння – тління, яке при певних умовах може розвиватися і перейти у відкрите полум'яне горіння. Тому очевидно, що мінімальною температурою запалення володіють горючі газоповітряні і пароповітряні суміші. Саме вони є найбільш пожежо- і вибухонебезпечними. Індукційний період запалювання конденсованих речовин буде складатися з часу фазового перетворення горючої речовини, часу сумішоутворення і власне часу запалювання, і при цьому період індукції збільшується в сотні і тисячі разів. Наприклад, при визначенні температури запалювання ЛЗР, ГР тигельним методом період індукції, як при самоспалахуванні, зростає до 20–25 сек.

ВИСНОВОК: закономірності зміни допустимої (критичної) температури, близької до температури запалювання пожежонебезпечних газо- і пароповітряних сумішей, від вигляду горючого, складу суміші, тиску, розмірів запалювального тіла і інших параметрів запалення необхідно знати і з точки зору забезпечення пожежної безпеки технологічних процесів виробництва, і для науково обґрунтованої експертизи пожеж, і в ряді інших ситуацій, пов'язаних із забезпеченням пожежної безпеки об'єктів народного господарства.

§ 3. Запалювання горючих систем електричними розрядами.

Однією з поширених причин виникнення процесів горіння є теплові прояви електричної енергії, а саме:

електричний розряд статичної електрики;

електричний розряд атмосферної електрики (прямий та опосередкований вплив блискавки);

електричні іскри, що виникають внаслідок короткого замикання, (дуга та краплі металу);

нагрів поверхні ламп накалювання та електричних дротів і контактів при виникненні перевантажень.

Запалення горючого середовища електричними розрядами статичної і атмосферної електрики або електричними іскрами короткого замикання є однією із найбільш поширених причин виникнення пожежі.

За статистичними даними на Україні від 15 до 25 % від загальної кількості пожеж виникає через порушення правил монтажу та експлуатації електрообладнання.

Розряди статичної електрики – це імпульс ініціювання горіння, який найбільш важко контролюється і тому є найбільш небезпечним. При терті, подрібненні або швидкому рушенні тіл, які заряджаються, на них може накопичуватися електричний заряд. Сприятливим середовищем для виникнення і накопичення зарядів є діелектричні рідини і сипучі матеріали. У газах значні заряди не з'являються, однак часто виникають в димах і туманах, тобто на твердих і рідких частках, завислих в газах. Реальну небезпеку представляє "контактна" електризація людей, працюючих з рухомим діелектричним матеріалом або обладнанням. При зіткненні людини з обладнанням, що заземлено, виникають іскри з енергією від 2,5 до 7,5 мДж.

За статистичними даними на промислових підприємствах США 2% пожеж викликалися розрядами статичної електрики. Вибухи від розрядів статичної електрики відбуваються при

наповненні цистерн, резервуарів, паливних баків. Так в 70-х роках було відмічено цілий ряд вибухів гігантських танкерів під час промивки танків за допомогою брандспойтів. Причиною цих вибухів вважають розряди статичної електрики, що виникали внаслідок дроблення струменя і утворення в танку, що промивається, зарядженої хмари, яка складається з крапель води і нафти. Крім того, розряди статичної електрики явилися причиною 10% всіх пожеж в резервуарних парках нафтоперегінних заводів. Відмічено випадок, коли резервуар ємністю 220 тисяч л, заповнений до моменту виникнення пожежі на 190 тисяч л, перелетів над шосе і залізницею. Подібні випадки відбуваються і при пожежах залізничних цистерн.

Основний спосіб запобігання накопиченню електричних зарядів – заземлення апаратури, яка проводить електрику, однак це тільки знижує імовірність електризації, але не запобігає появі розрядів повністю.

Небезпека розряду атмосферної електрики обумовлена тим, що при прямих ударах блискавки температура в каналі блискавки досягає $30\ 000^{\circ}\text{C}$ при силі току $200\ 000\ \text{A}$ і часом впливу біля $100\ \mu\text{s}$, а при опосередкованому впливі блискавки виникають іскрові розряди з енергією $100\ \text{Дж}$ і більше. Такий вплив приводить до виникнення горіння будь-яких горючих речовин.

При короткому замиканні електропроводки або при проведенні електрозварювальних робіт утворюються краплі розплавленого металу. Пожежна небезпека їх обумовлена досить високою температурою, яка значно перевищує температуру запалення будь-якої горючої речовини. Так початкова температура іскор, які утворюються при електрозварювальних роботах приймається 4000°C , при короткому замиканні електропроводки – 2500°C . Запалення такими електричними іскрами можна розглядати як запалення нагрітим тілом.

При електричному розряді відбувається виділення значної кількості енергії в дуже малому об'ємі, це викликає локальний нагрів деякого сферичного об'єму газової суміші до значної температури (десятки тисяч градусів) безпосередньо в зоні його дії. Час цього впливу такий малий (тисячні долі секунди), що не можливо вважати розряд фізичним тілом навіть умовно і з цієї причини теорія запалення нагрітим тілом тут маловживана. Проте час теплової релаксації системи достатньо великий, при цьому температура нагрітого об'єму суміші швидко зменшується внаслідок втрат тепла випромінюванням і теплопередачею в навколишню холодну суміш. Тому запалення електричними іскрами можна розглядати з позиції термодинамічної рівноваги при миттєвому виділенні тепла і більш повільним поширенням тепла в навколишній простір.

Крім того, дія електричного розряду викликає інтенсивне збудження молекул та іонізацію простору, в якому відбувається розряд, при цьому утворюються активні молекули і радикали, які здатні стати активними центрами в ланцюгових реакціях і тим самим ініціювати виникнення процесу горіння.

Таким чином існує дві концепції іскрового запалювання: теплова і іонна.

3.1. Теплова теорія запалювання електричними розрядами.

1.1. Теплова теорія запалювання електричними розрядами

Розглянемо механізм вимушеного запалювання газових сумішей електричним розрядом з позиції теплової теорії запалювання, запропонованої Я.Б. Зельдовичем. При пропущенні через газ електричного розряду максимальна температура в його каналі значно більше температури горіння (порядку $20\ 000\ \text{K}$), після чого його дія припиняється. Для спрощення приймають, що енергія розряду звільняється одним миттєвим імпульсом в межах малого об'єму, тобто розряд крапковий, який в момент часу $\tau = 0$ виділяє деяку кількість тепла, рівну $E\ \text{Дж}$. Подальші процеси протікають тільки в газовому об'ємі, нагрітому розрядом до високої температури, і хід процесу буде залежати від фізичних і хімічних властивостей саме газової суміші.

Порівняємо закономірності нагрівання електричним розрядом з енергією E інертного газу і горючого газового середовища з однаковими теплофізичними властивостями.

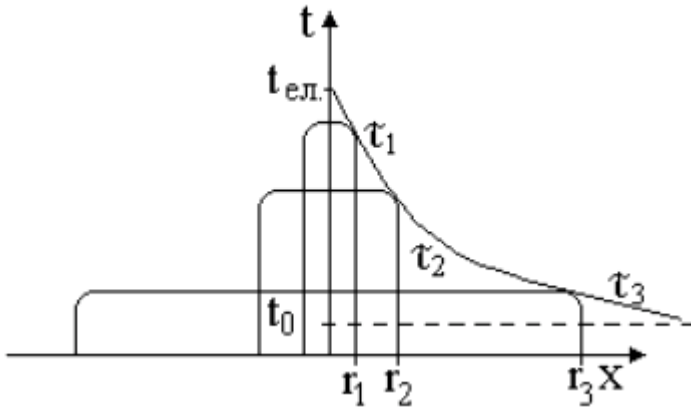


рис. 1

На рис. 1 для інертного газу представлені криві просторового розподілу температури $T(r)$, де r - відстань від точки подачі імпульсу, для послідовних моментів часу $\tau_0 = 0$, $\tau_1 > 0$, $\tau_2 > \tau_1$ і т. п. В момент τ_0 початкове газове середовище в межах малого об'єму навколо розряду розігріто до температури $T_{ел} \gg T_{гор}$. При цьому виникає теплова хвиля: тепло теплопровідністю передається навколишнім шарам, внаслідок чого температура в початковому об'ємі зменшується, а в навколишніх шарах збільшується. Енергія поступово розподіляється по всьому об'єму системи. По мірі зростання радіуса розігрітої області температура при заданому r знижується, а також знижується максимальна температура в центрі зони розігрівання $T(r=0)$. При досить великих τ або r температури газу, що розігрівається, і навколишнього простору стануть рівними, $T(r, \tau \rightarrow \infty) = T_0$.

Рівняння нестационарної теплопровідності для нейтрального середовища з постійним коефіцієнтом температуропровідності має вид:

$$\frac{dT}{d\tau} = a_t \nabla^2 T,$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$$

де ∇^2 - оператор Лапласа

Перетворюючи дане рівняння в сферичну систему координат, для граничних умов $r = \infty$, $T = T_0$, $dT/dr = 0$ отримаємо рішення рівняння про розподіл температури навколо крапкового джерела тепла в будь-якій точці суміші у часі:

$$T_{x,\tau} = T_0 + \frac{Q_{ел}}{c_p \rho (4\pi a_t \tau)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4a_t \tau}\right),$$

де T_0 - початкова температура газової суміші, К;

c_p - середня теплоємність суміші, кДж/(кг К);

ρ - густина газової суміші, кг/м³;

a_t - температуропровідність, м/с;

r - радіус сфери, при початковій густині суміші, м.

$Q_{ел}$ - кількість тепла, що виділяється при електричному розряді, Дж.

Розряд в горючому середовищі викликає протікання хімічної реакції з виділенням тепла.

Інтенсивність тепловиділення визначається вже відомим співвідношенням:

$$q(+)=V_{гс} Q_{н} w_{хр}$$

Це тепло додається до енергії початкового імпульсу. При цьому розподіл температури в газовому середовищі зміниться (рис. 2).

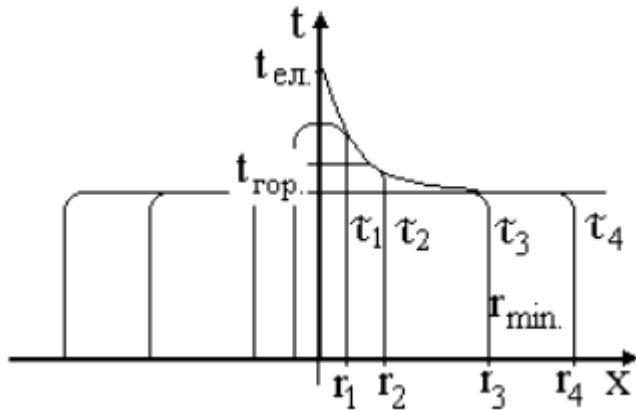


рис. 2

Якщо енергія електричного розряду недостатня, температура нагрітого об'єму буде зменшуватися так швидко за рахунок тепловіддачі в холодну вихідну суміш, що за цей час хімічне перетворення не зможе забезпечити достатню кількість тепла для виникнення горіння, вимушеного запалення не відбудеться.

При дії електричного розряду більшої потужності розширення зони нагріву, в основному, буде відбуватися за рахунок розширення зони хімічної реакції. По мірі зростання радіуса нагрітої сфери все більше зростають сумарна кількість тепла, яка виділилася, і частка в ній енергії хімічної реакції. В зв'язку з цим подальше пониження температури сповільнюється. Тепло, що випромінюється і відводиться теплопровідністю в навколишнє середовище, компенсується тепловиділенням при реакції. Якщо енергія початкового імпульсу достатня для відповідного

нагрівання деякого критичного об'єму горючого середовища $(V_{гс_{кр}} = \frac{4}{3}\pi r_{кр}^3)$, інтенсивність тепловиділення при протіканні хімічної реакції $q(+)$ стає рівною інтенсивності тепловіддачі $q(-)$, температура стабілізується (залишається постійною). Встановлюється стаціонарний режим.

Якщо тепловиділення при реакції перевищить тепловтрати, виникає горіння, з'являється сферичний фронт полум'я. Можливість самовільного поширення полум'я залежить від розміру зони, охопленої горінням протягом часу, за який температура "ядра полум'я" зменшується до величини температури горіння. При подальшому поширенні полум'я початковий імпульс виявляється малим, а тепло, що виділилося при реакції, істотно перевищить початкову енергію розряду.

Отже, для виникнення і самовільного поширення горіння необхідним є створення критичного елемента полум'я з температурою горіння. Значення критичного об'єму сфери отримують з наступних міркувань. Якщо час охолодження $\tau_{охол}$ нагрітого об'єму суміші від температури горіння $T_{гор}$ до критичної температури $T_{гор} - \Theta$ (де $\Theta = RT_{гор}^2/E_{акт}$ – характеристичний інтервал температур, на якому швидкість хімічної реакції зменшується в e раз), більше або дорівнює часу протікання хімічної реакції окислення, то запалювання горючої суміші відбудеться.

$$\tau_{охол} \geq \tau_{хр}$$

Розрахунки показують, що нагріта до $T_{гор}$. сфера, яка розташована в холодному горючому середовищі, набуває властивостей незгасаючого елемента полум'я в тому випадку, коли її розміри мають порядок ширини фронту полум'я.

$$r_{min} = 3,7\delta_{пл}$$

Створення такого нагрітого об'єму дозволяє припустити, що сусідні шари суміші запалюються раніше, ніж нагрітий іскрою об'єм суміші охолоне до температури нижче, ніж критична температура запалювання (тобто на величину характеристичного інтервалу).

Тому E_{min} рівна теплоті нагрівання від T_0 до $T_{гор}$. об'єму газу, радіус якого рівний r_{min} . Тоді кількість тепла, що необхідна для нагріву критичного об'єму суміші, прилеглої до зони впливу розряду, можна визначити як:

$$Q = 4/3\pi r_{\min}^3 \rho c_p (T_r - T_0)$$

Виражене через параметри горючої газової суміші і швидкість нормального поширення полум'я, це рівняння дає співвідношення критичної кількості тепла, необхідної для підпалення суміші електричною іскрою:

$$E_{\min} = \frac{\lambda^3 T_0^2 (T_r - T_0)}{c_H^3 P_0^2 c_p^2}$$

Цей вираз дозволяє проаналізувати вплив різних фізико-хімічних параметрів горючої суміші на енергію вимушеного запалювання.

Не кожний розряд породжує в горючому середовищі стаціонарне полум'я. Досвід показує, що це відбувається тільки в тому випадку, якщо енергія розряду E не менше деякого критичного значення E_{\min} . У іншому випадку не утвориться необхідний об'єм газового середовища, нагрітий до критичної температури, ($r_{\text{нагр}} < r_{\min}$), тепловіддача перевищить тепловиділення, горюче середовище буде прогресивно охолоджуватися, і реакція, що почалася, припиниться. Стаціонарне полум'я не утвориться, виникаючий осередок горіння є нестійким і затухає.

Під мінімальною енергією запалювання газу, пари або аерозолі даної речовини в повітрі розуміють найменшу енергію конденсатора ($E_{\text{конд.}} = 0,5CU^2$, де C – ємність конденсатора, Φ ; U – напруга, V), при розряді якого через повітряний проміжок виникає іскра, що запалює стехіометричну суміш даної речовини і повітря з імовірністю 0,01.

Таким чином, при іскровому запалюванні за параметр, що характеризує пожежонебезпечні властивості системи, приймають граничне найменше значення енергії розряду, починаючи з якого суміш здатна запалитися з подальшим поширенням полум'я на весь об'єм.

Електричні розряди різної потужності і різної тривалості можуть бути рівноцінними при запаленні, якщо їх енергія однакова.

Мінімальна підпалююча енергія іскри є функцією

виду горючої речовини,

складу суміші,

умов, в яких знаходиться система (тиск, температура, швидкість руху газового середовища).

Вид горючої речовини

Мінімальна енергія запалювання сильно змінюється в залежності від природи горючої речовини. Наприклад, для водню вона складає 0,017 мДж, для етану – 0,24 мДж, а для аміаку – 680 мДж. Мінімальне значення енергії запалювання найбільш поширених вуглеводневих газових сумішей відповідає $E_{\min} = 0,2-0,3$ мДж.

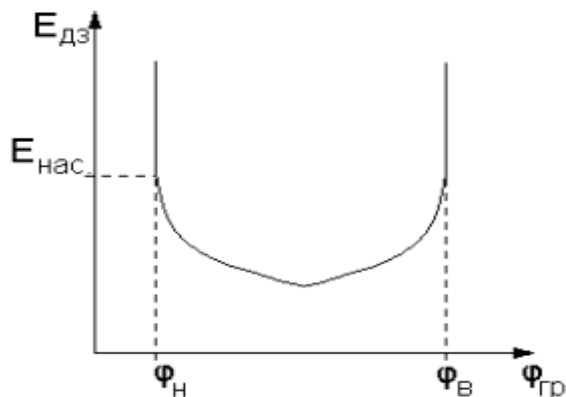
Мінімальна величина енергії запалення меншає при переході від парафінових вуглеводнів до етиленових і далі до ацетиленових. Для запалення ароматичних вуглеводнів потрібна енергія, мало відмінна від E_{\min} парафінових вуглеводнів, які містять однакове число атомів вуглецю.

Енергія запалювання залежить від агрегатного стану горючої речовини. Так, для підпалення конденсованих видів горючих речовин (рідин або твердих матеріалів) необхідний такий запас теплової енергії іскри або іншого зовнішнього джерела запалювання, щоб його вистачало на процес фазового переходу в самому матеріалі (процес розкладання або випаровування) і утворення газоповітряної суміші, або на створення малого осередку гетерогенного горіння – тління, яке при певних умовах може розвинути і перейти у відкрите полум'яне горіння. Тому очевидно, що мінімальною енергією підпалення володіють горючі газоповітряні і пароповітряні суміші. Саме вони є найбільш пожежо- і вибухонебезпечними. Індукційний період запалювання конденсованих речовин буде складатися з часу фазового перетворення горючого, часу сумішоутворення і власне часу запалювання, і при цьому період індукції збільшується в сотні і тисячі разів.

Склад горючої суміші.

Мінімальна енергія запалювання залежить від складу горючої суміші. В залежності від концентрації горючої речовини існують межі, до яких прагнуть кордони запалювання при

збільшенні потужності запалювання. Іскру, при якій критичні умови запалювання виявляються такими, що не залежать від подальшого зростання її потужності, називають насихуючою іскрою.



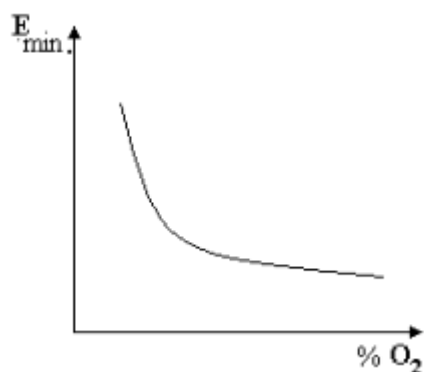
По мірі збільшення молекулярної ваги вуглеводню мінімальна енергія запалювання, яка відповідає оптимальному для запалення складу, зміщується у бік багатих сумішей. Це зміщення є слідством різних швидкостей дифузії кисню і горючої речовини до початкового “ядра” горіння. Для нормальних парафінових вуглеводнів концентрація пального в суміші з повітрям, при якій відбувається найлегше запалення, може бути визначена з співвідношення:

$$\phi_{gr} \approx 7,5 \sqrt[3]{D}$$

де ϕ_{gr} – об’ємна концентрація горючої речовини в суміші оптимального складу, %;

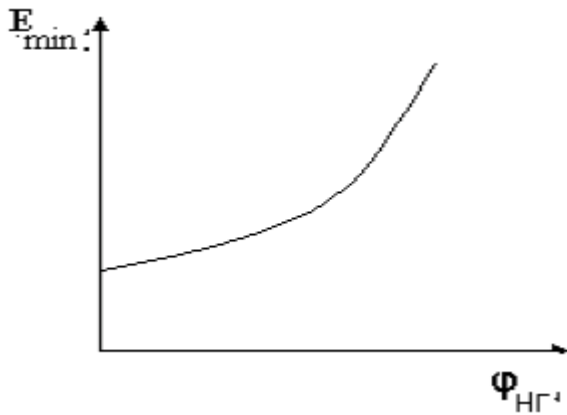
D – коефіцієнт дифузії горючої речовини в повітря, cm^2/s .

При збільшенні вмісту кисню в окислювальному середовищі мінімальна енергія запалювання значно зменшується.



Так, наприклад, метано-повітряна суміш стехіометричного складу має мінімальну енергію запалювання 0,42 мДж, а метано-киснева суміш – всього 0,004 мДж.

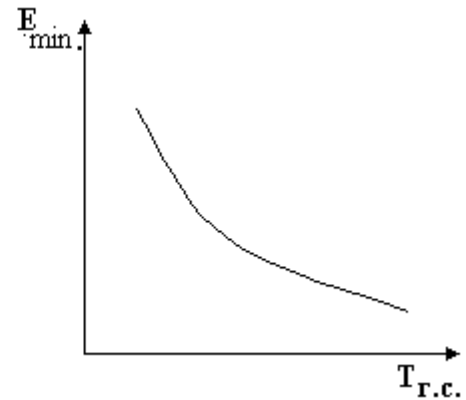
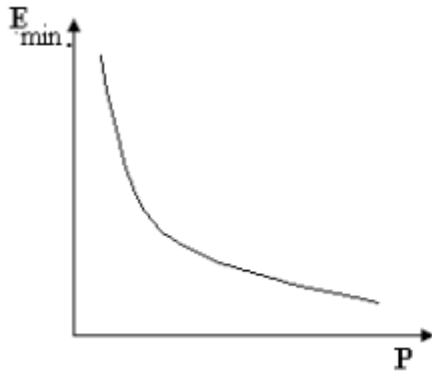
При збільшенні вмісту негорючих компонентів в газовій суміші мінімальна енергія запалювання збільшується.



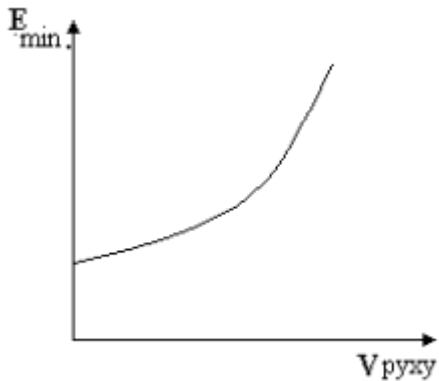
Умови, в яких знаходиться горюча суміш.

При пониженні тиску та початкової температури горючої суміші енергія запалювання збільшується.

Так, якщо при атмосферному тиску (100 кПа) мінімальна енергія запалювання стехіометричної суміші метану з повітрям становить 0,42 мДж, то при тиску 10 кПа вона складає відповідно 25 мДж.



З збільшенням швидкості течії газової горючої суміші енергія запалювання росте.



Існування граничної енергії має вирішальне значення для забезпечення вибухобезпеки.

Розрахунок мінімальної енергії запалювання можливий на основі порівняльного методу з використанням такого параметра як нормальна швидкість горіння

$$\frac{E_{\min 1}}{E_{\min 2}} = \frac{u_{н2}^2}{u_{н1}^2}$$

де $E_{\min 1}$, $E_{\min 2}$ – мінімальна енергія запалювання речовин 1 і 2;

$u_{н1}$, $u_{н2}$ – нормальна швидкість поширення горіння речовин 1 і 2.

Ця формула тим точніша, чим ближче по будові речовини, які порівнюються. Якщо в якості стандартної речовини використати нормальний бутан, у якого $E_{\min} = 0,25$ мДж, а $u_n = 0,379$ м/с, то мінімальну енергію запалювання інших газів і парів в повітрі при кімнатній температурі і атмосферному тиску можна розрахувати по перетвореній формулі:

$$E_{\min} = \frac{0,036}{u_n^2}$$

Якщо швидкість поширення горіння u_n невідома, то мінімальну енергію запалювання потрібно визначати експериментально за допомогою досить складного обладнання.

3.2. Іонна теорія запалювання електричними розрядами.

Теорія іонного або холодного запалювання сумішей засновується на припущенні, що при проходженні іскрового розряду відбувається поляризація суміші і утворення іонів з молекул її компонентів. Іони стають активними центрами ланцюгової реакції, при якій сам процес взаємодії як би постачає в суміш нові активні центри. При досягненні певної потужності розряду концентрація активних центрів, що утворюються в зоні впливу розряду, досягає такого критичного значення, вище за яке загальна кількість активних центрів реакції, що утворюються, перевищує кількість активних центрів, що гинуть. Виникає розгалужена ланцюгова реакція, яка приводить до появи горіння.

Існування критичної потужності розряду іонна теорія пояснює тим, що при недостатній потужності утворення активних центрів розгалуженої ланцюгової реакції не компенсує недостатнє розігрівання. Швидкість процесів розгалуження сильно залежить від температури і при охолодженні середовища швидкість розгалуження різко сповільнюється, імовірність обриву ланцюга починає перевищувати імовірність розгалуження, і активні центри гинуть.

Крім очевидних фактів потужної іонізації газів в зоні електричного розряду і утворення сильно збуджених молекул, які сприяють інтенсивній течії хімічної реакції, на користь іонної теорії кажуть експериментальні дані. Так, якщо запалювальну здатність електричних іскор зв'язувати тільки з тепловим впливом іскрового розряду, то можна чекати, що їх запалювальна здатність буде пропорційна квадрату сили струму, оскільки відомо, що $Q \sim I^2 R t$. Однак дослідями встановлено, що запалювальна здатність електричної іскри пропорційна першому ступеню амперажу, що явно вказує на більший вплив іонного, а не теплового процесу в зоні впливу іскри.

ВИСНОВОК: Оскільки в процесі іскрового запалювання є наявність елементів теплового і іонного механізму, то можна вважати, що обидва вони істотні. Питання тільки в тому, який з них є домінуючим і при яких умовах. Це необхідне знати для запобігання мимовільному запаленню горючих газів з метою запобігання пожежам і вибухам парово-газоповітряних сумішей.

Такий параметр як мінімальна енергія запалювання є основним параметром, що характеризує пожежну небезпеку горючих речовин і матеріалів у всіх трьох агрегатних станах.

§ 4. Підпалення фрикційними іскрами, краплями розплавленого металу.

При ударі по металах або їх стиранні можливе іскроутворення. Такі іскри називають фрикційними.

Фрикційні іскри - шматочки металу, в основному розміром 0,1-0,5 мм, відірвані і нагріті при механічному впливі, частково окислені.

Звичайно тертя та співударяння деталей відбувається при атмосферному тиску і кімнатній температурі. В таких умовах початкова температура фрикційних іскор дорівнює температурі плавлення більш легкоплавкого металу.

Температура фрикційних іскор під час утворення значно вище за температуру запалювання багатьох речовин, тому іскри є потенційним ініціатором горіння. Запалювальна здатність іскор

залежить від хімічного складу матеріалів, що беруть участь в терті, і від режиму їх механічної взаємодії.

Шматочки металу при контакті з повітрям вступають у взаємодію з киснем, починається реакція окислення з виділенням тепла, яке витрачається на нагрів самої частки і навколишнього газу. Якщо інтенсивність тепловиділення перевищує інтенсивність тепловіддачі, відбувається збільшення температури іскри. Для певних видів металу значний тепловий ефект реакції окислення приводить до розігріву шматочку металу до температури кипіння. Якщо повітря, в якому відбувається фрикційне іскроутворення, збагатити киснем, то температура іскор зростає. Додавання 10% O_2 підвищує температуру іскри приблизно на $200^\circ C$, а заміна всього повітря чистим киснем - на $500^\circ C$. При стиранні металу у відновній або інертній атмосфері свічення його часток припиняється.

Первинне розігрівання фрикційних іскор обумовлюється механічним впливом, тому запалювальна здатність іскор зростає при збільшенні енергії зіткнення або швидкості ковзання, оскільки при цьому збільшується початкова температура часток, що утворюються. Це приводить до збільшення швидкості окислення і більш швидкого досягнення критичних умов запалення.

Здатність заліза горіти в кисні - його специфічна особливість. Зіткнення алюмінієвих і магнієвих сплавів зі сталлю приводить до утворення фрикційних іскор великої запалювальної здатності. Навіть при порівняно невисоких енергіях зіткнення (порядку 100-200 Дж) підпалюються метано - повітряні суміші. Сплави міді і алюмінію цим не відрізняються, тому частки, що утворюються при їх стиранні, значно не розігріваються.

Встановлено, що з поширених в техніці горючих газів і парів тільки п'ять утворюють з повітрям суміші, що підпалюються фрикційними іскрами: H_2 , C_2H_2 , C_2H_4 , CS_2 , CO . Суміші насичених і ароматичних вуглеводнів, пропилену, спиртів, альдегідів, кетонів, ефіру іскробезпечні.

Виходячи з досить великих початкових температур фрикційних іскор або крапель розплавленого металу можна було б припустити, що вони можуть запалити будь-які горючі системи, але на практиці це відбувається не завжди, а тільки в тих випадках, коли іскра, що утворилася, володіє достатнім запасом енергії.

Тому рішення задачі по визначенню імовірності запалення розжареними тілами зводиться до визначення кількості тепла, що віддається іскрою для нагріву горючої речовини до температури самоспалахування, часу її вихолодження до цієї температури.

Кількість тепла, те, що віддається розжареним тілом визначається з рівняння:

$$Q = V_{иск} \rho_{иск} c_{p,иск} (T_{иск} - T_{с.г.р.})$$

де $c_{p,иск}$ - питома теплоємність матеріалу при температурі $T_{позов}$

$V_{иск}$ - об'єм іскри (для краплі $V=4/3\pi r^3$),

$\rho_{иск}$ - густина матеріалу іскри,

$T_{с.г.р.}$ - температура самоспалахування горючої речовини,

$T_{иск}$ - температура, з якою іскра потрапить в горюче середовище.

Запас енергії залежить від маси іскри, тобто від її розміру. На практиці геометричні розміри розжарених крапель визначаються дослідним шляхом або при розслідуванні по речових доказах, вилучених в ході слідства. При неможливості практичного визначення розмірів крапель допускається приймати їх в наступному порядку:

1. При електрозварювальних роботах - 5 мм;
2. При короткому замиканні електропроводки і плавленні нитки розжарювання електроламп - 3 мм;
3. Для іскор з топок і вихлопних труб двигунів - 3 мм
Для іскор механічного походження - 0,5 мм;

Перше ніж потрапити в вихідну горючу суміш, іскра буде остигати при проходженні через холодне навколишнє середовище. Якщо прийняти, що в момент утворення іскри метал знаходиться в розплавленому стані, то під час польоту будуть проходити процеси охолодження до температури кристалізації, а потім ще деякий час буде відбуватися процес фазового переходу - кристалізації.

Час, який іскра знаходиться в розплавленому стані, можна визначити за формулою:

$$\tau_p = \frac{C_p m_{иск}}{\alpha S_{иск}} \ln \frac{T_{поч} - T_0}{T_{пл} - T_0}$$

Час, за який відбудеться кристалізація, дорівнює:

$$\tau_{кр} = \frac{m_{иск} \Delta H_{пл}}{\alpha S_{иск} (T_{пл} - T_0)}$$

В залежності від часу польоту іскри можна визначити її кінцеву температуру, з якою іскра потрапить в горючу суміш:

$$\text{при } \tau_{пол} < \tau_p \quad T_{искр} = T_0 + (T_{поч} - T_0) \exp\left(-\frac{\tau \alpha S_{искр}}{C_p^{роз} m_{искр}}\right),$$

$$\text{при } \tau > \tau_p \quad T_{иск} = T_{плавл},$$

$$\text{при } \tau > \tau_{кр} \quad T_{искр} = T_0 + (T_{пл} - T_0) \exp\left(-\frac{(\tau - \tau_{кр}) \alpha S_{искр}}{C_p^{ТВ} m_{искр}}\right).$$

Якщо енергія іскри буде перевищувати мінімальну енергію запалювання для даної горючої речовини вважається, що горюча система може бути запалена і іскра є джерелом запалювання.

При попаданні іскор з пічних труб, котельних, вихлопних труб тепловозів і двигунів внутрішнього згоряння потрібно враховувати, що пожежонебезпечними вважаються іскри, якщо при діаметрі 2 мм їх температура становить 1000 С, 3мм - 800 С, 5мм - 600 С.

§ 5. Граничні параметри запалення горючих систем.

При проведенні експертизи пожеж часто доводиться давати висновок про можливість запалення тих або інших матеріалів тепловим проявом різних видів енергії з урахуванням всіх чинників, що впливають на їх запальовальну здатність.

Джерелом запалювання буде тільки такий тепловий прояв, який має запас енергії достатній для виникнення горіння речовин. Якщо ці умови не виконуються, то тепловий прояв не може запалити даний матеріал або горюче середовище і не буде вважатися джерелом запалювання. Виходячи з цього до безумовних джерел запалювання можна віднести: прямі удари блискавок, які запалюють всі горючі матеріали, електричні дуги при зварюванні і різанні металів, полум'я газових пальників, сірника і деякі інші прояви енергії.

Так при експлуатації енергоустановки виникають розряди в газі, зумовлені індуктивністю ланцюгів або накопиченням статичної електрики. Різниця потенціалів між обладнанням і землею вимірюється приладом в реальних умовах. Якщо вона більше, ніж мінімальна енергія запалювання, то іскра статичної електрики може служити джерелом запалювання. Крім того, мінімальна енергія запалювання може значно зменшуватися при зміні умов в горючій суміші. Тому при використанні такого обладнання у вибухонебезпечних приміщеннях енергія розрядів повинна бути меншою, ніж $0,4E_{min}$ найбільш небезпечної суміші, яка потенційно може утворитися в цьому виробничому приміщенні. Крім того, час існування такого імпульсу повинен бути не менше періоду індукції для даної горючої системи.

Збільшення часу контакту горючої суміші з джерелом запалювання приводить до зниження температури, яка необхідна для запалювання. Чим більше час контакту, тим при більш низькій температурі джерела запалювання система може отримати ту кількість тепла, яка необхідна для формування осередку горіння при даних умовах тепловіддачі. Тому хоч при розгляді умов

запалення нагрітим тілом ми і казали, що його температура повинна бути більшою за температуру самоспалахування, горіння все ж таки може виникнути при тривалому контакті горючої суміші з нагрітою поверхнею, температура якої дорівнює температурі самоспалахування. Так як температура самоспалахування залежить від багатьох факторів і при їх зміні може зменшуватися, то безпечною вважається температура нагріву поверхні менше ніж 80% від температури самоспалахування.

Так, наприклад, поверхня лампи розжарювання потужністю 25 Вт через 10 хвилин нагрівається до 50°C, а при потужності 500 Вт – до 500°C.

При запаленні горючих систем відкритим полум'ям можна говорити про існування теплового і індукційного механізму запалення, тобто запалювальна здатність відкритого полум'я обумовлюється його температурою і часом впливу на горючу речовину.

Температура полум'я при горінні деревини, горючих рідин, природного газу знаходиться в межах від 880 до 1200°C, що значно перевищує температуру самоспалахування більшості горючих речовин, тому при безпосередньому контакті відкритого полум'я з горючим середовищем виникне горіння. Час теплового впливу полум'я при цьому обмежений лише наявністю самої речовини, що горить.

Крім того відкрите полум'я передає зі своєї поверхні в навколишній простір значну кількість тепла за рахунок випромінювання. Променистий тепловий потік впливає на горючі речовини, які знаходяться поруч з відкритим вогнем, і якщо його потужності вистачить для розігрівання горючої системи до температури самоспалахування, то виникне горіння. Критичний потік тепла визначається співвідношенням:

$$q_{кр} = \epsilon \sigma (T_{гор}^4 - T_{cc}^4) F_{1-2}$$

Числові значення критичного потоку залежать від виду речовини, що запалюється, і часу теплового впливу.

Критичне значення променистого теплового потоку, що призводить до виникнення горіння

горюча речовина	3 хвилини	5 хвилин
гума	22,6	19,2
пластик	19,4	18,6
деревина	18,8	16,9
бавовна	11,0	9,7

Якщо джерелом відкритого вогню виступають сірник, що горить, то температура полум'я може досягти 650°C, а час впливу складе біля 20 с, тліюча цигарка - температура знаходиться в межі 320 - 410°C, час впливу 2 – 2,5 хвилини, тліюча сигарета - температура – 420 - 460°C, час впливу до 25 хвилин.

ВИСНОВОК: Теплова теорія вимушеного запалення горючих систем є основою для розуміння процесів, що приводять до появи полум'яного горіння, допоможуть вам в практичній діяльності при організації і проведенні профілактики пожеж. при визначенні можливості запалення горючих матеріалів різними тепловими виявами при проведенні експертизи пожеж.

Розділ 3 Горіння речовин і матеріалів

Глава 1. Горіння газопароповітряних сумішей.

§ 1. Загальні закономірності горіння газових сумішей.

Горіння газів є гомогенним. В залежності від способу сумішоутворення розрізняють кінетичне та дифузійне горіння.

На пожежі в основному зустрічається горіння заздалегідь не змішаних газів. Компоненти реакції поступають в зону взаємодії з різних середовищ, кожне з яких містить тільки один з реагуючих компонентів. При цьому взаємодія можлива тільки після перенесення реагуючих компонентів за рахунок дифузії через кордон розділу обох середовищ в зону реакції. Швидкість постадійного процесу визначається швидкістю найповільнішого етапу.

Якщо швидкість перенесення речовини менше швидкості хімічної реакції, то швидкість горіння визначається лише швидкістю масообміну. У цьому випадку прийнято говорити, що реакція горіння протікає в дифузійній області. Швидкість взаємодії при цьому мало змінюється при підвищенні температури, так як швидкість дифузії порівняно слабо залежить від температури. При цьому поблизу кордону розділу один з реагуючих компонентів, який знаходиться в нестачі (по стехіометричному співвідношенню), витрачається практично повністю.

При горінні газу, який витікає в атмосферу повітря, кисень дифундує через шари продуктів горіння, поступає до зони горіння, де вступає в хімічну реакцію з паливом. Внаслідок дифузії окислювача з навколишнього середовища концентрація горючої речовини на деякій відстані від зрізу знизиться з 100% до певного співвідношення, при якому можливо протікання хімічної реакції, - до верхньої концентраційної межі. Через великий надлишок пального в цій області утворяться продукти неповного згорання, а вуглець, що утворився в цій області зумовлює яскраво-жовте свічення дифузійного полум'я.

Такі закономірності характерні для дифузійного горіння.

Якщо вже є готова суміш, що складається з горючого газу і окислювача, то горіння класифікується як кінетичне. Само визначення "кінетичне горіння" введено внаслідок того, що швидкість процесу горіння залежить в основному від швидкості протікання хімічної реакції між горючою речовиною і окислювачем, і, отже, від кінетики відповідної реакції горіння. Швидкість кінетичного горіння сильно залежить від температури, при якій відбувається процес.

Процеси горіння заздалегідь змішаних газів називаються вибуховими. Так горіння в пальнику Бунзена являє собою стаціонарний вибух, процес самоспалахування - самовільний тепловий вибух. Найчастіше кінетичне горіння спостерігається при пожежах технологічного обладнання на стадії виникнення горіння (при самоспалахуванні або запалюванні), а також при поширенні горіння.

Кінетичне горіння - найбільш просте, яке піддається теоретичному аналізу, внаслідок чого воно є найбільш вивченим.

Внаслідок горіння утворюються гарячі продукти згорання і відбувається їх теплове розширення. Якщо горіння відбувається в замкненому об'ємі або з великою швидкістю, то воно супроводжується підвищенням тиску

Стосовно до кінетичного горіння горючих сумішей в залежності від тиску продуктів горіння на практиці умовно розрізняють такі види кінетичного горіння як "спалах", "хлопок" і "вибух".

Спалах – швидке згорання газоповітряної суміші, яке відбувається в відкритому просторі, збільшення тиску продуктів згорання при цьому не відбувається.

Хлопок – швидке згорання газоповітряної суміші, яке відбувається в закритому просторі, супроводжується незначним підвищенням тиску, яке викликає лише звукові ефекти, але руйнування конструкцій при цьому не спостерігається.

Вибух – це швидке екзотермічне згорання, що супроводжується різким виділенням значної кількості енергії і утворенням стислих газів, здатних виконувати роботу.

Вибух відрізняється більшою швидкістю поширення фронту полум'я і різкою зміною тиску, яка може стати причиною руйнування технологічного обладнання і будівельних конструкцій.

Тиск при вибуху можна оцінити, використовуючи рівняння стану ідеального газу для початкової суміші і для продуктів горіння:

$$P_0 V_0 = \sum n_{\text{поч}} R T_0 \qquad P_{\text{виб}} V_{\text{виб}} = \sum n_{\text{пр}} R T_{\text{виб}}$$

де T_0 , P_0 , V_0 - початкові температура, тиск і об'єм горючої суміші;

$T_{\text{виб}}$, $P_{\text{виб}}$, $V_{\text{виб}}$ - температура, тиск і об'єм продуктів горіння;

$\sum n_{\text{поч}}$ - число молів початкової суміші, моль;

$\sum n_{\text{пр}}$ - число молів продуктів горіння, моль;

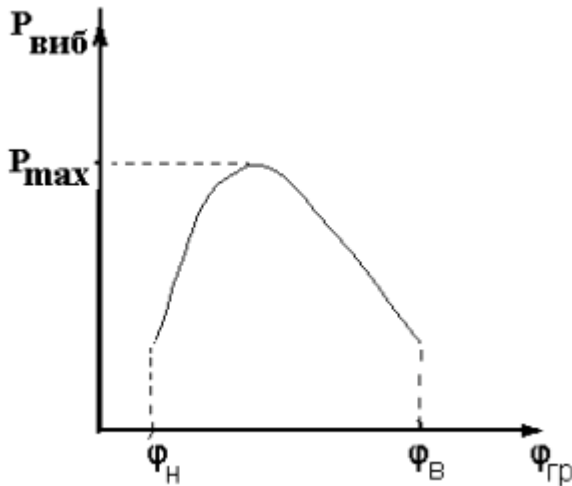
R - універсальна газова стала.

Оскільки згоряння горючої суміші за рахунок великої швидкості реакції відбувається без теплового розширення і, отже, без зміни об'єму середовища, то для розрахунку тиску при вибуху можна використати формулу:

$$P_{\text{виб}} = \frac{P_0 n_{\text{пр}}^0 T_{\text{виб}}}{n_{\text{ГР}} T_0}, \text{кПа}$$

З формули видно, що тиск при вибуху залежить від виду горючої речовини, початкового тиску в системі, температури вибуху і відношення числа молей продуктів згоряння до числа молей початкової горючої суміші.

При вибуху стехіометричної суміші температура горіння має найбільше значення, отже, і тиск при вибуху буде максимальним.



Зниження або підвищення концентрації горючої речовини приведе до наявності надлишку газу, який не бере участі в хімічній реакції, за рахунок цього до збільшення тепловтрат і зниження температури горіння. Тиск при вибуху при цьому також знизиться.

При заміні повітря в горючій суміші киснем тиск при вибуху різко збільшиться, так як знижується кількість молей початкової суміші (1 моль ГР + b молів кисню замість 1 моль ГР + 4,76 b молів повітря), при цьому збільшується температура горіння (не тратиться значна кількість тепла на нагрівання азоту, присутнього в повітрі). Так при горінні стехіометричної суміші метану з киснем тиск, що утворюється при вибуху, збільшується майже в 2 рази в порівнянні з газоповітряною сумішшю.

Для того щоб розрахунковим способом визначити тиск при вибуху, необхідно знати температуру вибуху. Визначити температуру вибуху можна методом лінійної інтерполяції (також як і температуру горіння речовини). Оскільки горіння при вибуху відбувається дуже швидко, і гази, що утворилися не встигають розширитися, то з курсу термодинаміки Ви знаєте, що такий процес називається адіабатним і ізохорним, тобто без тепловтрат в довілля і при постійному об'ємі. Згідно з першим законом термодинаміки зміна ентальпії системи рівна:

$$H = U + PV; \quad PV = nRT.$$

Внутрішня енергія продуктів горіння при певній температурі T буде рівна:

$$U^T = \sum (H_i^T n_{\text{пр } i}) - RT \sum n_{\text{пр } i},$$

Енергія вибуху – це зміна внутрішньої енергії системи між кінцевим і початковим станом.

$$Q_{\text{виб.}} = (U_{\text{пр}} - U_{\text{поч}})$$

Після нескладних перетворень можна отримати вираження:

$$Q_{\text{виб.}} = Q_{\text{н}} + RT_0 \Delta n$$

Тоді температуру вибуху можна розрахувати по формулі:

$$T_{\text{виб}} = T_1 + \frac{(T_2 - T_1) \cdot (Q_{\text{виб}} - Q_{\text{пр}}^{T1})}{(Q_{\text{пр}}^{T2} - Q_{\text{пр}}^{T1})}$$

Тиск при вибуху є одним з параметрів пожежної небезпеки речовин і матеріалів. Ви будете розраховувати його на профілактиці в будівництві при розрахунку площі конструкцій, що легко скидаються, на профілактиці в технології при визначенні категорії промислових об'єктів.

§ 2. Поширення кінетичного горіння.

Однією з фундаментальних властивостей полум'я є здатність його до самовільного поширення. В залежності від механізму поширення хвилі реакції в просторі по газовим сумішам розрізняють два різних режими горіння - із надзвуковою швидкістю, детонаційне горіння, і дозвуковою швидкістю, дефлаграційне горіння.

Дефлаграційне горіння – це режим поширення полум'я, що відбувається зі швидкостями значно меншою звукової і обумовлений молекулярними процесами теплопровідності і дифузії. При поширенні полум'я тепло, що виділилося при хімічній реакції, теплопровідністю передається в сусідню ділянку газу, який ще не прореагував, нагріває його і ініціює активну хімічну реакцію.

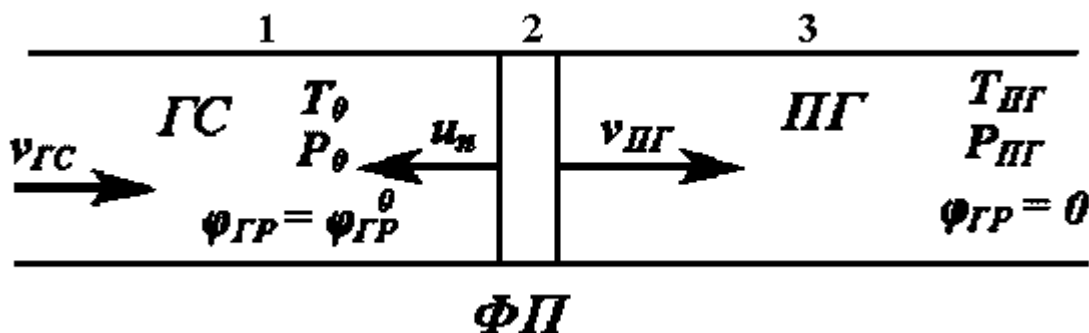
Детонаційне горіння – обумовлено швидким стисненням речовини в ударній хвилі. Різке підвищення тиску в ударній хвилі забезпечує необхідне нагрівання речовини для того, щоб реакція пішла зі значною швидкістю. У свою чергу, виділення тепла в хімічній реакції підтримує постійну інтенсивність ударної хвилі і тим самим забезпечує її поширення на великі відстані.

§ 2.1. Дефлаграційне горіння.

Виникнув внаслідок впливу теплового імпульсу достатньої потужності (наприклад, джерела запалювання), полум'я надалі самостійно переміщується з деякою швидкістю в напрямі свіжої горючої суміші, при цьому його поширення супроводжується випромінюванням світла і тепла.

Поширення полум'я по однорідному горючому середовищі відбувається внаслідок поширеного розігрівання початкової суміші по механізму теплопровідності від продуктів горіння.

Основна задача теорії горіння - встановлення залежності швидкості поширення полум'я від швидкості хімічної реакції і теплофізичних властивостей горючої суміші. Для розуміння механізму поширення полум'я по суміші горючого газу і окислювача розглянемо принципову схему:



Початкову горючу суміш (1) від продуктів горіння (3) відділяє вузька зона, звана фронтом полум'я (2).

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

У залежності від умов протікання процесу горіння фронт полум'я може бути нерухомим або рухомим. У першому випадку має місце стаціонарне полум'я, а у другому - нестаціонарне.

Стаціонарне полум'я встановлюється при рівності швидкості витікання свіжої горючої суміші і швидкості зустрічного переміщення фронту полум'я, тобто полум'я нерухоме в тому випадку, коли кількість газу, що згоряє, повністю компенсується кількістю газу, що поступає. Таке горіння можна спостерігати на бунзеновському пальнику, де просторове розташування фронту полум'я фіксоване.

Нестаціонарне полум'я утвориться при виникненні горіння в об'ємі нерухомої горючої суміші або у випадку, коли швидкість руху горючого газу менше швидкості поширення горіння.

стаціонарне $V_{\text{фп}} = V_{\text{гс}}$

нестаціонарне $V_{\text{фп}} > V_{\text{гс}}$ – проскок полум'я

$V_{\text{фп}} < V_{\text{гс}}$ – зрив полум'я

Швидкість руху горючих сумішей повинна бути більше швидкості поширення полум'я для того, щоб запобігти "проскоку полум'я" - поширення горіння в напрямі, протилежному руху суміші.

На швидкість поширення фронту полум'я діють два визначальних чинники: швидкість потоку горючого газу і нормальна швидкість горіння - незмінна величина, характерна для даної горючої суміші.

Нормальна швидкість горіння U_n - швидкість, з якою рухається фронт полум'я відносно нерухомого горючого газового середовища.

$U_n = dx/dt$,

де x - відстань, яка пройдена фронтом полум'я по нормалі до поверхні фронту за час t .

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

Однак, розширення гарячих продуктів горіння, що утворилися, дає відчутне додаткове зміщення поверхні горіння, тому швидкість поширення фронту полум'я буде більшою, ніж нормальна швидкість горіння:

$V_{\text{фп}} = U_n \varepsilon$

де ε - коефіцієнт розширення, який показує у скільки разів температура продуктів горіння більша температури вихідної горючої суміші.

При викривленні плоского полум'я і збільшенні його поверхні швидкість поширення фронту полум'я теж зростає.

$V_{\text{фп}} = U_n F/S$

де F – поверхня полум'я,

S – площа поперечного перетину потоку.

На практиці найбільш поширене турбулентне горіння. Турбулізація різко інтенсифікує процес масообміну, і отже, швидкість горіння буде пропорційна нормальній швидкості горіння і відносному збільшенню поверхні горіння:

$U_T = U_n F_T / F_L$

F_T - сумарна поверхня фронту горіння при турбулізації;

F_L - поверхня фронту полум'я при ламинарному горінні.

Знання швидкості поширення полум'я в газових сумішах дозволяє визначити безпечні швидкості газоповітряних потоків в трубопроводах, по яких транспортується горючі газо-пароповітряні суміші.

Представляє інтерес механізм, який лежить в основі процесу поширення горіння. Існує дві теорії, що пояснюють механізм поширення кінетичного полум'я, - дифузійна і теплова.

Згідно з дифузійною теорією переміщення зони горіння в просторі пов'язане з дифузією активних часток - радикалів із зони хімічної реакції. Ці частки, що утворюються у фронті полум'я, настільки хімічно активні, що здатні активізувати реакцію горіння навіть в холодній суміші. При стаціонарних умовах масоперенос АЦП за рахунок їх дифузії визначається як:

$$g = - D_0 \, dn/dx$$

де D_0 - коефіцієнт дифузії, м²/с;

n - концентрація активних центрів, кмоль/м³

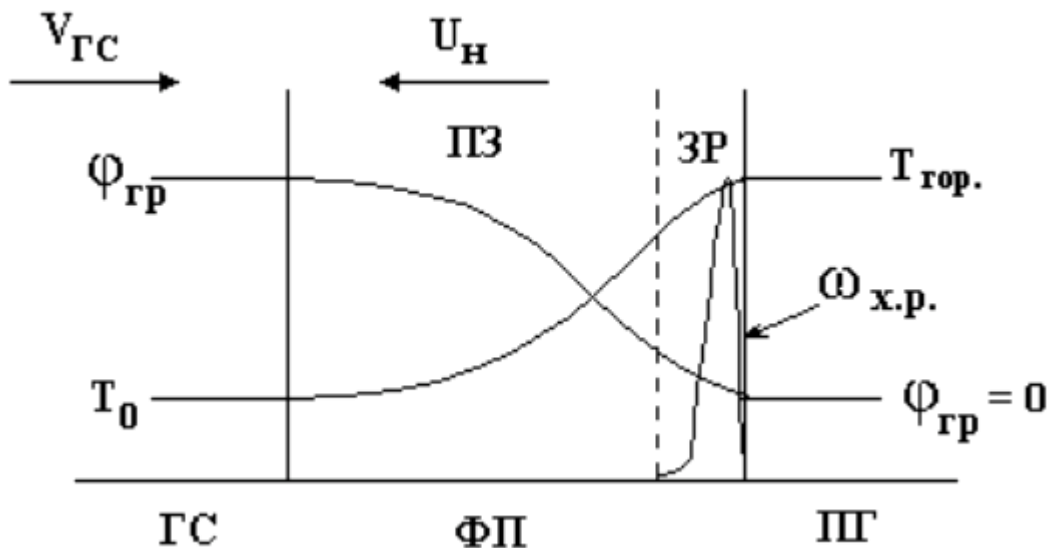
Однак, якщо брати до уваги лише дифузійну теорію радикалів в холодну суміш, то їх концентрація буде недостатньою для виникнення і протікання реакції горіння, оскільки значна частина активних центрів гине в потрійних зіткненнях, а також конвекційно уноситься потоком продуктів горіння.

Ван-Тигелен передбачив, що відбувається не просто дифузія радикалів в холодну суміш, але і виникнення розгалужених ланцюгових реакцій, які компенсують реакції загибелі активних центрів. Це приводить до збільшення швидкості хімічної реакції аж до переходу окислення в горіння.

Суть теплової теорії полягає в тому, що фронт полум'я рухається в просторі за рахунок передачі потоку тепла із зони горіння теплопровідністю в свіжу горючу суміш. Під дією цього тепла відбувається розігрівання суміші до критичної температури, внаслідок чого відбувається різке збільшення швидкості хімічної реакції, що закінчується виникненням полум'яного горіння. Оскільки тепловий потік передається безперервно, відбувається постійне послідовне запалення горючої суміші.

2.2. Структура дефлаграційного фронту полум'я.

Розглянемо розподіл температури і концентрації горючої речовини у фронті полум'я і прилеглому просторі. Графік розподілу концентрації і температури має вид:



У зоні початкової суміші концентрація горючого компонента не змінюється, так як хімічна взаємодія між ними не протікає. Температура суміші рівна початковій T_0 . Безпосередньо перед фронтом полум'я концентрація реагентів знижується внаслідок розбавлення початкової системи продуктами горіння. Температура внаслідок молекулярної теплопровідності монотонно підвищується від початкової T_0 до температури $T_{сн}$, при якій починають протікати хімічні реакції. Цю зону називають підготовчою зоною фізичного прогрівання.

У фронті полум'я внаслідок протікання хімічної реакції концентрація початкових компонентів знижується до нуля, а температура підіймається до температури горіння. 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.

Таким чином, фронт полум'я прийнято розмежовувати на зону реакції і підготовчу зону. У першій зоні протікають реакції, з якими пов'язана основна частка тепловиділення. Інтенсивна реакція в цій зоні підтримується дифузійним перенесенням речовин горючої суміші з сусідньої, більш низькотемпературної області - зони підігрівання. У підготовчій зоні швидкість хімічних реакцій невелика, однак в ній відбувається найбільша зміна температури внаслідок передачі тепла із зони реакції молекулярною теплопровідністю, відбувається підігрівання газу до критичної температури (близької до температури самоспалахування, але не рівної їй).

Товщина фронту полум'я може бути представлена як сума товщини зон фізичного підігрівання і хімічної реакції. Вона змінюється зворотно пропорціонально швидкості горіння:

$$\delta_{ф.п} = \delta_n + \delta_p.$$

$$\delta_{ф.п} \sim a_t / U_n$$

Для визначення швидкості поширення фронту полум'я необхідно вирішити рівняння теплового балансу процесу горіння з урахуванням теплопередачі теплопровідністю, масопереносом і тепловиділення хімічних екзотермічних реакцій при підвищенні температури. Загальне рівняння теплового балансу має вид:

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

Перший член рівняння характеризує тепловий потік внаслідок молекулярної теплопровідності, другої - внаслідок конвекційного потоку, третій - внаслідок тепла хімічної реакції.

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

$$U_n = \frac{\sqrt{2Q_n w_{xp} \lambda R T_\Gamma^2 / E_{акт}}}{c_p \rho (T_\Gamma - T_0)}$$

З цієї формули можна побачити ті чинники, які впливають на швидкість поширення полум'я по газоповітряній суміші:

теплотворна здатність горючої речовини;

теплофізичні характеристики газової суміші (λ , c_p , ρ);

початкової температури газової суміші;

параметри, що характеризують швидкість хімічної реакції (концентрації горючої речовини, окислювача, флегматизатора, тиск, наявність інгібіторів або каталізаторів).

Теорія дефлаграційного горіння не накладає будь-яких обмежень на можливість зменшення швидкості U_n . Здавалося б, вона може зменшуватися до нуля, а величина температури в зоні горіння до температури навколишнього середовища. Однак досвід показує, що величина U_n не може ставати менше певного критичного значення. Тому поширення полум'я в сумішах пального і окислювача можливе тільки в обмеженому діапазоні їх концентрацій. 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.

Фронт полум'я характеризується наступними параметрами:

Товщиною зони реакції -

$$10^{-4} - 10^{-3} \text{ см}$$

Товщиною зони підготовчих процесів - $10^{-3} - 10^{-2}$ см
Температурою у фронті - 1700 -3000 К
Часом перебування молекул в зоні реакції - $10^{-7} - 10^{-5}$ с.

ВИСНОВОК: Розподіл механізму поширення полум'я на тепловий і дифузійний є умовним. Реально при горінні речовини відбувається одночасне перенесення активних центрів із зони реакції горіння і прогрівання холодної суміші теплопередачею, тобто має місце дифузійно-тепловий механізм поширення полум'я. Знання механізму поширення полум'я дозволяє зрозуміти такі поняття як концентраційні межі запалення парогазових сумішей, вибух, тиск при вибуху, перехід дефлаграційного горіння в детонаційне.

2.3. Перехід дефлаграції в детонацію.

При поширенні горіння в газових сумішах можна розглядати різні режими поширення полум'я. При відносно невеликих швидкостях відбувається пошарове запалення холодної газової суміші за рахунок нагріву від зони горіння теплопровідністю. Однак, поширення горіння може відбуватися не тільки по механізму дефлаграцій - передачі імпульсу горіння теплопровідністю, але і передачею іншого імпульсу нагрівання - швидким адіабатичним стисненням. Такий механізм горіння називається детонацією.

Детонація може виникнути у вибуховому середовищі у разі його попереднього стиснення досить сильною ударною хвилею. Таку хвилю може створити зовнішній імпульс (наприклад згоряння вибухової речовини).

При різкому локальному підвищенні тиску в газі він вирівнюється не вмиг. Виникає хвиля стиснення - ударна хвиля, яка розповсюджується з великою швидкістю (порядку швидкості звуку). Стиснення відбувається досить швидко, так що між шарами газу не встигає відбуватися теплообмін. Характерною особливістю ударного стиснення є сильне нагрівання газу (до 1500-1700К). Вибухове середовище, нагріте сильною ударною хвилею до такої температури, самоспалахує, при цьому період індукції скорочується до $10^{-5} - 10^{-7}$ с.

Мимовільне виникнення детонації в газі, 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.

Розглянемо, в яких умовах швидкість полум'я досягає таких значень.

Найбільш сприятливими умовами виникнення детонації є горінні в довгих трубах. При горінні в трубах форма фронту полум'я залежить від швидкості поширення горіння. Швидкий рух газу в трубі і супроводжує його тертя об стінки приводять до витягнення полум'я і прискорення горіння. Фронт полум'я починає вібрувати, відбувається його турбулізація.

Зі збільшенням турбулізації збільшується площа реакції горіння, а отже тепловиділення і швидкість поширення фронту полум'я. Газоподібні продукти горіння збільшуються в об'ємі і починають грати роль поршня: надмірним тиском виштовхують холодну горючу суміш. Таким чином перед фронтом полум'я відбувається стиснення початкової газової суміші і підвищення тиску в ній, утворюється ударна хвиля.

Стиснення в ударній хвилі практично вмиг збільшує густину і температуру газу, що в свою чергу спричиняє збільшення швидкості хімічної реакції і отже швидкості поширення фронту полум'я. По мірі прискорення поширення полум'я відбувається наростання тиску в ударній хвилі. Нова ударна хвиля розповсюджується по вже стислому і нагрітому попередньою хвилею газу з більшою швидкістю. На певній відстані друга, більш швидка хвиля наздожене першу, вони зіллються, їх амплітуди складуться, в результаті виникне нова більш потужна ударна хвиля. Відбиті від захищаючих поверхонь ударні хвилі можуть накладатися одна на іншу. При цьому також різко збільшується амплітуда ударної хвилі і, отже, тиск. Накладення послідовних хвиль приводить до стрибкоподібної зміни властивостей речовини в ударній хвилі, яка набуває характеру розриву - виникає детонаційна хвиля.

Необхідне для виникнення детонації прискорення горіння відбувається після проходження полум'ям певного шляху, тобто необхідний відповідний переддетонаційний розгін від точки запалювання. Чим більше початковий тиск, нормальна швидкість горіння, тим коротша переддетонаційна відстань. Детонація в трубі виникає набагато легше, якщо стінки труби пошерхлі, що прискорює турбулізацію.

Швидкість детонації визначається властивостями речовини і залежить тільки від її теплотворної здатності і від відношення теплоємностей і не залежить від кінетики реакції:

$$D = \sqrt{2Q_n(\gamma^2 - 1)}, \quad \gamma = C_p/C_v$$

Таким чином, можна сформулювати основні відмінні особливості детонаційного горіння:

- механізм поширення горіння пов'язаний тільки зі стисненням, але не з теплопровідністю;
- детонаційна хвиля являє собою комплекс з ударної хвилі і наступної за нею зони тепловиділення за рахунок реакції;
- продукти реакції рухаються в одному напрямі із зоною реакції (при дефлаграції - в різні);
- швидкість детонації залежить тільки від термодинамічних характеристик речовини і тому має єдине суворо фіксоване значення (на відміну від швидкості поширення фронту дефлаграційного горіння);
- тиск в детонаційній хвилі в декілька разів перевищує тиск адіабатичного згорання в замкненій судині, що зумовлює її велику руйнівну силу;
- механічна дія детонації не залежить від того, чи виникає вона у відкритому або закритому просторі.

Висновок: Можливість прискорення горіння в трубах і виникнення детонації робить газопроводи і довгі апарати з нерівною шероховатою внутрішньою поверхнею дуже небезпечними об'єктами в тому випадку, якщо в них може утворюватися вибухова середа. Ця небезпека зростає в тих випадках, коли така труба сполучена з великою місткістю, утримуючий той же вибуховий газ.

Глава 2. Горіння рідин.

Більшість промислових підприємств зберігають, споживають і виробляють горючі рідини. Серед найбільш великих підприємств такого роду можна назвати хімічні, коксохімічні, нафтопереробні заводи, резервуарні парки з нафтопродуктами і скрапленими газами. Об'єкти нафтогазовидобувного комплексу, які мають високий рівень пожежовибухонебезпеки відносяться до об'єктів підвищеної небезпеки. Кожна шоста аварія на промислових підприємствах пов'язана з вибухами і пожежами горючих рідин. Горіння рідин розвивається вельми швидко, а пожежі нерідко приймають затяжний характер, можуть супроводжуватися загибеллю людей, значним руйнуванням технологічного обладнання і вимагають для гасіння великої кількості пожежної техніки і особового складу підрозділів МНС.

ПРИКЛАД

На хімічному підприємстві на установці по виробництву капролактаму обертається горюча рідина циклогексан при температурі 150°C і тиску 10 атмосфер. В відділенні окислення циклогексану внаслідок порушення технологічного процесу відбувся вибух.

Вибух відірвав трубопровід, який був поєднаний до реакційної ємності. Почалося витікання і швидке випаровування циклогексану. Утворилася хмара з вибухонебезпечною концентрацією. Діаметр цієї хмари досяг 200 м. Через 45 секунд ця хмара зайнялася. Другий вибух по потужності був еквівалентним 45 тонам тринітротолуолу.

Вибух викликав руйнування будівель, розрив труб та резервуарів. Полум'я охопило площу 45 000 м², висота його досягла 100 м. Цегла плавилася, сталеві конструкції горіли. Все пожежне обладнання було зруйновано.

Вибухом вбито 29 осіб, поранено – 39.

Через три доби від впливу високих температур зруйнувалась ємність з рідким аміаком. Значно погіршилися умови гасіння.

В ліквідації цієї аварії приймали участь 250 пожежних, 23 з них було поранено.

§ 1. Загальні закономірності випаровування та горіння рідин.

Для механізму горіння рідин найважливішою обставиною є те, що температура їх кипіння завжди нижче за температуру самоспалахування. Перше ніж виникне горіння, відбудеться процес випаровування. Внаслідок цього горіння рідин можливе тільки в паровій фазі, отже, виникає гомогенне горіння. Рідина частково випаровується, над її поверхнею утворюється пароповітряна суміш, в якій концентрація горючої речовини може досягти НКМПП. Під впливом джерела запалювання виникає горіння пароповітряної хмари в кінетичному режимі. Такі умови можуть виникнути при випаровуванні рідини в відкритий простір або всередині технологічного обладнання, в якому обертається горюча рідина. В процесі сталого горіння рідини пара змішується з повітрям в зоні горіння, отже, процес сталого вигорання носить дифузійний характер.

Згорання пари, що утворилася, відбувається інтенсивно, практично негайно після її появи і змішування з навколишньому повітрі, тому швидкість горіння рідини визначається лише швидкістю випаровування рідкої фази як найбільш повільного процесу.

Таким чином, горіння рідин, з одного боку, є горіння її пари, тобто гомогенний хімічний процес, з іншого боку, швидкість горіння визначається швидкістю фізичного процесу – випаровування, яке залежить від умов теплообміну. Відповідно цьому закономірності згорання рідкої фази визначаються характером фізичних закономірностей, для яких типовою є наявність взаємодії між середовищами, що знаходяться в різних агрегатних станах, в даному випадку між газовим середовищем і рідиною.

1.1. Випаровування рідин. Тиск насиченої пари.

Як відомо, багато речовин можуть знаходитися в трьох агрегатних станах: в твердому, рідкому і газоподібному. При певних умовах ці фази можуть співіснувати в фазовий рівновазі, а при порушенні цієї рівноваги відбувається перехід однієї фази в іншу.

Перехід речовини з рідкого стану в газоподібний з вільної поверхні при температурах нижче за температуру кипіння називається процесом випаровування.

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 по вибуховій і пожежній небезпеці. Рідини, що мають низьку теплоту пароутворення, прийнято називати летючими рідинами.

За рахунок броунівського руху в газовій фазі має місце і зворотний фазовий перехід - процес конденсації.

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

$$W_{\text{вип}} = \frac{m_{\text{вип}}}{\tau_{\text{вип}}}$$

Інтенсивність випаровування кількість рідини, що випарувалася з одиниці поверхні в одиницю часу.

$$I_{\text{вип}} = \frac{m_{\text{вип}}}{\tau_{\text{вип}} \cdot S_{\text{вип}}}$$

Інтенсивність випаровування залежить від:

- роду рідини (теплоти випаровування),
- температури рідини,
- тиску газової фази;
- 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 в нерухоме газове середовище, динамічна - коли рідина випаровується в газове середовище, яке рухається. Швидкість динамічного випаровування більше, ніж статичного при однаковій температурі.

Рідина може випаровуватися у відкритий або закритий простір. При досить тривалому випаровуванні в закритому просторі встановлюється динамічна рівновага - стан системи, при якому кількість рідини, що випаровується, дорівнює кількості сконденсованої пари. Тобто скільки речовини випарується, стільки ж і перейде зворотню з газової фази в рідку. Відбувається насичення газової фази.

Пара, що утворилася при динамічній рівновазі в системі, називається насиченою парою.

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, як насиченої, так і ненасиченої, маючи кінетичну енергію, чинять тиск на стінки судини, в якій знаходиться пара. 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 речовини, що переходить в газоподібний стан, отже концентрація пари зростає, при цьому тиск також збільшується.

При заданій температурі тиск насиченої пари рідини завжди вище, ніж ненасиченої, так як при випаровуванні у відкритий простір частина пари весь час буде дифундувати в довкілля.

Тиск насиченої пари створюється саме порцією пари, тому називається парціальним тиском або пружністю насиченої пари.

Залежність між тиском і концентрацією пари можна знайти з співвідношення:

100 % парогазової суміші — $P_{\text{заг}}$.

$\varphi_{\text{нп}}$ % пари рідини — $P_{\text{нп}}$

Звідси можна виразити концентрацію насиченої пари через її тиск і навпаки:

$$\varphi_{\text{нп}} = 100 \frac{P_{\text{нп}}}{P_{\text{заг}}}, \%$$
$$P_{\text{нп}} = P_{\text{заг}} \frac{\varphi_{\text{нп}}}{100}, \text{кПа}$$

Таким чином, тиск насиченої пари залежить від температури і властивостей рідини і не залежить від кількості рідини або площі її випаровування.

Числові значення тиску насиченої пари використовуються:

при розрахунку кількості рідини, яка випарувалася і утворила вибухонебезпечну пароповітряну хмару;

при визначенні ступеню пожежної небезпеки насиченої пари горючих рідин;

при розрахунку критичних температур рідини, яка міститься в закритому технологічному обладнанні.

ПРИКЛАД

В 1989 році внаслідок порушення порядку роботи на залізничній станції біля міста Алма-Ати (республіка Кзахстан) відбулося зіткнення тепловозу із цистерною, в якій знаходився скраплений рідкий пропан. В цистерні було пробито отвір, через який струмінь пропану під тиском 10 атмосфер почав витікати з ємності і випаровуватися.

Від іскри тепловозу відбувся спалах газоповітряної суміші. В осередок пожежі потрапила непошкоджена цистерна і через 15 хвилин тиск в ній збільшився в 5 раз. Відбувся вибух, утворилася вогненна куля діаметром 150 метрів.

В гасінні прийняло участь більш ніж 200 робітників пожежної охорони, 9 з них загинуло під час проведення бойових дій, ще 20 осіб загинуло від опіків.

1.2. Розрахункові методи визначення тиску насиченої пари.

1) Фазовий перехід речовини з рідкого стану в газоподібний описується рівнянням Клапейрона-Клаузіуса, яке визначає залежність тиску пари від температури і виду рідини.

$$\frac{d \ln P}{dT} = \frac{\Delta H_{\text{вип}}}{RT^2}$$

Для того щоб розрахувати тиск насиченої пари при будь-якій температурі інтегруємо рівняння Клапейрона-Клаузіуса, вважаючи, що значення теплоти пароутворення не залежить від температури

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{\Delta H_{\text{вип}}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

Розрахувати тиск насиченої пари при будь-якій температурі можна після визначення по довідниках теплоти пароутворення рідини і тиску пари при певній температурі.

2) Тиск насиченої пари рідини або їх сумішей можна визначити, використовуючи рівняння Антуана:

$$\lg P_{\text{нп}} = A - \frac{B}{t_{\text{рід}} + C_a} \quad P_{\text{нп}} = 10^{A - \frac{B}{t_{\text{рід}} + C_a}}$$

де P - тиск пари, кПа;

T - температура, °C;

A, B, C_a - константи, що визначаються для кожної рідини по таблицях.

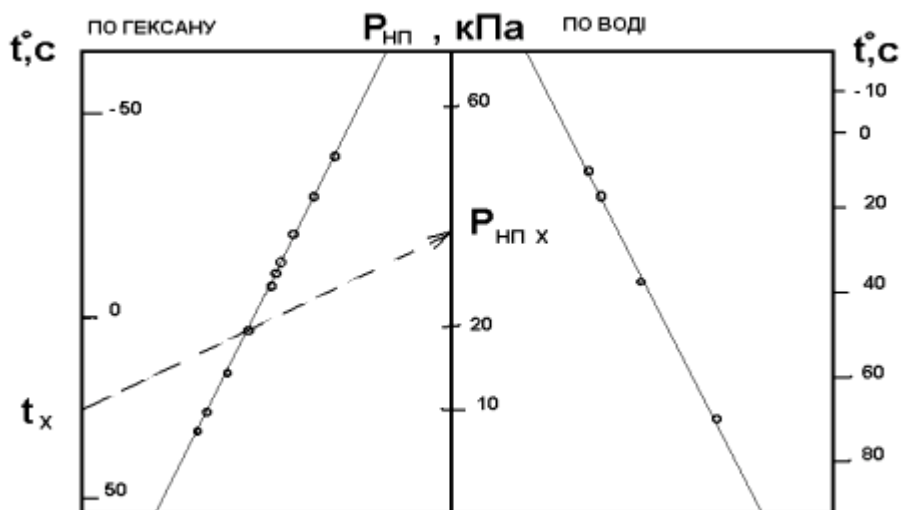
3) Для багатьох поширених горючих рідин тиск насиченої пари визначений для ряду температур і зведений в довідниках у вигляді таблиць. Для таких речовин можна розрахувати тиск насиченої пари при будь-якій температурі за методом лінійної інтерполяції

$$t_{\text{фак}} \rightarrow \left\langle \frac{t_1 \rightarrow P_{\text{нп}}(t_1)}{t_2 \rightarrow P_{\text{нп}}(t_2)} \right\rangle \rightarrow P_{\text{нп}}$$

Значення T₁, T₂ і відповідні ним P₁, P₂ визначаються по таблицях.

$$P_{\text{нп}}(t_x) = P_{\text{нп}}(t_1) + \frac{(t_x - t_1)(P_{\text{нп}}(t_2) - P_{\text{нп}}(t_1))}{t_2 - t_1}$$

4) У практиці більш зручно користуватися номограмою, розрахованою Кіреєвим. У середині номограми приведена шкала пружності пари, загальна для всіх рідин. По боках розташовані шкали температур (ліва - по гексану, права - по воді). Кожній рідині на номограмі відповідає своя точка; пряма, яка проходить через цю точку перетинає шкали температури і тиск пари, тобто показує, яка пружність пари при даній температурі.



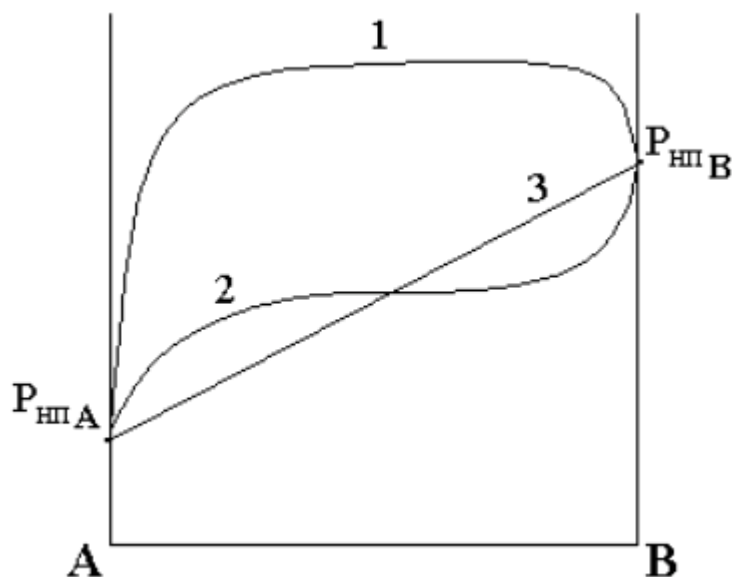
Для сумішей рідин

На практиці дуже часто доводиться мати справу з різними сумішами горючих рідин.

Рідини при змішанні поведуться по-різному. Розрізняють наступні суміші рідин:

1. Суміші рідин, нерозчинних одна в одній.
2. Суміші рідин, частково розчинних одна в одній;
3. Суміші рідин, добре розчинних одна в одній;

Залежність тиску суміші двох рідин від складу можна відобразити графічно:



Як видно з графіка, пружність парів двох нерозчинних рідин (пряма 1) не залежить від складу суміші, а тільки лише від тиску пари компонентів. Тиск пари сумішей нерозчинних один в одному рідин визначається як сума тиску компонентів суміші:

$$P_{нп. сум.} = \sum P_{нп. i}$$

Пружність парів суміші частково розчинних рідин зображена кривою 2 (суміші діетилового ефіру з водою).

Суміш повністю взаєморозчинних рідин створює тиск пари, зображений прямою 3. Тиск насиченої пари суміші таких рідин визначається за формулою:

$$P_{нп. сум.} = \sum P_{нп. i} \Gamma_i$$

де $P_{нп. сум.}$ - тиск насиченої пари суміші горючих рідин;

$P_{\text{нп},i}$ - тиск насиченої пари і-го компоненту;
 Γ_i – мольна частка і-го компоненту в суміші рідин.

При нагріві суміші відбувається одночасне випаровування всіх її компонентів незалежно від їх температури кипіння і теплоти випаровування. Концентрація насиченої пари кожного компоненту в парогазовому середовищі буде визначатися вмістом цього компоненту в суміші рідин і його парціальним тиском при заданій температурі:

$$\varphi_i = 100 \frac{P_{\text{нп},i} \Gamma_i}{P_{\text{нп},\text{сум}}}, \%$$

Для того щоб визначити ступінь пожежної небезпеки суміші рідин, необхідно порівняти фактичну концентрацію насиченої пари, що утворилася при заданих умовах, з концентраційними межами, розрахованими по формулі Ле-Шательє.

$$\varphi_{\text{нп},\text{сум}} (\text{факт}) = 100 \frac{P_{\text{нп},\text{сум}} (\text{факт})}{P_{\text{заг}}}, \%$$

$$\varphi_{\text{м сум}} = \frac{\sum \varphi_i}{\sum \frac{\varphi_i}{\varphi_{\text{мі}}}}$$

У деяких випадках, коли технічні суміші рідин широко поширені (такі, наприклад, як бензин), в довідниковій літературі для них є константи Антуана. Тоді тиск насиченої пари такої суміші при будь-якій температурі можна розрахувати за рівнянням Антуана.

ВИСНОВОК: Знання тиску насиченої пари рідини дозволяє визначати міру її пожежної небезпеки при різних температурах, розрахувати концентрацію пари в технологічних апаратах (сховищах, реакторах), визначати температури рідини, які відповідають межах вибуху.

§ 2. Температурні межі поширення полум'я.

§ 2.1. Поняття ТМПП і їх зв'язок з КМПП рідини.

Отже, ми з'ясували, що тиск насиченої пари визначається її концентрацією і залежить від температури рідини. Отже, природно передбачити, що концентрація насиченої пари також буде пов'язана з температурою рідини.

Для того, щоб визначити безпосередній зв'язок між температурою рідини та концентрацією насиченої пари, яка утворилася над поверхнею рідини при цій температурі, треба в рівнянні Антуана тиск насиченої пари виразити через її концентрацію. Перетворивши рівняння Антуана, отримаємо:

$$t = \frac{B}{A - \lg P_{\text{нп}}} - C_a = \frac{B}{A - \lg(0,01 P_{\text{заг}} \varphi_{\text{нп}})} - C_a$$

Ця формула безпосередньо зв'язує температуру рідини і концентрацію її насиченої пари.

При певних температурах концентрація насиченої пари рідини стає рівною нижній або верхній концентраційній межі поширення полум'я. Таким чином, пожежну небезпеку горючих рідин можна оцінювати не по концентрації її пари, а по температурі самої рідини. Тому замість концентраційних меж можна указати температуру рідини, при якій ця концентрація утвориться.

Такі температури називаються температурними межами поширення полум'я. Як і для концентраційних меж можна визначити нижню і верхню температурну межу поширення полум'я рідини.

Температурними межами поширення полум'я (нижньою або верхньою) називаються такі температури рідини, при яких над її поверхнею утвориться насичена пара в концентрації, рівній відповідно нижній або верхній концентраційній межі поширення полум'я.

При температурах нижче нижньої температурної межі концентрація насиченої пари буде нижче нижньої концентраційної межі і, отже, буде безпечною.

При температурі вище верхньої температурної межі рідина утворить насичену пару, яка в суміші з повітрям в закритому об'ємі запалати не можна, тобто кінетичного вибухового горіння не буде. Однак, якщо підпалити такі багаті суміші насичених парів при виході з ємності в повітря, то вони можуть горіти в дифузійній області. Отже, насичені пари в даній області температур є вибухобезпечними, але пожежонебезпечними.

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 окислювача в окислювальному середовищі;
3. загальний тиск;
4. домішки негорючих парів і газів;
5. домішки негорючих рідин.

При збільшенні потужності джерела запалювання та концентрації кисню в окислювальному середовищі температурні межі розширюються (нижня межа зменшується, а верхня межа збільшується). При збільшенні вмісту негорючих газів в парогазовому середовищі (наприклад, введення в повітря домішок азоту або вуглекислого газу) або домішки негорючих рідин звужують температурні межі поширення полум'я (нижня межа збільшується, а верхня межа зменшується). При збільшенні загального тиску інтенсивність випаровування зменшується, а, отже зменшується концентрація пари. Тому для досягнення концентраційних меж потрібно збільшити інтенсивність випаровування за рахунок збільшення температури. Таким чином, при підвищенні загального тиску і нижня, і верхня температурні межі поширення полум'я збільшуються.

Отже, так само як і для газів, для горючих рідин існують безпечні параметри експлуатації – безпечні температурні межі. Таким чином, для рідин характерними є наступні області концентрацій і температур:



- де БК – область безпечних концентрацій;
 НК – область вибухонебезпечних концентрацій;
 ВНК – область вибухонебезпечних концентрацій.
 ВБК, ПНК – область вибухобезпечних але пожежонебезпечних концентрацій.

2.2. Визначення ТМПП. Практичне значення ТМПП

Для забезпечення пожежної безпеки технологічних процесів, в яких обертаються горючі рідини, потрібно знати такі параметри як ТМПП. Їх визначити можна як практично, провівши експериментальні дослідження, так і розрахунковим шляхом.

Методика практичного визначення ТМПП розроблена і викладена в ГОСТ 12.1.044-89 ССБТ “Пожаровзрывоопасность веществ и материалов”. Ми на лабораторній роботі вивчимо і відпрацюємо цю методику.

Однак не завжди є стандартне обладнання, на якому можна провести експериментальне визначення ТМПП. З цієї причини інженер пожежної безпеки повинен уміти визначати такі параметри розрахунком.

- 1) ТМПП можна визначити за рівнянням Антуана, якщо в формулу підставити КМПП.

$$t_{\text{МПП}} = \frac{B}{A - \lg(0,01P_{\text{заг}} \Phi_M)} - C$$

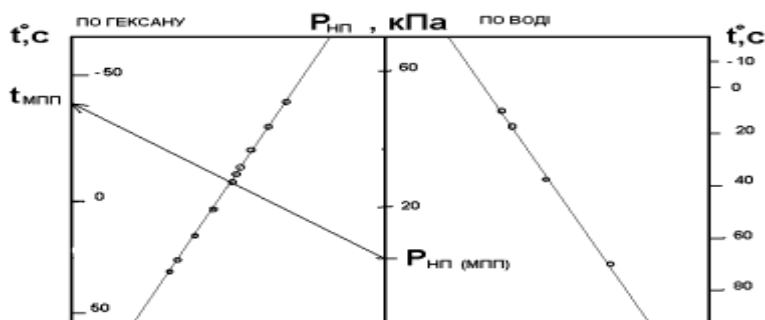
2) Якщо для даної рідини немає констант Антуана, але відома залежність тиску насиченої пари від температури, ТМПП можна визначити методом лінійної інтерполяції.

$$t_{\text{МПП}} = t_1 + \frac{(t_2 - t_1)(P_{\text{нп(М)}} - P_1)}{P_2 - P_1}$$

Для цього необхідно розрахувати тиск насиченої пари, виходячи із значення КПРП:

$$P_{\text{нп(М)}} = P_{\text{заг}} \frac{\Phi_{\text{МПП}}}{100}, \text{кПа}$$

3) Більш просто можна визначити ТМПП по концентраційних межах з використанням номограми, заздалегідь розрахувавши тиск насиченої пари, що відповідає КМПП.



4) У тих випадках, коли залежність тиску насиченої пари від температури невідома, для речовин, що складаються з С, Н, О, N, значення нижньої і верхньої температурної межі обчислюється на основі структури горючої речовини за формулою:

$$t_M = a_0 + a_1 t_{\text{кип}} + \sum a_j \times l_j$$

де a_0, a_1 – коефіцієнти, значення яких наведено в таблицях ГОСТа;

l_j – число структурних груп j -го типу;

a_j – коефіцієнти, що характеризують внесок структурних груп j -го типу.

Коефіцієнт	НТМПП	ВТМПП
a_0	- 62.46 C	- 41.43 C
a_1	0.655	0.723
a_j : C–C	-0,909	-1,158
C–H	-0,009	0,570
C–O	0,110	1,267
O–H	19,8	17,80

5) ТМПП легко можна розрахувати з використанням констант гомологічного ряду за емпіричною формулою:

$$t_M = k t_{\text{кип}} - l$$

k і l – емпіричні коефіцієнти для певних гомологічних класів горючих рідин.

Значення коефіцієнтів k і l розраховуються на основі експериментальних даних по формулах:

$$k = \frac{1}{(n_m - n_1)} \sum_{i=1}^{m-1} \frac{(T_{m,i} - T_{m,i+1})(n_{i+1} - n_i)}{T_{кип,i} - T_{кип,i+1}}$$

$$l = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (kT_{кип,i} - T_{m,i})$$

де m – кількість членів гомологічного ряду, що вивчено;

n_i – кількість атомів вуглецю в молекулі i -го члену гомологічного ряду;

$T_{m,i}$, $T_{кип,i}$ – відповідно температурна межа та температура кипіння i -го члену гомологічного ряду

Оскільки ТМПП можуть мінятися при зміні зовнішніх умов, для забезпечення пожежовибухобезпеки процесів виробництва, переробки, зберігання і транспортування рідин визначаються безпечні робочі температури:

$$t_{м без} = \frac{B}{A - \lg(0,01P_{заг} \Phi_{м без})} - C_a,$$

де $\Phi_{м без}$ - нижня або верхня безпечна концентраційна межа, %.

Для спрощення розрахунків з великим ступенем достовірності безпечні температури зберігання і переробки рідин можна визначити за формулами:

$$t_{н,без} = 0,9(t_n - K_{без}),$$

$$t_{в,без} = 1,1(t_v + K_{без}),$$

де $K_{без}$ – коефіцієнт безпеки, рівний:

для індивідуальних речовин і нафтопродуктів $10,5^\circ\text{C}$,

для технічних і реакційних сумішей 14°C .

Фактично ТМПП дублюють КМПП і для рідин є їх похідними. Використання ТМПП, як показника пожежної небезпеки рідин, значно спрощує роботу по визначенню міри пожежної небезпеки горючих рідин, оскільки на відміну від концентраційних меж не вимагає застосування газоаналізаторів, хроматографів і інших складних приладів.

Знання ТМПП, умов безпечної експлуатації горючих рідин допоможе Вам в практичній діяльності при розробці заходів щодо забезпечення пожежної безпеки технологічних процесів. Від того, наскільки правильно встановлено ступінь вибухової і пожежної небезпеки технологічного процесу, в якому обертається горюча рідина, залежать вимоги до організації діяльності протипожежних служб.

За допомогою ТМПП можна

1) провести порівняльну оцінку міри пожежної небезпеки двох рідин.

Наприклад, із трьох рідин: гексанол (ТМПП становить $57 - 92^\circ\text{C}$), метанол ($5 - 39^\circ\text{C}$), ацетон ($-20 - 6^\circ\text{C}$) найбільш безпечним є гексанол, тому що він утворює небезпечні концентрації насиченої пари лише при підвищених температурах.

2) визначити область вибухобезпечний температур роботи технологічного обладнання. Для забезпечення пожежної безпеки технологічних процесів потрібно вибирати температурний режим роботи апаратів з таким обліком, щоб робочі концентрації знаходилися поза зоною небезпечних концентрацій. Таким чином робочі температури повинні бути нижче нижньої безпечної або вище верхньої безпечної температурної межі поширення полум'я.

$$t_{роб.} < t_{нб} \quad t_{роб.} > t_{вб}$$

3) визначити міру пожежної небезпеки парів в ємностях і закритих технологічних апаратах при будь-якій температурі, виходячи з умови, що безпечною є концентрація пари, яка утвориться при температурі рідини менше НТМПП, вибухонебезпечною - якщо температура знаходиться між нижнім і верхнім ТМПП і вибухобезпечний, але пожежонебезпечною - якщо вона вище за ВТМПП.

Наприклад, при фактичній температурі 20°C гексанол є безпечним, метанол – вибухонебезпечним, а ацетон – вибухонебезпечним, але пожежонебезпечним.

Глава 3. Горіння твердих речовин.

§ 1. Класифікація твердих горючих матеріалів.

У відповідності із ГОСТ 12.1.044-89 “Пожаровзривоопасность веществ и материалов” твердими називаються матеріали, температура плавлення або розкладання яких перевищує 50°C, а також речовини, що не мають температуру плавлення (деревина, тканини).

ТГМ можна класифікувати за декількома ознаками: 1) за хімічним складом і 2) за їх поведінкою при нагріванні.

§ 1.1. За хімічним складом.



За своїм хімічним складом всі тверді речовини можна поділити на два великих класи:

1. Органічні.
2. Неорганічні.

Органічні тверді речовини, в свою чергу, діляться на підкласи. Матеріали, основою яких служать вуглеводневі сполуки, прийнято відносити до вуглеводнів. Це можуть бути природні, штучні і синтетичні полімерні матеріали, до складу яких входять вуглець, водень, азот і кисень. По структурі вуглеводні - це матеріали однорідної будови.

У окрему підгрупу можна винести природні органічні речовини, основою яких служить целюлоза. До них відносяться матеріали рослинного походження (деревина, бавовна), і на відміну від штучних і синтетичних полімерів вони є не однорідними матеріалами, а являють собою суміш природних полімерів. Поведінка в умовах пожежі всіх рослинних матеріалів досить схожа, і з цієї причини їх об'єднують в одну групу – целюлозовмісних матеріалів.

Органічні речовини, до складу яких входять такі елементи, як сірка, фосфор, кремній, галоїди і метали, в умовах пожежі характеризуються особливим режимом горіння, виділенням при згорянні особливо токсичних речовин і з цієї причини їх виділяють в особливу групу - елементоорганічних сполук.

Неорганічні тверді горючі речовини - це метали і металоїди. Практично всі метали, крім металів платинової групи, при нормальних умовах окислюються на повітрі. Але до горючих відносяться тільки ті, які можуть запалюватися на повітрі від відкритого джерела запалювання середньої потужності і самостійно горіти після його видалення. Найбільш горючими є лужні і лужноземельні метали.

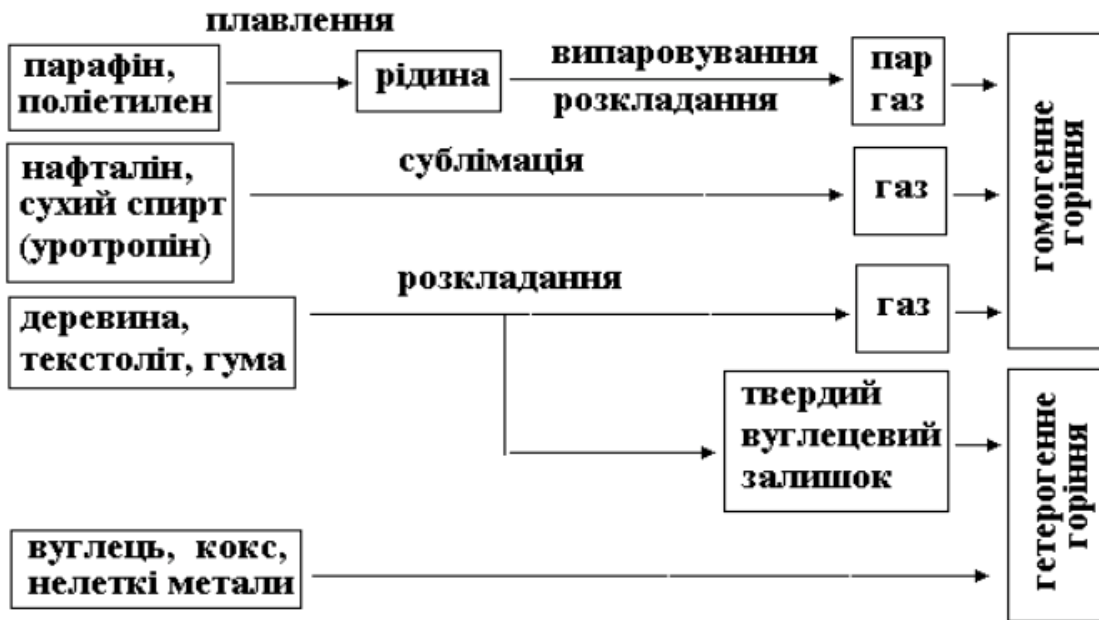
Металоїди - це речовини, у яких нарівні з металевими властивостями спостерігаються і неметалічні. До них відносять фосфор, миш'як, кремній, сірку. Механізм їх займання багато в чому нагадує особливості горіння металів.

1.2. За поведінкою матеріалів при нагріванні.

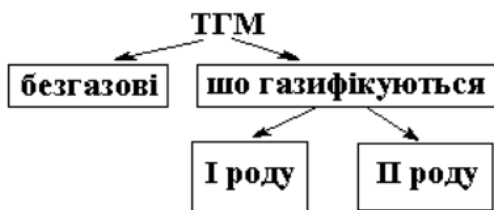
Найбільше значення для працівників пожежної охорони має поведінка ТГМ при їх нагріванні. Різні тверді матеріали при нагріві поведуться по-різному. Так парафінова свічка при нагріванні спочатку починає плавитися, переходить в рідкий стан, а потім пари парафіну займаються і горять. При нагріванні ж деревини матеріал не плавиться, а розкладається, і займаються летючі продукти розкладання. У процесі горіння утворюється твердий вуглецевий залишок, який потім горить в гетерогенному режимі, і це горіння ми можемо спостерігати у вигляді розжареного вугілля.

Таким чином, якщо при нагріванні рідин відбувається лише їх випаровування, то у разі твердих матеріалів процеси, що супроводжують нагрівання, значно більш складні і різноманітні.

Розглянемо основні процеси, що протікають в матеріалі з поглинанням теплової енергії, яка поступає ззовні. Їх можна представити у вигляді наступної схеми.



Як видно зі схеми, всі тверді речовин можна розділити на два класи: що газифікуються при нагріванні і безгазові.



Безгазові конденсовані речовини при горінні не утворюють газоподібних продуктів, а, отже, горіння протікає в гетерогенному режимі. Сюди можуть бути віднесені антрацит, кокс, вуглець, деякі нелеткі метали, а також різні термітні суміші, продуктами згоряння яких є нелеткі конденсовані речовини - оксиди металів.

Переважна більшість конденсованих речовин відносяться до першого класу – ТГМ, що газифікуються. При нагріванні вони за рахунок випаровування (сублімації) або розкладання переходять в газоподібний стан, після чого здійснюється гомогенне горіння продуктів газифікації.

У свою чергу ТГМ, що газифікуються, ділять на дві великі групи за ознакою, яким чином вони переходять в паро- газовий стан. Тверді горючі речовини, які переходять в газоподібний стан

через рідку фазу (в умовах підвищеної температури плавляться), прийнято називати твердими горючими речовинами першого роду.

Процес займання ТГМ 1-го роду повторює процес підготовки і займання горючих рідин. Горіння протікає повністю в гомогенному режимі.

Тверді горючі матеріали, які переходять в газоподібний стан за рахунок сублімації або термічної деструкції молекулярного складу і при цьому не переходять в рідкий стан, прийнято називати твердими горючими речовинами другого роду. При горінні речовин цієї групи можливе горіння як в гомогенному режимі газоподібних продуктів розкладання або сублімації, так і окислення на поверхні твердого залишку, що утворився при розкладанні, – гетерогенний режим горіння.

ВИСНОВОК: Характер поведінки ТГМ при нагрівання потрібно враховувати при використанні цих матеріалів в будівництві. Пожежна небезпека ТГМ, що газифікуються, більша ніж безгазових ТГМ. Найбільшу небезпеку мають ТГМ 1-го роду, тому що при пожежі за рахунок розплавлення та розтікання цих матеріалів площа горіння може збільшуватися. На пожежах відбувається одночасне горіння ТГМ першого і другого роду, тому процеси плавлення одних і розкладання інших протікають паралельно, хоч в більшості будівель основну масу становлять матеріали другого роду.

§ 2. Загальні закономірності горіння твердих речовин.

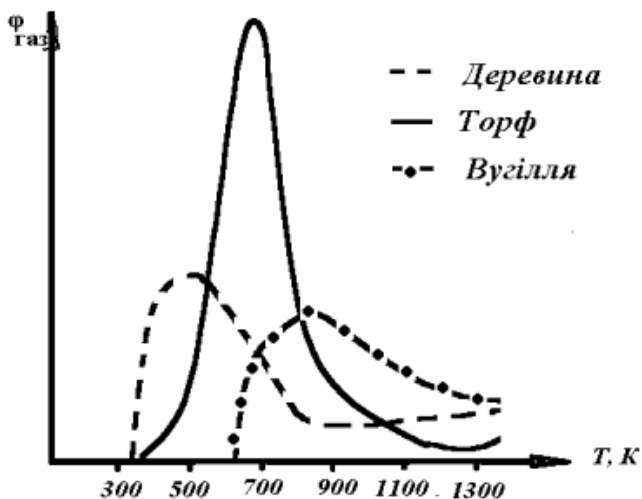
§ 2.1. Займання твердих матеріалів.

Процеси виникнення і розвитку горіння для твердих горючих матеріалів мають багато спільного з процесами горіння газів і рідин, які вивчалися нами раніше. Однак, крім спільних рис існує і цілий ряд особливостей, зумовлених агрегатним станом і відмінностями в будові.

Розглянемо механізм займання ТГМ. При контакті ТГМ з нагрітим до високої температури джерелом запалювання виникає теплообмін, при цьому з матеріалом відбуваються наступні процеси:

1. Попередній нагрів поверхневого шару до температури початку фізико-хімічних перетворень (плавлення, випаровування або термічного розкладання). Якщо це матеріал рослинного походження, то з нього спочатку починає випаровуватися волога. Загальна тривалість цього етапу складає 80% від загального часу займання.

Процес утворення летючих компонентів йде з витратами енергії і зміною хімічної структури матеріалу. Для матеріалів різного складу (з різною хімічною структурою) починається при різних температурах і протікає з різною інтенсивністю. Здатність матеріалу чинити опір нагріву без зміни хімічної структури називається термічною стійкістю матеріалу.



2. Подальший нагрів обумовлює протікання фізико-хімічних перетворень. Якщо це ТГМ 1-го роду, то відбувається плавлення і перехід матеріалу в рідку фазу, потім нагрів розплаву до температури кипіння або розкладання. Якщо це матеріал 2-го роду - відразу починається процес сублімації або розкладання (піроліз) з виділенням летючих продуктів.

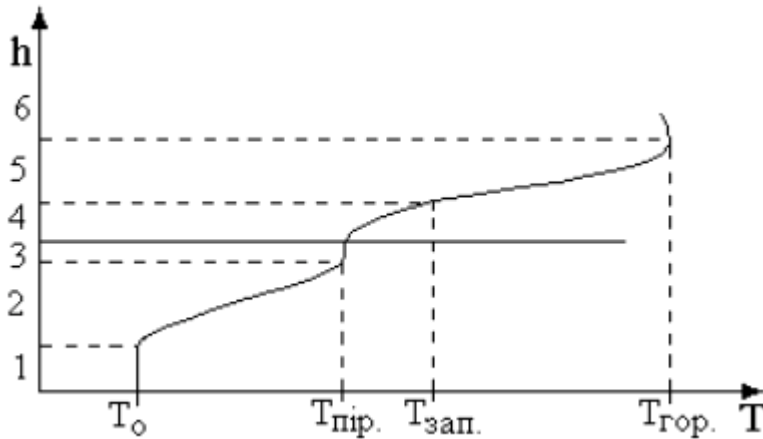
3. Утворення горючої пароповітряної суміші з концентрацією горючої речовини більше, ніж φ_n .

4. Попередній нагрів газової суміші до температури запалення.

5. Займання газоповітряної суміші з подальшим горінням.

Таким чином, процес горіння більшості ТГМ (що газифікуються) починається з гомогенного режиму. Горіння характеризується високою швидкістю поширення, могутніми конвекційними і променистими потоками.

На кожній стадії протікають специфічні фізико-хімічні процеси, які визначають стан системи. Ці процеси можуть протікати одночасно, але в різних зонах матеріалу. Тому переліченим стадіям відповідають наступні зони:



T_0 , $T_{пир.}$, $T_{зап.}$, $T_{гор.}$ - температури початкова, піролізу, самонагрівання, запалення, горіння відповідно.

1 - вихідний матеріал;

2 - зона попереднього нагріву матеріалу, (нагрів до температури початку фізико-хімічних перетворень);

3 - зона фізико-хімічних перетворень (плавлення або розкладання конденсованої фази (твердої і рідкої));

4 - зона сумішоутворення низькомолекулярних речовин, що виділилися при газифікації конденсованої фази, з повітрям, досягнення концентрації горючих газів φ_n , нагрів суміші до $T_{зап.}$;

5 - фронт полум'я, де виділяється основна частка теплової енергії, спостерігаються максимальна температура і світлове випромінювання;

6 - зона продуктів горіння, де продукти реакції змішуються з холодним повітрям.

Таким чином, якщо при горінні рідина тепловий потік, що поступає до поверхні, витрачається тільки на нагрів і випаровування рідкої фази, то для твердих речовин, крім цього, необхідні витрати на плавлення і розкладання. При цьому потужність джерела запалення повинна забезпечити протікання фізико-хімічних перетворень і у загальному виді можна записати:

Для ТГМ 1-го роду:

$$q_{ДЗ} = v_m [c_p^{ТВ} (T_{пл} - T_0) + H_{пл} + c_p^{рід} (T_{кип, (розкл.)} - T_{пл}) + H_{вип(розкл.)} + c_p^{газ} (T_{зап} - T_{кип, (розкл.)})]$$

Для ТГМ 2-го роду:

$$q_{ДЗ} = v_m [c_p^{тв} (T_{розкл} - T_0) + H_{розкл} + c_p^{газ} (T_{зап} - T_{кип, (розкл.)})]$$

де $q_{ДЗ}$ – інтенсивність теплового впливу джерела запалювання, $кВт \times м^{-2}$;

v_m – масова швидкість вигорання матеріалу, $кг \times м^{-2} \times с^{-1}$;

$c_p^{тв}$, $c_p^{рід}$, $c_p^{газ}$ – теплоємність твердої речовини, її розплаву і газоподібних продуктів розкладання, $кДж \times кг^{-1} \times K^{-1}$;

$H_{пл}$, $H_{вип}$, $H_{розкл}$ – теплота плавлення, випаровування і розкладання відповідно, $кДж \times кг^{-1}$;

$T_{пл}$, $T_{кип}$, $T_{розкл}$ – температури плавлення ТГМ і кипіння або розкладання розплаву, K ;

T_0 – початкова температура речовини, K .

$T_{зап}$ – температури запалення газоповітряної суміші, K .

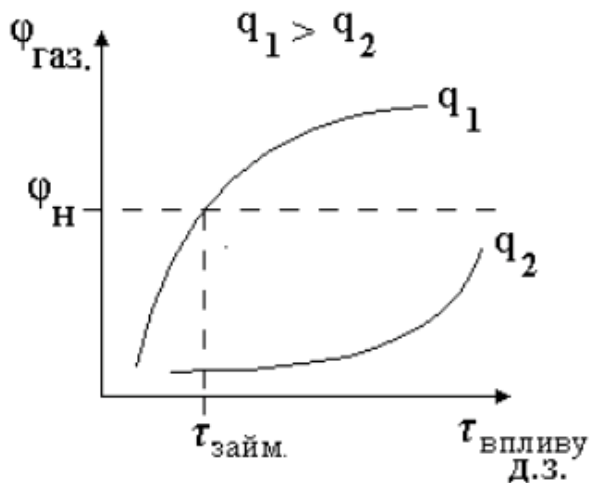
Таким чином, процес горіння більшості ТГМ (що газифікуються) починається з гомогенного режиму. Горіння характеризується високою швидкістю поширення, потужними конвекційними і променистими потоками.

Час займання – це час від початку дії джерела запалення на горючу речовину до появи процесу горіння.

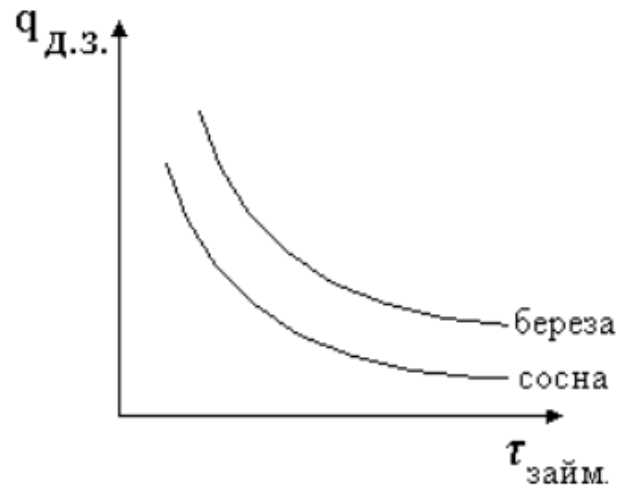
Для тгм, що газифікуються, час займання визначається швидкістю утворення над поверхнею матеріалу летючих горючих компонентів в концентрації, що перевищує нижню КМПП. Час займання включає в себе час, який витрачається на нагрів зразка до температури початку газифікації, і час, що витрачається на досягнення критичної концентрації горючих газоподібних продуктів розкладання φ_n .

$$\tau_{займ} = \tau_{нагр} + \tau_{газифік}$$

У свою чергу, кількість і склад летючих сполук залежить від виду ТГМ, часу теплового впливу джерела запалювання, його потужності. Чим більша інтенсивність теплового впливу, тим швидше йде процес піролізу, вище інтенсивність виділення летючих речовини, отже, менше час займання.



Залежність швидкості розкладання ТГМ від часу теплового впливу для різної потужності ДЗ



Залежність часу займання ТГМ від потужності джерела запалювання для різної деревини

2.2. Поширення горіння по поверхні ТГМ.

Після запалення ТГМ в місці впливу ДЗ відбувається переміщення фронту полум'я по поверхні матеріалу. Поширення горіння протікає за рахунок передачі тепла від полум'я до сусідніх ділянок матеріалу. Прогрівання ділянок поверхні, розташованих перед фронтом полум'я, приводить до розкладання шарів ТГМ з утворенням летючих продуктів. Продукти, що виділяються при піролізі, змішуються з повітрям, утворюючи гомогенну систему. При досягненні концентрації горючих компонентів рівної нижньої КМПП відбувається запалення суміші від полум'я і згорання в кінетичному режимі.

Таким чином, процес поширення полум'я по ТГМ (як і по рідинах) характеризується двома істотними ознаками:

швидкість поширення полум'я рівна швидкості утворення горючої суміші над поверхнею матеріалу;

горіння на передній кромці полум'я (носику) завжди протікає в кінетичному режимі, тобто горить заздалегідь перемішана суміш пального і окислювача.

Передача тепла здійснюється за різними механізмами: випромінювання, конвекції і теплопровідності. У залежності від умов горіння співвідношення кількостей тепла, що поступають цими видами теплопередачі, може бути різним. Тому швидкість поширення полум'я по поверхні ТГМ залежить не тільки від виду ТГМ, але і від умов горіння.

Найбільший вплив на швидкість поширення полум'я по поверхні ТГМ виявляють наступні фактори:

природа матеріалу, його фізико-хімічні властивості (швидкість утворення летючих продуктів);

вогкість матеріалу;

орієнтація зразка в просторі;

швидкість і напрям повітряних потоків;

початкова температура матеріалу;

геометричні розміри зразка (форма, ступінь подрібнення).

Розглянемо вплив деяких з цих чинників.

$M \uparrow V_l \downarrow$

Чим більше молекулярна маса органічної речовини, тим повільніше відбувається термічне розкладання матеріалу при тепловому впливі, менше виділяється летючих сполук, для утворення горючої суміші необхідно більше часу, а, отже, лінійна швидкість поширення полум'я по поверхні ТГМ меншає.

$W \uparrow V_l \downarrow$

З збільшенням вологості матеріалу V_l знижується, що пов'язано із збільшенням витрат тепла на випаровування з поверхневих шарів вологи і сповільненням процесу розкладання. Крім того, пара води, що поступає в газову фазу, знижує температуру полум'я і, отже, тепловий потік від полум'я до поверхні ТГМ.

Для матеріалів рослинного походження стадія сушки є найбільш тривалою і може складати до 55% від загальної тривалості процесу запалення.

При досягненні вогкості 14% фронт полум'я втрачає сплошність, розбивається на окремі осередки і в результаті горіння припиняється. На цьому заснований метод захисту лісопіломатеріалів від горіння.

$\alpha \rightarrow 90 V_l \uparrow$

На відміну від рідин поверхня ТГМ може знаходитися під різним кутом до горизонту. Відповідно цьому змінюється і швидкість поширення полум'я.

При від'ємних кутах нахилу (напряму руху полум'я зверху вниз) швидкість поширення полум'я або не змінюється або ж слабо меншає.

При збільшенні позитивного кута нахилу (напряму руху полум'я знизу вгору) понад 15° швидкість поширення полум'я різко зростає. Це пояснюється збільшенням частки випромінювання від зони горіння до поверхні ТГМ. Однак, при зміні кута нахилу від 0 до $26,5^\circ$ V_l зростає у 5 разів, а інтенсивність променистого потоку тільки в 1,4 рази. Домінуючу роль при зміні кута нахилу грає зростання теплопереносу від зони полум'я до поверхні матеріалу за рахунок конвекції: відбувається притиснення полум'я до поверхні ТГМ конвекційними потоками навколишнього повітря. При великих кутах нахилу окремі вихори полум'я, торкаючись поверхні горючого матеріалу, спричиняють його запаленню ще до підходу носика полум'я.

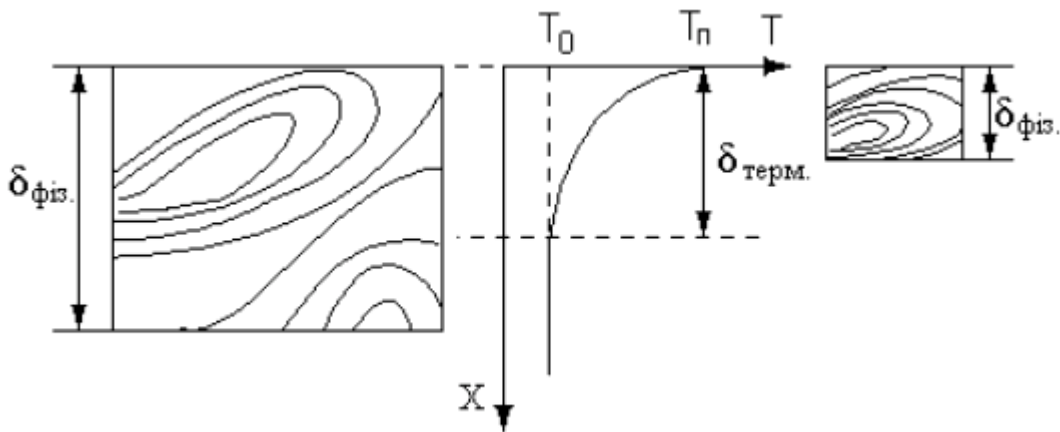
Швидкість і напрям повітряних потоків.

При збільшенні швидкості вітру в напрямі поширення полум'я V_l зростає спочатку лінійно, а потім по статечній залежності. У цьому випадку механізм впливу вітру аналогічний механізму впливу кута нахилу зразка: полум'я нахиляється до поверхні матеріалу, внаслідок чого збільшується тепловий потік від зони горіння до поверхні ТГМ.

Потік повітря, направлений проти рушення полум'я, впливає двояким чином на V_l . При малих швидкостях руху повітря відбувається більш інтенсивно змішування горючих продуктів піролізу з окислювачем, швидше відбувається утворення горючої суміші, що, в свою чергу, прискорює поширення полум'я. При збільшенні швидкості вітру вище за 4 м/хвил внаслідок аеродинамічного гальмування і охолодження прогрітих ділянок поверхні перед фронтом полум'я V_l буде знижуватися аж до зриву полум'я.

Геометричні розміри зразка.

Основний вплив на V_l здійснює товщина зразка. Розрізняють термічно товсті і термічно тонкі зразки. Розподіл цей заснований на порівнянні фізичної товщини із термічною. Під термічною розуміють товщину прогрітого шару ТГМ до моменту поширення горіння на цю дільницю. Якщо фізична товщина більше термічної, то зразок називається термічно товстим, якщо менше - термічно тонким.



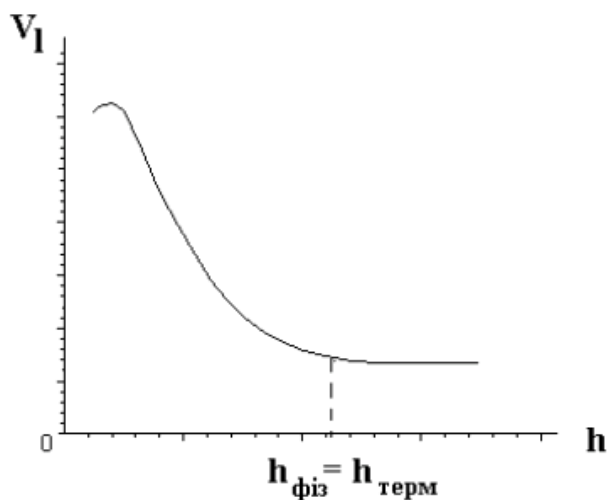
При збільшенні товщини в межах термічно тонких зразків швидкість поширення полум'я знижується внаслідок збільшення тепловтрат від поверхні горіння на прогрівання матеріалу углиб.

$$h_{\text{физ.}} < h_{\text{терм.}} \quad h_{\text{физ.}} \uparrow V_l \downarrow$$

Для термічно товстих зразків швидкість поширення не залежить від їх товщини.

$$h_{\text{физ.}} > h_{\text{терм.}} \quad V_l = \text{const}$$

Дійсно, якщо фізична товщина перевищує термічну, то подальше збільшення товщини не приведе до зміни характеру розподілу температури по глибині матеріалу перед фронтом полум'я, і швидкість горіння залишається незмінною.

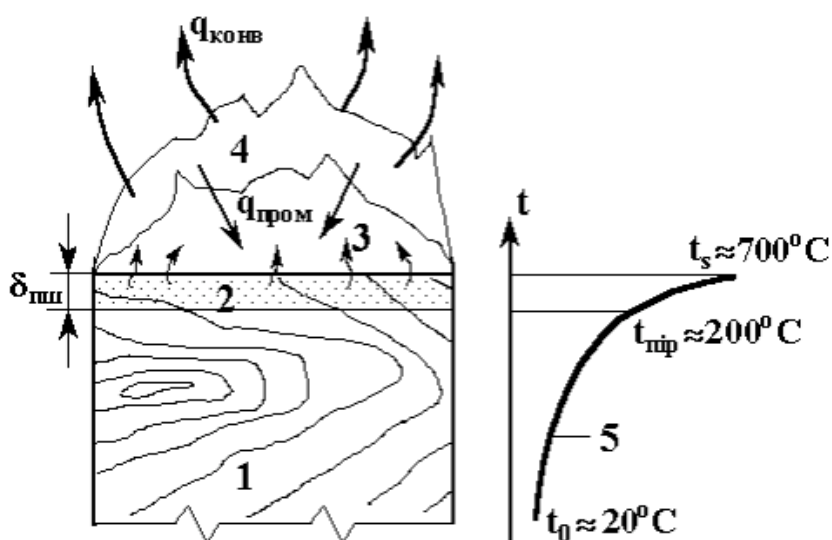


Відмітною особливістю горіння ТГМ є наявність певних умов, при яких самостійне поширення горіння, що виникло, по поверхні матеріалу стає неможливим. Це пояснюється значною енергоємністю тих підготовчих процесів, які передують запаленню матеріалу. Більшість матеріалів рослинного походження у вигляді термічно товстих зразків в горизонтальному або вертикальному (зверху вниз) положенні на повітрі при нормальній температурі не здібні до самостійного поширення полум'я. Відомо, що горизонтально розташовані зразки деревини товщиною більше за 2-3 мм нездібні до горіння в нормальних умовах тільки за рахунок тепла від власного полум'я, якщо не компенсувати тепловтрати в довкілля, а споживчий папір товщиною більше за 0,7 мм не поширює горіння за вертикальним зразком в напрямку зверху вниз.

2.3. Механізм вигорання твердих речовин.

Одночасно з поширенням полум'я по поверхні матеріалу настає процес його вигорання. Вигорання ТГМ носить дифузійний характер. Закономірності вигорання залежать від характеру перетворення твердої фази в газоподібні продукти.

У разі ТГМ 1-го роду (матеріал переходить в рідкий стан) розкладання твердої фази протікає у вузькому поверхневому шарі без утворення вуглецевого шару, вигорання йде з постійною швидкістю. На поверхні твердої фази встановлюється постійна температура, яка дорівнює температурі фазового переходу (кипіння, розкладання або сублимації речовини). У твердій фазі встановлюється певне поле температур, яке в процесі вигорання не змінюється.



Такий розподіл температур називається розподілом 1-го роду і описується рівнянням виду:

$$T_{\text{TGM}(x)} = T_0 + (T_s - T_0) \cdot e^{-\frac{V_1 \cdot x}{a_t}}$$

де T_x - температура матеріалу на глибині x від поверхні горіння, К;

T_s - температура на поверхні матеріалу, К;

T_0 - початкова температура зразка, К;

V_m - швидкість вигорання матеріалу, м/с;

a_t коефіцієнт теплопровідності твердої фази.

З цього рівняння слідує, що чим менше швидкість вигорання одного і того ж матеріалу, тим більше товщина прогрітого шару.

Кількість тепла, яка необхідна для створення прогрітого шару, визначається за формулою:

$$Q = \int C_p \rho (T_x - T_0) dx$$

де C_p питома теплоємність матеріалу, кДж/кг К;

ρ - густина матеріалу, кг/м³

Q - приведений на одиницю площі тепловміст твердої фази, кДж/м²;

Спільне рішення цих двох рівнянь дає вираз, що пов'язує швидкість вигорання і величину тепловмісту:

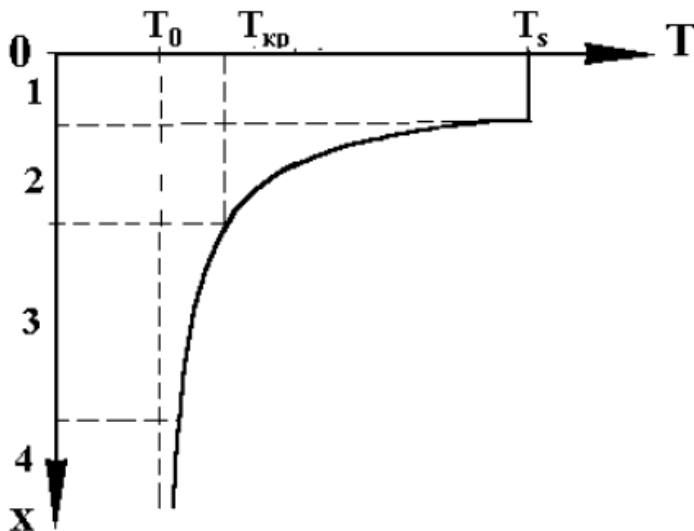
$$U_m = \lambda (T_p - T_0) / Q$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу, кВт/м с К;

Зі збільшенням швидкості вигорання тепловміст прогрітого шару, що необхідний для підтримка стаціонарного горіння, знижується.

Як і лінійна швидкість поширення полум'я, масова швидкість вигорання не є постійною для даного горючого матеріалу, а залежить від умов, в яких протікає горіння. По фізичній суті швидкість вигорання еквівалентна швидкості піролізу матеріалу, приведений до одиниці поверхні, під впливом теплового потоку, який формується не тільки від власного полум'я зразка, що горить, але і від зовнішніх джерел і істотно залежить від умов газообміну.

При горінні ТГМ 2-го роду вигорання летючих сполук супроводжується утворенням на поверхні горіння вуглецевого залишку, в якому температура майже не змінюється. Розподіл температури вглиб матеріалу для ТГМ 2-го роду має вид:



При цьому можна умовно виділити декілька шарів з різними фізико-хімічними властивостями.

1. Вуглецевий шар, що складається на 99% з вуглецю;
2. Зона піролізу, в якій відбувається виділення летючих компонентів і утворення вуглецевого залишку;

3. Зона попереднього нагріву матеріалу;

4. Початковий матеріал.

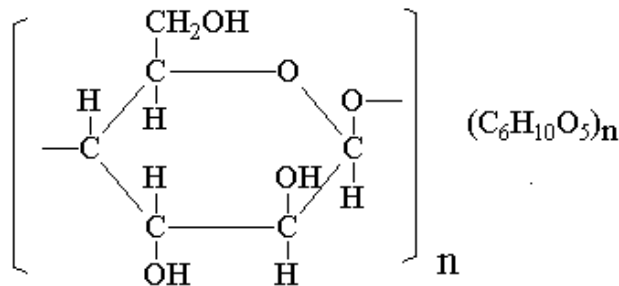
Так горять практично всі речовини рослинного походження, деякі пластмаси, що містять в своєму складі негорючі або важкогорючі наповнювачі.

При утворенні вуглецевого шару процес вигорання помітно знижується за рахунок зменшення коефіцієнта теплопровідності вуглецевого шару. Так, коефіцієнт теплопровідності деревного вугілля в 4 рази менше, ніж у деревини. Коли товщина вуглецевого шару досягає 15-20 мм, кількість тепла, яка передається за рахунок теплопровідності із зони горіння вглиб матеріалу і зумовлює протікання процесу піролізу, стає недостатнім для утворення достатньої кількості горючих летючих продуктів розкладання. Полум'яне горіння припиняється.

ВИСНОВОК: Лінійна швидкість поширення полум'я і масова швидкість вигорання є основними кількісними параметрами, що характеризують процеси горіння ТГМ і, отже, зумовлюють динаміку пожежі. Саме ці основні параметри Ви будете використати при прогнозуванні ситуації, яка може виникнути при пожежі: площа пожежі, температура в приміщенні, фактична вогнестійкість конструкцій, допустимий час евакуації, можливість роботи особового складу підрозділів МНС при ліквідації пожежі.

§ 3. Особливості поведінки целюлозовмісних матеріалів при нагріванні.

Целюлоза - це високомолекулярний полісахарид з емпіричною формулою $(C_6H_{10}O_5)_n$. Молекулярна вага складає понад 1 500 000 а.о.д.



Поведінка всіх рослинних матеріалів в умовах пожежі досить схожа. Всі целюлозовмісні матеріали відносяться до ТГМ, що газифікуються, 2-го роду, отже при нагріванні вони будуть розкладатися і утворювати газоповітряну суміш і твердий вуглецевий залишок. Відрізнитися буде тільки кількість летючих продуктів, які виділяються при розкладанні, і відсоток виходу вуглистого залишку. Так, наприклад, вуглистого залишку при спаленні бавовни утвориться всього 5%, при спаленні деревини - 15-25%, віскозного волокна (матеріал являє собою оброблену неорганічними речовинами целюлозу) - понад 40%. Це необхідно враховувати при аналізі умов і характеру пожежі целюлозовмісних матеріалів.

Розглянемо поведінку при нагріванні деревини як найбільш поширеного целюлозовмісного горючого матеріалу.

Деревина - складна суміш природних полімерів великої молекулярної маси. Це пориста речовина, об'єм пор становить 50-75% її об'єму. Основними компонентами є целюлоза (біля 50%), геміцелюлоза (25%) і лігнін (25%). Крім того, деревина містить поглинену вологу (4-7%). Масові частки цих компонентів міняються в залежності від виду матеріалу. Речовини, що входять до складу деревини, мають різну будову і неоднакову термічну стійкість. Найменше термостійка - геміцелюлоза, найбільшою термічною стійкістю володіє лігнін.

Елементний склад деревини можна представити таким чином: вуглець - 40-50%; водень - 5 - 6%; кисень - 39-47%; азот - 0.5-1.5%; мікроелементи - до 5%.

Горіння деревини істотним образом відрізняється від горіння рідин і газів, так як може протікати відразу в декількох режимах - гомогенному і гетерогенному. Тобто при горінні деревини можна виділити дві фази: 1) гомогенне (полум'яне) горіння продуктів розкладання і 2) гетерогенне окислення твердого вуглецевого залишку, що утворився.

3.1. Піроліз деревини, фаза гомогенного горіння.

При впливі на деревину джерелом запалювання відбувається процес розкладання матеріалу або піроліз, при цьому можна виділити декілька характерних етапів:

1. Сушка матеріалу при $t = 110-130^{\circ}\text{C}$. При цьому відбувається виділення вологи, що входить до складу деревини. Для матеріалів рослинного походження стадія сушки є найбільш тривалою і може складати до 55% від загальної тривалості процесу запалення.

2. При температурі $150-200^{\circ}\text{C}$ починається розкладання, перебудова і конденсація найменше термостійких компонентів деревини, геміцелюлози, з виділенням CO_2 і H_2O . При $180-300^{\circ}\text{C}$ відбувається дегідратація ароматичних ядер лігніну з утворенням подвійних зв'язків і появою конденсованих і ароматичних структур. Газоподібні продукти розкладання, що виділяються, горіти ще не здатні.

3. При $t = 250-450^{\circ}\text{C}$ протікає подальший більш глибокий розклад всіх складових деревини – піроліз. При цьому відбувається виділення основної маси (біля 40% від максимально можливої кількості) горючих газів (H_2 , CH_4 , CO , C_2H_4 і т.п.).

Газоповітряна суміш, що утворюється, при досягненні концентрації горючої речовини φ_n вже спроможна до запалення від джерела запалювання. Встановлюється полум'яне горіння. Швидкість виділення газоподібних продуктів стає рівній швидкості їх дифузійного горіння.

4. За межею 300°C звичайна структура деревини зникає, поступаючись місцем конденсованим системам з певною орієнтацією, утворюється вуглецевий залишок.

Конденсація, зшивка з утворенням вуглецевих структур, відбувається в деревині при нагріванні паралельно з деструкцією, виділенням летючих речовин, а також внаслідок вторинних процесів з участю тих же летючих речовин. Чим вище температура, тим більше число бокових груп відщеплюється від ароматичних ядер макромолекул. Структурні елементи вуглецевого шару все більш конденсуються, утворюючи структуру подібну графітній.

Вугілля, що утворюється на поверхні деревини, не горить, хоч і знаходиться в розжареному стані. Горінню вуглецю в цей період перешкоджає горіння газоподібних продуктів розкладання, внаслідок чого кисень не може дифундувати до поверхні вуглецю.

5. Вуглистий шар за рахунок своєї малої теплопровідності є хорошим теплоізолятором, і по мірі його накопичення (15-20 мм) вуглецевий залишок починає служити захистом внутрішніх шарів матеріалу від термічного впливу полум'я. При $t = 500-600^{\circ}\text{C}$ розвиток процесів ароматизації, карбонізації закономірно приводить до підвищення процентного вмісту вуглецю і відповідного зниження частки водню і кисню, різко скорочується вихід летючих продуктів. Крім того, через вуглецевий шар ускладнена дифузія горючих газоподібних продуктів термічного розкладу до зони полум'яного горіння. Деревина вже не здатна до самостійного горіння без підводу тепла від зовнішнього джерела. Тому на пожежі товсті дерев'яні конструкції довше зберігають несучу здатність, ніж металеві. На цьому принципі заснований метод захисту будівельних конструкцій за допомогою покриттів, що при нагріванні спучуються.

При зменшенні концентрації газоподібних продуктів розкладання нижче НКМПП, полум'яне горіння припиняється. Завершується перша фаза гомогенного горіння деревини.

Стадія полум'яного горіння займає більш короткий проміжок часу, разом з тим він пов'язаний з виділенням значної кількості тепла (при цьому виділяється 55-60% тепла, а в період другої фази - 40-45%).

3.2. Фаза гетерогенного горіння, перевуглення.

Оскільки концентрація газоподібних продуктів розкладання різко знижується і відбувається припинення полум'яного горіння, це відкриває доступ кисню повітря до вугілля, нагрітого до 600°C. Починається друга фаза горіння деревини - гетерогенне окислення вуглистого шару. При цьому температура зростає до 750-850°C.

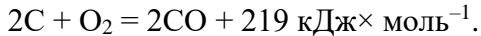
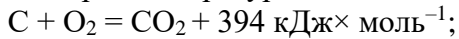
Швидкість гетерогенного горіння буде визначатися надходженням повітря до поверхні. Так, при відсутності рушення повітряних потоків швидкість окислювальних процесів знижується, а при збільшенні швидкості надходження кисню в зону реакції відбувається прискорення процесу горіння. Це можна спостерігати, коли інтенсивне дуття на вугілля, що остигло, приводить спочатку до появи червоного свічення вуглецю, а потім і поновленню полум'яного горіння.

Процес вигорання вуглистого шару називається перевугленням.

Обвуглювання деревини вглиб може бути описане як поступове просування всередину її певної температурної зони - піролізного шару. Нижньою межею цього шару є деяка характеристична температура $T_{розкл.}$, при якій матеріал починає розкладатися зі швидкістю, що піддається вимірюванню; верхньою межею - більш висока характеристична температура $T_{об}$, при якій матеріал повністю обвуглюється.

Перевуглення деревини відбувається в декілька етапів.

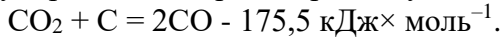
1. Кисень повітря за рахунок дифузії поступає до поверхні і проникає в шар пористого вугілля, і при температурі 500-600°C вступає з ним в реакції:



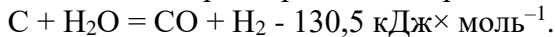
Ці реакції прийнято називати первинними. Взаємодія вуглецю з киснем протікає на поверхні розділу фаз. Швидкість таких реакцій значною мірою залежить від величини поверхні вуглецю і швидкості дифузії до неї кисню.

Нарівні з первинними протікають і вторинні реакції.

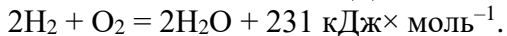
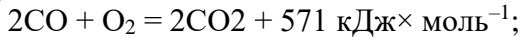
2. Під дією підвищеного тиску діоксид вуглецю виштовхується з товщі вуглистого шару, і при цьому, проходячи через нагрітий вуглистий шар, реагує з ним з утворенням оксиду вуглецю.



3. Розжарений вуглець може також реагувати з молекулами води, які є в продуктах горіння або розкладання шарів деревини, що розташовані нижче:



4. Виходячи на поверхню і змішуючись з повітрям, оксид вуглецю і водень згоряють в гомогенному режимі - це горіння звичайно видно як голубувате полум'я над поверхнею вугілля, що утворилося.



При горінні деревини вуглистий шар розтріскується, і через тріщини, що утворилися, виходять летючі продукти розкладання твердої фази, які запалюються від високотемпературного вуглистого шару. У результаті настає змішаний або гомогенно-гетерогенний режим горіння.

Процес перевуглення протікає з швидкістю 0.1-0.2 мм× хв.⁻¹. Швидкість процесу в умовах пожежі може збільшуватися при збільшенні швидкості повітряного потоку, що омиває деревину, яка горить. Це поліпшує доступ кисню з навколишнього середовища до поверхні вуглецю.

Зміна глибини обвугленого шару деревини називається "глибиною перевуглення". Швидкість обвуглювання приймається рівною 0,6-1,0 мм× хв.⁻¹ на основі даних, отриманих при вогневих випробуваннях дерев'яних конструкцій на вогнестійкість по стандартному температурному режиму пожежі. Швидкість обвуглювання істотно залежить від інтенсивності теплового потоку, що впливає на деревину, і, відповідно, температури піролізу деревини. швидкість обвуглювання в залежності від вказаних чинників може мінатися в межах від 0,3 до 4,5 мм× хв.⁻¹, тобто в 15 раз. Так, наприклад, при зниженні температури від 900 до 600°C швидкість обвуглювання деревини сосни знижується від 0,7 до 0,37 мм× хв.⁻¹. При пожежі в приміщенні місцеві температури в деяких

точках можуть досягати 1100°C ; відповідне випромінювання чорного тіла при цьому становитиме 200 кВт/м^2 , що може викликати швидкості горіння деревини порядку $4,4 \text{ мм} \times \text{хв.}^{-1}$.

На явищі перевуглення заснований метод визначення осередку пожежі при розслідуванні пожеж. Метод, який розроблений Одеською випробувальною пожежною лабораторією, заснований на дослідженні проб обвуглених залишків деревини методом електричного опору.

Ступінь перетворення речовини (глибина обвуглювання) визначається температурою, при якій відбувається перетворення, і тривалістю процесу. Вказані параметри визначають структуру і комплекс властивостей обвуглених залишків деревини.

Перебудови, що виникають під дією температури і які ми розглянули раніше, приводять до зміни цілого комплексу структурних параметрів, фізичних і хімічних властивостей деревного вугілля. З температурою і тривалістю нагріву пов'язані такі властивості деревного вугілля як електропровідність, елементний склад (Н/С), наявність функціональних груп, які визначаються за даними ІЧС.

Електроопір деревного вугілля з розвитком процесів карбонізації послідовно знижується в інтервалі від 10^{8-10} до одиниць Ом. Це можна пояснити тим, що в даних умовах ароматичні вуглецеві кільця починають складатися в сітки, створюють могутню систему поліспряження, в якій делокалізація електронної хмари приводить до виходу жвавих електронів в простір між атомними сітками. У результаті електропровідність речовини різко зростає.

Визначивши величину електроопору обвуглених залишків деревини, розрахунковим шляхом обчислюють орієнтовне значення середньої температури і тривалість горіння в кожній точці.

§ 4. Тління.

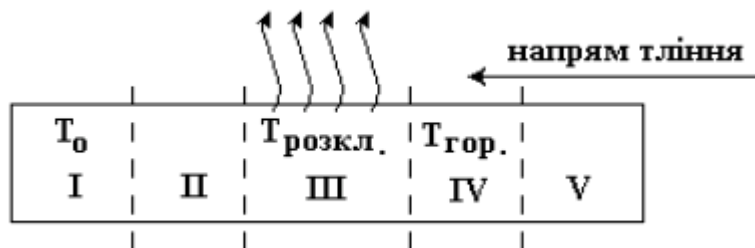
Тління – безполум'яне горіння волокнистих і пористих матеріалів, які при нагріванні утворюють твердий вуглецевий залишок. Це особливий режим горіння, коли горючі гази, що утворюються в результаті піролізу, не горять, а відбувається тільки гетерогенне горіння вуглецевого залишку (поверхнєве окислення).

До матеріалів, які можуть горіти в режимі тління, відноситься широкий спектр матеріалів рослинного походження (папір, целюлозні тканини, ошурки), латексна гума, деякі види пластмас (пінополіуретан, пінофенопласти). Матеріали, які можуть плавитися або при розкладанні давати мало вуглистого залишку, не будуть проявляти тліючого горіння.

Тління може відбуватися як в товщі матеріалу, так і на поверхні в тому випадку, коли при розкладанні матеріалу виділяється недостатня кількість горючих парів і газів, що характерно для високопористих органічних матеріалів.

Тління може початися при умові наявності джерела тепла, яке приведе до утворення вуглистого залишку, і можливості його окислення.

У процесі тління в товщі матеріалу можна виділити декілька характерних зон:



1. Зона початкового матеріалу в холодному стані.
2. Зона попереднього розігрівання матеріалу за рахунок теплопровідності.
3. Зона піролізу, в якій відбувається термічне розкладання матеріалу, утворення вуглецевого залишку і виділення летючих продуктів розкладання.

4. Зона вуглецевого залишку, де відбувається перехід від процесу розкладання матеріалу до гетерогенного горіння вуглецю. Припиняється виділення летючих продуктів піролізу, і починається розжарювання вуглецевого залишку. Тут відбувається основне виділення тепла, яке передається в зони 2 і 3. Температура досягає 600-750°C. Якщо тління відбувається в товщі матеріалу, то окислення здійснюється за рахунок кисню повітря, що міститься в порах матеріалу.

5. Зона твердих продуктів горіння (зола). У цій зоні відбувається догорання вуглецевого шару і поступове зниження температури.

Таким чином, поширення тліючого горіння відбувається за рахунок прогрівання холодного матеріалу перед зоною тління. Основним рівнянням поширення горіння є рівняння збереження енергії. Прогрівання матеріалу здійснюється в цьому випадку теплопровідністю.

$$q = \lambda(T_{\text{гор}} - T_0)/x$$

де q - інтенсивність потоку енергії, що передається через одиницю площі поверхні;

$T_{\text{гор}}$ - температура в зоні горіння вуглистого шару, К;

T_0 - початкова температура, К;

λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу, $\text{кВт} \times \text{м}^{-1} \times \text{К}^{-1}$;

x - глибина прогрівання речовини, м, (складає порядку 0,01 м).

Якщо прийняти, що тепло затрачується в основному на нагрів холодного матеріалу від початкової температури T_0 до температури $T_{\text{гор}}$, то

$$q = m c_p (T_{\text{гор}} - T_0) = \rho V_1 c_p (T_{\text{гор}} - T_0)$$

де V_1 - швидкість поширення тління;

ρ - густина матеріалу, $\text{кг} \times \text{м}^{-3}$;

c_p - теплоємність матеріалу, $\text{кДж} \times \text{кг}^{-1}$;

Тоді швидкість поширення тління можна оцінити із співвідношення:

$$\lambda(T_{\text{гор}} - T_0)/x = \rho V_1 c_p (T_{\text{гор}} - T_0)$$

Тоді виходить що швидкість тління визначається як відношення коефіцієнта температуропровідності матеріалу до товщини прогрівання матеріалу:

$$v_1 = \frac{\lambda(T_{\text{гор}} - T_0)}{\rho c_p (T_{\text{гор}} - T_0) x} = \frac{a_t}{x}$$

Визначимо швидкість поширення тління стосовно до шаруватого теплоізолюючого картону, для якого $a_t = 8,6 \times 10^{-8} \text{ м}^2 \times \text{с}^{-1}$

$$V_1 = 8,6 \times 10^{-8} / 0,01 \gg 10^{-5} \text{ м/с}$$

Швидкість поширення тління меншає із збільшенням вмісту матеріалу і його об'ємної щільності (за рахунок зниження змісту кисню), а також залежить від напрямку поширення горіння. При поширенні тління вгору швидкість поширення буде більше, ніж при поширенні в горизонтальному напрямі. Це зумовлюється підйомом гарячих газів і продуктів розкладання в область свіжого матеріалу.

Так які ж особливості процесу тління?

1. В більшості, продукти розкладання, що утворюються, горючі, але запалення їх в зоні піролізу не відбувається, оскільки кисню, що знаходиться в порах речовини, не вистачає для полум'яного горіння, а при тлінні на поверхні їх утвориться менше, ніж НКМПП. Газоподібні продукти піролізу, проходячи через шар початкового матеріалу, остигають до температури, при якій швидкість реакції окислення знижується і реакція горіння стає неможливою.

2. Продукти термічного розкладання являються токсичними, тому при накопиченні їх в закритому об'ємі можна отримати отруєння.

3. Тління може перейти в гомогенне горіння.

Продукти термічного розкладання в закритих об'ємах можуть накопичуватися і створювати вибухонебезпечні концентрації, здатні горіти в кінетичному режимі (спалахувати) від будь-якого джерела запалювання (може від самого осередку тління).

Цей процес представляє небезпеку для підрозділів, прибулих на такі пожежі, в момент розкриття приміщень, оскільки горіння продуктів термічного розкладання може протікати в кінетичному режимі у вигляді вибуху.

Особливу увагу необхідно приділяти так званому явищу “зворотного спалаху”, коли після ліквідації полум'яного горіння в приміщенні залишаються осередки тління. Відбувається виділення і накопичення продуктів розкладання, які можуть знову спалахнути, і відновиться полум'яне горіння.

ПРИКЛАД 2

Тління може перейти і в полум'яне дифузійне горіння в тих випадках, коли тліюче горіння вийшло з товщі матеріалу на його поверхню. При збільшенні конвекційних потоків повітря до осередку тління відбувається збільшення концентрації кисню на поверхні вуглистою залишку і, отже, збільшується швидкість хімічної реакції горіння. При цьому збільшується кількість тепла, що виділяється із зони горіння і передається в зону піролізу. Швидкість розкладання збільшується, отже збільшується інтенсивність виділення горючих газоподібних продуктів розкладання. Якщо концентрація цих продуктів стане більшою, ніж НКМПП, тління перейде в полум'яне горіння.

§ 5. Способи зниження горючості деревини.

Деревина є одним з найбільш поширених будівельних матеріалів. Знаючи закономірності поведінки деревини при нагріванні, можна знизити пожежну небезпеку цього матеріалу.

Найбільш високотемпературною фазою є полум'яне горіння деревини, при цьому також відбувається швидке поширення пожежі. Тому для запобігання або хоч би сповільнення горіння целюлозовмісних матеріалів необхідно знизити кількість летючих горючих продуктів піролізу, що утворюються при розкладі матеріалу. Для цього можна застосовувати як фізичні, так і хімічні способи впливу на процеси в конденсованій і газовій фазах, а також на тепломасообмін між ними.

Фізичний: сповільнення теплопідводу, погіршення умов підведення окислювача і відведення продуктів піролізу (фізичний бар'єрний механізм).

Хімічний: зміна структури деревини з метою а) сповільнення її розкладання і зниження кількості горючих газів, що виділяються, або б) направленню процесу піролізу матеріалу у бік утворення негорючих газів або хімічних сполук з більш високими значеннями НКМПП.

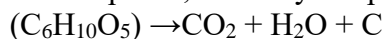
Практично зниження горючості деревини досягається наступними методами:

1) нанесенням на поверхню деревини вогнезахисних покриттів.

Найбільш перспективними вогнезахисними покриттями є покриття, що спучуються, до складу яких входять полімерні речовини як зв'язуюче, антипірен і спучуючі добавки - піноутворювачі. При дії високих температур починають виділятися газоподібні продукти термічного розкладання полімерної основи, покриття спучується, значно збільшується в об'ємі. По мірі зростання температури каркас твердне з утворенням коксового пористого шару, який захищає деревину від впливу полум'я через свою погану теплопровідність.

2) просоченням ЦВМ речовинами, які сприяють протіканню дегідратації деревини з мінімальним виділенням горючих газів і максимальним виходом вугілля.

Істотно знижує горючість ЦВМ просочення водорозчинними антипіренами. Як впливає з розгляду процесу піролізу деревини, ідеальна схема розкладання целюлози, при якій неможливе полум'яне горіння, може бути представлена в загальному вигляді:



Такому напрямку реакції сприяє введення в целюлозу фосфор-, бор- і азотовмісних сполук, які каталізують реакції дегідратації целюлози (збільшується швидкість перетворення і кількість води, що виділяється).

Для ефективного вогнезахисту ЦВМ необхідно не тільки виключити полум'яне горіння, але і подальше тління. Найбільш широко для цих цілей використовується просочення матеріалу неорганічними фосфатами і боратами.

Токсичність продуктів піролізу модифікованої деревини значно нижче, ніж початкового матеріалу.

ВИСНОВОК: Особливості горіння целюлозовмісних матеріалів визначають особливості розвитку пожеж, способи зниження їх пожежної небезпеки, прийоми гасіння пожеж.

Таким чином можна зробити декілька висновків про схожість і відмінності в процесі горіння рідин, і ТГМ.

СХОЖІСТЬ	ВІДМІННОСТІ
ТГМ також горять в дифузійному режимі.	Можуть горіти в гомогенному, змішаному (гомогенно-гетерогенному) або тільки гетерогенному режимам.
Для запалення ТГМ необхідно, щоб концентрація газоповітряної суміші, що утворюється над поверхнею, перевищувала нижню КМПП, а швидкість її утворення була не нижчою за швидкість вигорання	Тепло ДЗ додатково витрачається на плавлення та термічну деструкцію ТГМ
Час теплового впливу при запаленні залежить від природи горючого матеріалу, його теплофізичних властивостей, потужності ДЗ.	Час теплового впливу для ТГМ залежить від геометричних розмірів зразка і його орієнтації в просторі.
Поширення горіння протікає за рахунок потоку тепла від високотемпературної зони полум'я	Якщо для газів домінуючим механізмом передачі тепла в процесі поширення горіння є теплопровідність, для рідин - променистий теплообмін, то для ТГМ істотними є всі три види теплопередачі (qt, qл, qк)
	Наявність особливого режиму горіння - тління

§ 6. Загальні поняття та класифікація полімерів.

Пластичною масою називаються матеріали, що складаються з полімерів або їх сумішей з органічними і неорганічними речовинами, здатні перейти при певних умовах в пластичний стан і приймати під дією деформуючих навантажень певну форму із збереженням її після припинення впливу.

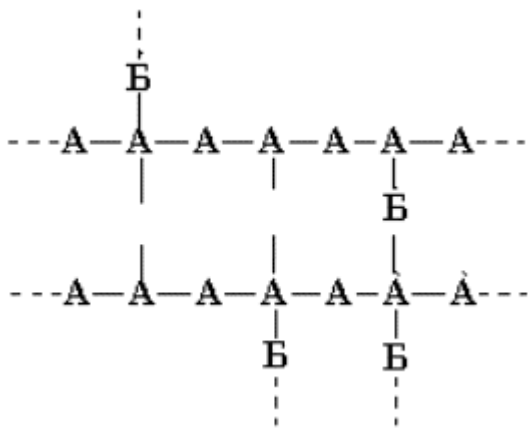
Полімерами називаються високомолекулярні речовини з молекулярною масою більше за 5000 а. од., молекули яких складаються із ланцюгів, що багато разів повторюються. Такі молекули називають, внаслідок їх великої величини, макромолекулами.

Крім полімерів як зв'язуючих до складу пластмас входять наповнювачі, пластифікатори, стабілізатори.

Наповнювач - непластична речовина, яка сприяє підвищенню механічної міцності, теплостійкості, зниженню горючості. Як наповнювач використовують пісок, гіпс, оксиди деяких металів, різні солі.

Пластифікатор - матеріал, що збільшує пластичність матеріалу і полегшують виготовлення виробів з пластмас. У якості пластифікаторів застосовують стеарат алюмінію, трикрезилфосфат і інші речовини.

Макромолекула полімеру утворюється внаслідок взаємодії і поєднання великої кількості молекул низькомолекулярних речовин, що зветься мономерами.



В залежності від будови макромолекули полімери можуть бути високоеластичними (лінійні та деякі розгалужені полімери) або склоподібними (розгалужені та просторові полімери). Деякі полімери розчинні в розчинниках, інші ж не розчинні ні в чому.

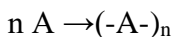
В залежності від структури макромолекули значно змінюється вихід летючих речовин при термічному розкладанні полімерів. Вихід летючих речовин значно менше у разі структур з високою мірою сітчатості, оскільки велика частина цих матеріалів при нагріві утворює нелетку обвуглену масу. Це значно зменшує надходження газоподібної горючої речовини в полум'я. Прикладами таких матеріалів є фенолформальдегідні смоли, які при нагріванні до температури понад 500°C утворюють до 60 % обвугленого залишку.

Пластмаси сітчастої структури відносяться до важкозаймистих матеріалів, тобто можуть горіти тільки при тривалому впливі джерела запалювання.

За способом отримання синтетичних полімерів.

Синтетичні полімери отримують за допомогою реакцій полімеризації і поліконденсації.

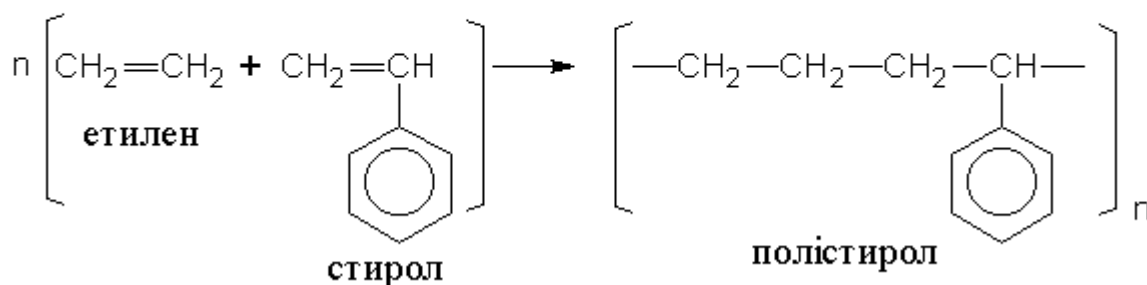
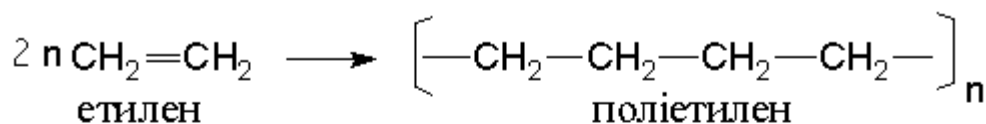
Полімеризацією називають процес, в результаті якого мономерні молекули поєднуються один з одним по ненасичених зв'язках, утворюючи нову речовину, при цьому реакція не супроводжується виділенням побічних продуктів, а отже, протікає без зміни елементарного складу реагуючих речовин. Отриманий полімер відрізняється від початкового мономера фізичними і хімічними властивостями. У загальному вигляді полімеризація може бути відображена схемою:



де А - мономер;

n - ступінь полімеризації, виражає число мономерів, що поєднані в ланцюгу.

Розрізняють гомополімеризацію і сополімеризацію. Наприклад:



У результаті полімеризації отримують полімери лінійної або розгалуженої структури.

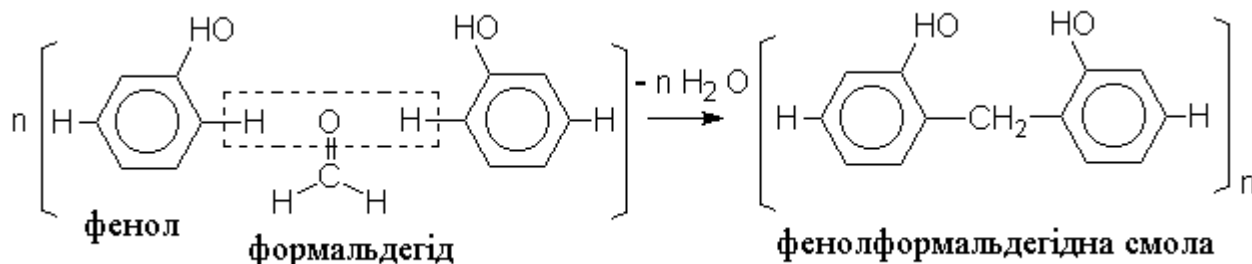
Поліконденсацією називається процес утворення полімерів при взаємодії мономерів, що мають в своєму складі декілька функціональних груп (групи -ОН, -СООН, -NH₂ і інші). Внаслідок

реакції, на відміну від полімеризації, відбувається виділення низькомолекулярних речовин: води, хлористого водню, аміаку і т.п. Елементарний склад отриманого полімеру не співпадає з елементарним складом початкових речовин.

Так само як і у випадку полімеризації розрізняють гомополіконденсацію, наприклад, отримання поліаміду з капронової кислоти:



а також гетерополіконденсацію, наприклад отримання фенолформальдегідної смоли:



Внаслідок реакцій поліконденсації отримують полімери розгалуженої і сітчастої структури.

За поведінкою при нагріванні:

Термопластичні полімери (термопласти). До них відносять полімери, властивості яких оборотно змінюються при багаторазовому нагріванні і охолодженні. При нагріванні вони розм'якшуються і плавляться, переходять в рідкий стан, але знову тверднуть при охолодженні, причому багаторазовий перехід від нагрівання до охолодження не вносить істотних змін в цей процес. Це зумовлюється тим, що при підвищеній температурі полімери не зазнають хімічних змін.

Термопластичні полімери мають лінійну структуру, розчинні в органічних розчинниках, володіють великою механічною міцністю і низькою температурою розм'якшення (80-100°C). Температура займання таких полімерних матеріалів 300-400°C, температура самоспалахування 450-600°C. Теплота згоряння складає більше за 31500 кДж × кг⁻¹ і в умовах пожежі температура горіння може досягати 1600°C. Полум'я має велику потужність теплового випромінювання. Швидкість вигорання становить 30 - 60 кг × м⁻² × год⁻¹.

Термореактивні полімери (реопласти). До них відносять полімери з просторовою або розгалуженою структурою. При термічному впливі властивості таких матеріалів змінюються безповоротно: вони не плавляться, а тільки розкладаються, при цьому макромолекули внаслідок хімічних перетворень з'єднуються між собою з утворенням просторових сітчастих структур. Цей процес супроводжується підвищенням твердості матеріалу і зникненням пластичних властивостей, такі полімери безповоротно переходять в неплавкий і нерозчинний стан і відносяться до ТГМ 2-го роду.

Швидкість горіння у них менше ніж у термопластів (до 30 кг × м⁻² × год⁻¹). Температура горіння становить 1100-1200°C, дим, що утворюється, щільний, отруйний, полум'я яскраве з великим тепловим випромінюванням.

ВИСНОВОК. Таким чином, властивості полімерів визначаються якісним і кількісним складом молекули, а також будовою макромолекули.

§ 7. Основні закономірності процесу горіння пластмас.

Пожежна небезпека природних і синтетичних полімерів визначається їх здібністю до займання і поширення процесу горіння, утворенням небезпечних продуктів горіння. В умовах пожежі при впливі високих температур, полімери, що отримані різними способами і мають різну структуру, поведуться по-різному.

Горючість полімерів сильно залежить від їх спроможності утворювати карбонізований шар на поверхні матеріалу. Плівки полімерів, що при термічному розкладенні утворюють вуглисті шар, наприклад полісульфон, полікарбонат, горять повільніше, ніж плівки полімерів, які не утворюють карбонізованого шару, наприклад, поліамід, поліетилен. Такий факт обумовлений тим, що карбонізований шар, по-перше, зменшує потік тепла від полум'я до поверхні полімеру і, по-друге, перешкоджає дифузії газоподібних горючих продуктів термодеструкції полімеру до полум'я.

7.1. Загальні закономірності горіння полімерних матеріалів.

Всі полімери відносяться до ТГМ, що газифікуються.

Процес горіння полімерів виникає частіше за все внаслідок займання летючих продуктів термічної деструкції, проте, якщо потужність теплового впливу недостатня, процес розкладання відбувається повільно і кількість газоподібних продуктів, що виділяються, буде меншою, ніж НКМПП, тоді горіння може початися внаслідок гетерогенної реакції на поверхні розділу фаз у вигляді тління.

В залежності від структури макромолекули можуть бути 1-го або 2-го роду.

Термопласти, отримані полімеризацією, мають лінійну структуру і відносяться до ТГМ 1-го роду, оскільки при нагріванні вони переходять в рідку фазу. При цьому товщина рідкого шару на горизонтальній поверхні становить 10 - 20 мм, а на вертикальній - 1-2мм. В умовах пожежі для даних полімерів характерні такі явища як розтікання розплаву і краплепадіння при досягненні відносно низьких температур, оскільки швидкість прогрівання і плавлення більше швидкості розкладання і вигорання. За рахунок цього відбувається розширення площі пожежі і створюється додаткова загроза життя людей.

Так при горінні полістиролу стікає до 40% розплавленої маси, а поліетилену низького тиску - до 60%.

Полімер, що розплавляється, стікає і капає, може створювати додаткові осередки горіння. Такий процес спостерігається, наприклад, при виникненні аварійного режиму в люмінесцентному світильнику з розсіюючим екраном з оргскла (поліметилметакрилата - ПММА). Численні мілкі осередки горіння в місцях падіння крапель ПММА, що горять, на килимове покриття підлоги можуть сприяти швидкому подальшому розвитку горіння. Плавлення ізоляції проводів, що знаходяться під струмом, може сприяти виникненню дуги короткого замикання, що поширюється по мірі плавлення ізоляції, вздовж проводу і також сприяє утворенню нових зон горіння.

При загорянні телевізора, наприклад, внаслідок аварійного режиму в блоці рядкової розгортки, полістирол задньої кришки корпусу, що горить і капає, може сприяти виникненню горіння стола або тумбочки під телевізором, підлогового покриття. Саме такий варіант подій мав місце на початковій стадії розвитку пожежі в готелі "Ленінград" (Санкт-Петербург, 23 лютого 1991 року). Аналогічні процеси можуть виникати і при аварійній роботі інших електроприладів; адже ударостійкий полістирол - основний вид пластмаси, що використовується для виготовлення їх корпусів і деталей.

Термореактивні полімерні матеріали (реопласти), отриманні методом поліконденсації, мають розгалужену або просторову (сітчасту) структуру, відносяться до ТГМ 2-го роду, тому що при нагріванні не переходять в рідкий стан, а відразу розкладаються на летючі продукти і твердий

вуглецевий залишок. Це зумовлює можливість як гомогенного так і гетерогенного горіння: після полум'яного вигорання летючих речовин гетерогенно горить твердий вуглецевий залишок.

В умовах пожежі вони можуть спричиняти неприємності іншого роду. Деякі з них (пінополіуретани, фенопласти, латексні піногуми) здібні до тліючого горіння, що може обумовлювати специфічні особливості розвитку пожежі, особливо на першій його стадії.

Характеристики і закономірності горіння полімерів залежать від їх складу і будови макромолекули, однак незалежно від цих чинників зберігається загальний стадійний характер перетворення горючої речовини в кінцеві продукти згорання. Виділяють основні п'ять стадій:

1. Нагрів полімеру до температури розкладання;

2. Деструкція речовини (розплаву, якщо це термопласт, або твердого матеріалу, якщо це реопласт).

Термічна деструкція полімеру починається з відщеплення найменше термостійких фрагментів макромолекули і деструкції відповідних структурних груп. Відбувається це за рахунок розриву зв'язків С-Н, С-Нal, С-О. У окремих полімерів термічна деструкція включає і процес деполімеризації.

Температура початку процесу термічної деструкції у ряді полімерів досить низька. Так наприклад, термічне розкладання полівінілхлориду починається з його дегідрохлорування (відщеплення хлористого водню) при 240°C. У хлорованого поліетилену ця реакція протікає при 135-168°C; у сульфохлорованого поліетилену розкладання починається з виділення сірчистого ангідриду і хлористого водню в інтервалі температур 125-150°C. Полівінілхлорид до 260°C втрачає за рахунок розкладання 50% своєї маси. У полістиролу, наприклад, така міра розкладання досягається при нагріві до 364°C, у поліметилметакрилата (оргскла) - до 327°C.

Внаслідок термічної деструкції полімерів утворюється, як правило, дві групи продуктів - низькомолекулярні летючі продукти (осколки макромолекул) і твердий вуглецевий (коксівий) залишок.

Відщеплення найбільш термолабільних груп на початкових стадіях піролізу і поступова карбонізація (збагачення вуглецем) вугільного залишку повинні приводити до відповідного зниження вмісту в ньому гетероатомів - азоту, кисню, галогенів, сірки, фосфору. І, дійсно, в залишках хлорованих полімерів, по мірі підвищення температури і тривалості їх нагріву, знижується вміст хлору. Пінополіуретани втрачають азот за рахунок відщеплення ціанідів, ізоціанатів і ін. речовин; жорсткі ППУ (метандіізоціанат, ізоціанурат) відщеплюють майже весь азот при нагріві до 500°C, а еластичні ППУ ще швидше - до 300°C (при часі термічного нагріву 15 хв.).

3. Нагрів газоподібних продуктів розкладання і їх додатковий крекінг;

4. Запалення летючих продуктів розкладання при досягненні концентрації, що дорівнює НКМПП, стадія гомогенного горіння.

5. У разі наявності твердого залишку після завершення стадії гомогенного горіння може наступити стадія гетерогенного горіння вуглецю.

Відмінними особливостями горіння всіх полімерів є:

відсутність певних температур кипіння і плавлення, внаслідок великої молекулярної маси полімери спочатку не випаровуються, а розкладаються;

велика щільність задимлення;

режим горіння (гомогенне, гетерогенне) залежить від структури макромолекули та складу пластмас;

велика теплотворна здатність, а, отже, і висока температура горіння;

можливість розтікання та краплепадіння при горінні термопластів;

висока токсичність продуктів їх розкладання і горіння,

Продукти розкладання представляють підвищену небезпеку для людини, оскільки є високо токсичними.

Показник токсичності продуктів горіння - кількість матеріалу, при згорянні якого в одиниці замкненого об'єму продукти, що виділяються, викликають загибель 50% піддослідних тварин.

Токсичність газоподібних продуктів згорання полімерів обумовлюється наявністю в них цілої гами речовин. Наприклад, в продуктах термоокислювальної деструкції і неповного згорання поліуретанів містяться ізоціанати, ціанистий водень, ацетонітрил, акрилонітрил, метан, етан і інші насичені та ненасичені вуглеводні, окисел вуглецю. Пінополістирол при горінні виділяє окисел вуглецю, фенол, ацетон, бензол, стирол, інші токсичні компоненти. Вуглекислий газ (двоокис вуглецю), продукт повного згорання вуглецю полімерів, не володіє токсичною дією, але також представляє небезпеку для людини, так як виділяється у великих кількостях і своєю присутністю знижує вміст кисню в газовій фазі.

Основним небезпечним компонентом газоподібних продуктів згорання більшості синтетичних полімерів, так як і деревини, потрібно вважати окис вуглецю (СО). Він має високу токсичність і виділяється у значних кількостях при горінні будь-яких вуглеводнів.

Загалом, для більшості полімерних матеріалів рівень виділення СО становить 40-200 мг/г згорілих матеріалів, а для оздоблювальних матеріалів він може становити 400-600 мг/г і вище.

Концентрація окислу вуглецю СО, що приводить до загибелі людини за час від 3 до 60 хвилин, становить 0,2-1,0 % (2500-12000 мг/м³).

Сополімери, в основному, більше пожежонебезпечні, ніж гомополімери, особливо, якщо їх компоненти представляють більшу пожежну небезпеку, чим основний полімер.

Летючі продукти, скупчуючись в закритому приміщенні з недостатнім повітрообміном або в окремих застійних зонах, можуть приводити до виникнення вельми неприємних ситуацій в ході розвитку пожежі або при її гасінні. Так, наприклад, при різкому надходженні нових порцій повітря, внаслідок відкривання дверей або руйнування скління в приміщенні, може статися спалах газоподібних продуктів піролізу, концентрація яких була більшою за НКМПП. З подібними ситуаціями часто доводиться стикатися при пожежі (вибуху) в саунах. У цьому випадку причиною є накопичення газоподібних продуктів піролізу природних полімерів – лігніну та целюлози деревини, але відомі подібні вибухи, пов'язані і з піролізом синтетичних полімерів. Так, наприклад, великий вибух стався на складі, де зберігалися матраци з піногуми. Причиною вибуху послужило накопичення горючих газоподібних продуктів тривалого низькотемпературного піролізу (тління) даного полімеру.

Полімери погано змочуються водою, тому гасити їх потрібно водою зі змочувачем, повітряно-механічною піною, застосовуючи ізолюючі протигази.

7.2. Способи зниження горючості полімерів і виробів на їх основі.

Розуміння загальних закономірностей перетворення початкової полімерної речовини в кінцеві продукти згорання дає можливість цілеспрямовано підходити до розв'язання проблеми зниження горючості полімерних матеріалів.

Для запобігання або хоч би сповільнення горіння полімерів можна застосовувати як фізичні, так і хімічні способи впливу на процеси в конденсованій і газовій фазах. Існує декілька способів придання вогнестійкості полімерам і матеріалам на їх основі:

Вогневий захист полімерів за рахунок утворення на поверхні полімеру негорючої склоподібної плівки під дією високої температури на деякі компоненти пластмас (борна кислота, бура, сполуки фосфору і інші), яка погіршує підведення окислювача і відведення продуктів піролізу;

Модифікація полімерів реакційноздатними сполуками, які спричиняють зміну структури полімеру з метою сповільнення його розкладання і інгібування полум'яних реакцій (обрив радикально-ланцюгових реакцій горіння за допомогою продуктів їх деструкції);

Введення негорючого наповнювача (гіпсу, оксидів деяких металів, кремнію, різних солей);

Введення в композицію антипіренів, які сприяють зміні механізму реакцій деструкції полімерів і збагаченню газової фази негорючими речовинами (H₂O, CO₂, HCl і ін.).

Вибір конкретного методу зниження горючості залежить від багатьох чинників: природи полімеру, технології його отримання, області застосування і умов його експлуатації, необхідного рівня зниження горючості, екологічних і економічних міркувань.

Висновок: Основна маса полімерних матеріалів є горючими, а характер горіння залежить від будови полімеру. Продукти розкладання і горіння токсичні, тому при гасінні пожеж необхідні додаткові заходи безпеки і використання ізолюючих протигазів.

§ 8. Горіння металів.

Горючими є тільки ті метали, які можуть підтримувати самостійне горіння на повітрі після впливу джерела запалювання середньої потужності.

Метали на пожежах можуть горіти суцільною масою (калій, кальцій, натрій, магній) або у вигляді стружок, порошоків (алюміній, титан і ін.). Особливістю займання часток металу, яка відрізняє їх від інших горючих речовин, є утворення на поверхні окисної плівки внаслідок реакції окислення, що передують горінню і прискорюються при нагріві. Початковою стадією реакції між металом і киснем є адсорбція газу на його поверхні. Адсорбція може бути зумовлена фізичними і хімічними силами. Якість і поведінка поверхневої окисної плівки, що утворилася, впливають на горючість часток. Пориста, рихла окисна плівка не перешкоджує подальшому окисненню металу. Щільна плівка, що добре пов'язана з основним металом, ускладнює окислювальний процес.

Характер горіння металів залежить від температури кипіння самого металу, а також від температури плавлення оксиду та його властивостей. За співвідношенням цих температур метали поділяють на дві групи: летючі і нелетючі.

Летючі метали					
метал	$T_{пл}, K$	$T_{кип}, K$	Оксид Me	$T_{пл}, K$	$T_{кип}, K$
Li	454	1620	Li ₂ O	1700	2823
Na	317	1156	Na ₂ O	1190	2190
K	337	1052	K ₂ O	700	1750
Mg	923	1381	MgO	3075	3350
Ca	1124	1755	CaO	2858	3800
Нелетючі метали					
метал	$T_{пл}, K$	$T_{кип}, K$	Оксид Me	$T_{пл}, K$	$T_{кип}, K$
Al	932	2679	Al ₂ O ₃	2418	3800
Be	1556	2750	BeO	2823	4123
Ti	1950	3550	TiO ₂	2138	4100
Zr	2125	4650	ZrO ₂	2960	5200

Летючі метали мають відносно низькі температури фазового переходу - $T_{пл}$ менше за 1000K, $T_{кип}$ не перевищує 1500K (виключення лише кальцій). $T_{кип. летючих Me} < T_{пл. їх оксидів}$, тому при

нагріванні метал буде переходити в рідкий стан, але на поверхні рідкого металу буде знаходитися кірка твердого пористого оксиду. Крім того, температура кипіння летючих металів менше температури їх полум'я, тому в процесі горіння такі метали киплять.

До цієї групи відносяться лужні метали (літій, калій, натрій і інші) і лужноземельні (магній, кальцій).

При піднесенні джерела запалювання до летючого металу відбувається нагрівання і подальше його окислення. При подальшому нагріванні оксидна плівка залишається твердою (велика температура плавлення), а метал починає плавиться і переходить в рідкий стан. Пара металу дифундує крізь пористий твердий окисел в повітря. Коли концентрація пари металу в повітрі досягне НКМПП, відбувається займання. Зона гомогенного дифузійного горіння встановлюється у поверхні оксиду і велика частка тепла передається металу, внаслідок чого він нагрівається до температури кипіння. Кипіння металу спричиняє періодичне руйнування оксидної плівки, що інтенсифікує горіння.

Продукти горіння (оксиди металів) дифундують не тільки до поверхні металу, сприяючи утворенню кірки оксиду, але і в повітря, де вони, охолоджуючись, конденсуються і утворюють тверді частинки у вигляді білого диму. Утворення білого щільного диму є візуальною ознакою горіння летючих металів.

До нелетючих металів відносяться алюміній, берилій, титан та цирконій. Температури фазових переходів нелетких металів значно вище, ніж у летючих. Так, $T_{пл}$ таких металів, як правило, вище за $1000K$, а їх $T_{кип}$ більше $2500K$, до того ж $T_{кип}$ нелетучих $Me > T_{пл}$ їх оксидів. При нагріванні метал буде переходити в рідкий стан, а оксидна плівка буде в ньому плавитися.

На поверхні нелетучих металів утворюється досить щільна оксидна плівка, яка служить захистом від подальшого процесу окислення. При тепловому впливі на їх поверхню метал починає плавитися, однак температури кипіння таких металів більша, ніж температура їх горіння, крім того наявність щільної плівки обумовлює низьку інтенсивність випаровування, отже швидкість дифузії пари металу в повітря незначна. Концентрація пари металу в повітрі менше, ніж НКМПП, отже полум'яне горіння не виникає.

Якщо інтенсивність теплового впливу недостатня для нагріву окисної плівки до температури більшої, ніж температура її плавлення, то горіння не виникає, а відбувається лише збільшення окисного шару внаслідок протікання повільної реакції окислення за рахунок дифузії кисню через окисну плівку.

Збільшення тривалості теплового впливу та температури нагріву приводить до розплавлення оксидної плівки в розплав металу, при цьому на поверхню вийде нагрітий до високої температури метал, який відразу ж починає окислюватися киснем повітря на кордоні розділу фаз. Горіння відбувається в гетерогенному режимі.

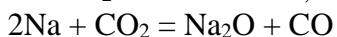
Якщо температура краплі металу всередині оболонки із рідкого окисла досягає температури кипіння, то оболонка вибухає і утворюються краплі металу меншого розміру, що, природно, веде до інтенсифікації горіння.

Як правило, пожежі таких металів мають місце в тому випадку, коли вони знаходяться у вигляді стружки, порошоків і аерозолів. Їх горіння відбувається без утворення щільного диму.

Необхідно відмітити деякі особливості горіння металів:

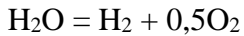
1. Режим горіння металу залежить від природи окисної плівки, що утворюється на поверхні частки металу.

2. Горіння металів може відбуватися не тільки в окислювальному середовищі повітря, але і в продуктах горіння органічних речовин. У цьому випадку горіння протікає за рахунок екзотермічної реакції відновлення води до водню, а двоокиси вуглецю до його оксиду по реакціях:

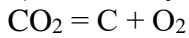


3. Метали горять із виділенням великої кількості енергії і з потужним світловим випромінюванням. Тому особливістю горіння металів є висока температура їх горіння 2500 - 3500 К. У зв'язку із цим заборонено:

а) гасіння металів, що горять, водою внаслідок її розкладання на водень і кисень;



б) гасіння вуглекислотою (розкладається на вуглець і кисень).



§ 9. Загальна характеристика та властивості пилу.

Пил - колоїдна система, що складається з твердої дисперсної фази і газоподібного дисперсійного середовища, тобто являє собою тверду речовину, що тонко роздрібнена в газоподібному середовищі.

Дисперсна система, що являє собою пил, завислий в повітрі, називається аерозолем. Осілий з повітря пил називається аерогелем.

Навіть в осілому стані кожна окрема частка роздробленої речовини з всіх сторін оточена газовою (повітряною) оболонкою.

З властивостей пилу, що визначають його пожежну небезпеку, найбільш важливими є:

дисперсність,

хімічна активність,

адсорбційна здатність,

схильність до електризації.

Дисперсність - міра подрібнення матеріалу.

Якщо за d прийняти середній діаметр частки, то величина $1/d$ називається ступенем дисперсності.

Пожежна небезпека, особливості горіння речовин в умовах пожежі істотно залежать від ступеня подрібнення речовини. Існує ряд речовин, які у вигляді виробу можна з упевненістю віднести до важкогорючих, але внаслідок подрібнення цей же матеріал стає не тільки горючим, але і вибухонебезпечним.

Дисперсна фаза може складатися з часток однакової величини (монодисперсна система) або часток різної величини (полідисперсна система). Вся промислова пил є полідисперсною.

За дисперсністю пил класифікують на три класи:

мілко - дисперсні	середньо - дисперсні	грубо – дисперсні
$d = 10^{-5} \div 10^{-8}$ см.	$d = 10^{-3} \div 10^{-5}$ см.	$d > 10^{-3}$ см.

У залежності від середнього розміру часток пил може тривало знаходитися у завислому стані або відразу ж осідати після короточасного переходу у завислий стан. Чим більша дисперсність часток, тим менша швидкість їх осадження, оскільки процес осадження під дією сили тяжіння урівноважується опором газового середовища.

Мілко - дисперсні	Середньо - дисперсні	Грубо – дисперсні
Тривало знаходяться в повітрі, так як дифузійне рушення сильно перешкоджає осадженню.	Вільно переходять з осілого стану у завислий, осідають з швидкістю декілька мм в годину.	Короткочасно переходять в повітря, осадження відбувається з швидкістю біля 1,2 м/с.

Хімічна активність - здатність речовини вступати в хімічні реакції з різними речовинами, в тому числі і в реакцію горіння.

Хімічна активність пилу визначається природою речовини, з якої вона утворена, і дисперсністю часток.

Хімічна реакція в гетерогенних системах протікає на поверхні контакту реагуючих речовин і чим більше поверхня контакту, тим вище швидкість реакції. Тому при збільшенні дисперсності речовини, що приводить до збільшення площі поверхні контакту, відбувається зростання хімічної активності пилу.

На практиці залізо, алюміній, цинк не горять при звичайних умовах, так як швидкість їх окислення невелика. При подрібненні ж таких речовин швидкість реакції збільшується, що приводить до їх самозаймання при контакті з повітрям. Тому пудри і порошки таких металів готують в середовищі інертного газу (N_2 або Ar) і перетирають з парафіном.

Крім зміни хімічної активності твердої речовини в процесі його подрібнення змінюється і його адсорбційна здатність.

Адсорбційною здатністю називається здатність речовини поглинати і утримувати на своїй поверхні навколишні пари і гази за рахунок сил міжмолекулярної взаємодії. Адсорбція супроводжується виділенням тепла.

Речовини пористої структури володіють більш високою адсорбційною здатністю. Так 50 см^3 сажі адсорбує на своїй поверхні 950 см^3 повітря.

Наявність на поверхні пилинок кисню сприяє протіканню хімічної реакції, тобто збільшує хімічну активність пилу. Об'єму адсорбованого кисню не досить для повного згорання речовини, але для первинного виникнення горіння його досить.

Однак, якщо пил адсорбує на своїй поверхні негорючі гази, його пожежна небезпека зменшується (знижується схильність пилу до самозаймання, підвищується температура самоспалахування). Це явище знаходить практичне застосування на промислових об'єктах.

Електризацією називається здатність пилу набувати заряд статичної електрики.

Частки аерозолі, нейтральні в момент утворення (при дробленні або розпиленні речовини), можуть набувати електричний заряд за рахунок адсорбції іонів з газового середовища. Заряджатися частки дисперсної фази можуть і при механічній взаємодії одна з одною, при терті о поверхню.

У залежності від умов електризації дисперсні частки речовини можуть набувати як однакові, так і різні по полярності заряди, але частіше за все пилова хмара має однаковий заряд, що приводить до підвищення її стійкості.

Чим більше швидкість рушення пилу і більше міра дисперсності, тим більше величина заряду статичної електрики.

Головна небезпека електризації полягає в тому, що накопичений електричний потенціал здатний розрядитися в пиловій хмарі горючої речовини і стати джерелом запалювання. Проведені дослідження показали, що при подрібненні речовин електричний потенціал може досягати декількох тисяч вольт, так в зернодробарці заряд досягає 10-11 тисяч, у вальцових млинах до 5-7 тисяч вольт. Основним заходом, що забезпечує безпеку в таких випадках, є заземлення всіх металевих частин пристрою.

Висновок: пожежна небезпека пилу обумовлюється пожежонебезпечними властивостями речовини, з якої вона отримана, але визначальним чином на пожежовибухонебезпечку пилу загалом впливає міра подрібнення (дисперсність) часток пилу, так як із збільшенням міри дисперсності підвищуються питома поверхня часток, хімічна активність, схильність до електризації, адсорбційна здатність (пил легше поглинає на своїй поверхні пару і гази).

§ 10. Запалення дисперсних систем.

§ 10.1. Виникнення горіння пилу.

Виникнення горіння пилу можливе по трьох механізмах: запалення внаслідок впливу джерела запалювання, самоспалахування і самозаймання.

Схильність до займання - здатність речовини загорятися при впливі джерела запалювання і самостійно підтримувати горіння.

У процесі запалення пилу спостерігаються ті ж закономірності, що у твердих і газоподібних горючих речовин. Летучі компоненти палива – це частина твердого матеріалу, яка під час нагрівання переходить в газоподібний стан в процесі розкладання. Саме ця частина палива створює можливість виникнення вибуху пилоповітряних сумішей.

Відмінною рисою горіння пилу є те, що пил має велику питому поверхню, на якій активно адсорбується кисень повітря. Цей факт обумовлює більшу швидкість протікання реакцій окислення.

При впливі на пил джерела запалювання поверхня матеріалу отримує певну кількість тепла. За рахунок цього тепла, поглинання якого залежить від фізичних властивостей матеріалу і умов, що сприяють його накопиченню або розсіюванню, ділянка, що обігривається, нагрівається до температури, при якій починається процес фазового переходу, характерний для початкового ТГМ – плавлення, сублімація або розкладання. Навколо частки твердого залишку утворюється парогазова сфера. Запалювання відбувається вже в газах, що утворилися, тому до умов запалювання аерозолів органічних речовин застосовні закономірності, установлені для газів. При цьому приймаються допущення:

концентрація горючої речовини в суміші з окислювачем знаходиться в області займання; сферичний об'єм газової суміші, що утворився, є однорідним за складом.

Парогазова суміш, що утворилася, нагрівається, виникає окислення, що забезпечує виділення тепла, яке, в свою чергу, різко прискорює реакцію. При досягненні критичної концентрації газів а, отже, і інтенсивності тепловиділення виникає полум'яне горіння. При цьому утворюється “вогненна сфера”.

Мінімальна енергія запалювання аерозолу – найменша енергія іскри електричного розряду, при якій виникає запалення аерозолу оптимальної концентрації.

У тепловій моделі запалювання, запропонованій Зельдовичем, показано, що запалювання горючої суміші станеться при умові нагрівання до температури горіння деякого сферичного об'єму, радіус якого повинен перевищувати характерну ширину фронту ламінарного полум'я $\delta_{п}$:

$$\rho_{кр} > 3,7 \delta_{п} \quad \delta_{п} = a_t / u_{п}$$

Ця умова забезпечує запалення навколишньої суміші до моменту вихолонення первинного об'єму.

Мінімальна енергія E_{min} , яка необхідна для запалення дисперсної системи, складається з теплоти, що затрачується на нагрів частки пилу до температури початку фізико-хімічних перетворень ($Q_{нагр}$), теплоти, що витрачається на газифікацію твердого матеріалу внаслідок протікання фізико-хімічних перетворень ($Q_{розкл.}$) і теплоти запалення отриманих газоподібних продуктів, тобто теплоти, що витрачається на нагрів газової сфери від температури газифікації до температури горіння ($Q_{запал.}$):

$$E_{min} = Q_{нагр} + Q_{розкл.} + Q_{запал.}$$

Прийнявши, що частка переходить в газоподібний стан без залишку, мінімальна енергія іскрового розряду, яка необхідна для нагріву частки радіусом $r_ч$ від початкової температури до температури горіння може бути представлена у виді:

$$E_{min} = \frac{4}{3} \pi r_ч^3 \rho_{ТВ} [c_{р_{ТВ}} (T_{розкл.} - T_0) + H_{розкл.}] + \frac{4}{3} \pi r_{гс_{кр}}^3 \rho_{гс} c_{р_{гс}} (T_{гор} - T_{розкл.})$$

де T_0 , $T_{розкл.}$, $T_{гор}$ - температури початкова, розкладання і горіння відповідно, К;

$H_{\text{розкл}}$ - теплота розкладання, $\text{кДж} \times \text{кг}^{-1}$;

$r_{\text{гскр}}$ - радіус газової сфери, що утворилася внаслідок газифікації частки пилу, м;

$r_{\text{ч}}$ - початковий радіус частки пилу, м;

$c_{\text{р}}^{\text{ТВ}}$, $c_{\text{р}}^{\text{Г}}$ - теплоємність твердого матеріалу та газової сфери, $\text{кДж} \times \text{кг}^{-1} \times \text{K}^{-1}$.

Температура займання пилу $T_{\text{займ}}$ - найменша температура, при якій пил, розкладаючись, виділяє таку кількість газоподібних продуктів, яка достатня для запалення від джерела запалювання.

Температура займання пилу залежить від стану пилу (у аерогелю температура запалення менше, ніж у аерозолі), дисперсності (чим більше міра дисперсності, тим нижче $T_{\text{займ}}$), вологості матеріалу (чим більше вологість, тим вище $T_{\text{займ}}$), вмісту негорючих компонентів в газовому середовищі (чим більше вміст негорючих газів, тим вище $T_{\text{займ}}$),

вмісту кисню в повітрі (чим більше вміст кисню, тим нижче $T_{\text{займ}}$).

Крім вимушеного запалювання горіння дисперсних систем також може виникнути за рахунок процесу самоспалахування - виникнення полум'яного горіння внаслідок різкого збільшення швидкості реакції окислення газоподібних продуктів розкладення матеріалу пилу.

Як тільки інтенсивність тепловиділення окислювального процесу $q(+)$ перевищить швидкість тепловтрат від прогрітих дисперсних часток, починається саморозігрів часток, який веде до самоспалахування всієї дисперсної системи. Умову самоспалахування можна записати як:

$$q(+)> q(-)$$

Температура самоспалахування пилу - найменша температура, при якій самоспалахують газоподібні продукти, що утворилися при газифікації пилу внаслідок теплового впливу.

Величина $T_{\text{сс}}$ залежить від ступеню подрібнення матеріалу і стану пилу.

Чим більша міра дисперсності, тим вище питома поверхня і хімічна активність пилу, більше інтенсивність тепловиділення при окисленні поверхні, а, отже, нижче $T_{\text{сс}}$ і тим більше небезпечний пил.

$T_{\text{сс}}$ у аерозолі завжди вище, ніж у аерогелю. Пояснюється це меншою інтенсивністю тепловіддачі від часток в стані аерогель, а також тим, що концентрація горючої речовини в одиниці об'єму аерозолі в сотні разів менше, ніж у аерогелю, тому при окисленні аерозолі швидкість виділення тепла може перевищити швидкість тепловіддачі тільки при більш високій температурі.

Виникнення горіння пилу внаслідок самозаймання характерне тільки для аерогелю. Велика поверхня контакту дисперсних часток з киснем зумовлює значне виділення тепла при окисленні. При достатній товщині пилового шару і незначній площі тепловіддачі виникають умови для акумуляції тепла а, отже, виникнення горіння.

Для пилу можливі всі види самозаймання.

Пил різних полімерів схильний до теплового самозаймання. У процесі розкладання початкового матеріалу і окислення газоподібних продуктів виникає самонагрівання і відбувається обуглювання матеріалу. Вуглецевий залишок, що утворюється, адсорбує пари і газів і нагрівається, швидкість реакції окислення збільшується, через деякий час може виникнути тління. Здатність аерогелю розповсюджувати тління всередині шару представляє велику небезпеку тим, що готує до горіння велику масу пилу, яка при певних умовах переходить з стану тління в полум'яне горіння.

Вугільний пил виявляє велику схильність до фізичного самозаймання, первинним імпульсом якого є тепло, що виділяється при адсорбції на пористій поверхні пилинок парів і газів.

Пил целюлозовмісних матеріалів при певних умовах схильний до мікробіологічного самозаймання.

Металеві пудри і порошки мають схильність до хімічного самозаймання при взаємодії їх з киснем повітря. На схильність металевих пудр до самозаймання великий вплив має дисперсність часток. Так цирконієвий пил самозаймається при дисперсності часток до 3мкм , а більш великі частки не самозаймаються.

Режим горіння часток пилу залежить від особливостей горіння початкового матеріалу і дисперсності часток.

Так, високодисперсний пил при нагріванні весь встигає перейти в газоподібний стан - горіння протікає в гомогенному режимі. Пил, що отримано з ТГМ 2-го роду, при нагріванні утворює крім газоподібних продуктів твердий вуглецевий залишок - горіння може проходити в змішаному режимі. Частки пилу, що утворені вуглецем або нелетучими металами, при горінні окислюються безпосередньо на поверхні, горіння є гетерогенним.

10.2. Поширення горіння в аеродисперсній системі.

Під дією джерела запалювання відбувається запалення пилу в елементарному об'ємі, після чого фронт полум'я починає поширюватися по всьому об'єму аерозолі. Відмінна риса горіння пилоповітряних сумішей у порівнянні з газовим полягає в тому, що взаємодія між паливом і окислювачем може здійснюватися тільки на поверхні розділу хімічно-активних фаз системи. При цьому швидкість перетворення вихідної речовини в кінцеві продукти обумовлюється не тільки хімічними процесами, але і процесами масообміну, що відбуваються в результаті дифузії, конвекції теплопровідності і випромінювання.

Існує декілька теорій, що пояснюють механізм поширення горіння в пилоповітряних системах.

Кондуктивна теорія горіння аерозолів була історично першою моделлю детального аналізу процесу поширення полум'я по аеродисперсних системах. У кондуктивній теорії вирішальна роль в прогріванні і запаленні часток пального (або летючих речовин, що виділяються з них) свіжої суміші належить молекулярній теплопровідності по газу. Схема теплопередачі виглядає таким чином:

продукти горіння → повітря → частки аерозолі

При цьому реально існуюча неоднорідність розподілу параметрів (твердої фази, температури і швидкостей рушення фаз) усереднюється на відстані, рівній приблизно середній відстані між сусідніми частками. Функція тепловиділення усереднена по об'єму, що займається часткою в пиловій хмарі.

Із збільшенням діаметра часток пального збільшується час їх горіння, а, отже, відбувається розширення фронту полум'я $\delta_{п}$. Це, в свою чергу, відповідно до теплового механізму горіння означає зниження швидкості поширення хвилі хімічної реакції по аерозолі:

$$u_{н} = a_t / \delta_{п}$$

Кондуктивну модель можна використати при описі процесу поширення полум'я по аерозолі мілкодисперсних органічних матеріалів ($d < 10$ мкм), коли ширина фронту полум'я виявляється порівнянною з шириною полум'я гомогенних сумішей.

Проте кондуктивна теорія горіння аерозолів не могла пояснити такі експериментальні факти як:

аномально високі швидкості поширення полум'я (під час вибухів вугільного пилу в шахтах фактична швидкість поширення фронту полум'я досягала $1000 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$ проти розрахункових значень $= 0,8 \text{ см} \times \text{с}^{-1}$),

відповідність максимуму швидкості поширення полум'я концентрації аерозолі, що істотно (в декілька разів) перевищує стехіометричну.

залежність концентрації аерозолі, що відповідає максимальній швидкості поширення фронту полум'я, від дисперсності пилу (із збільшенням розміру часток оптимальна концентрація знижується).

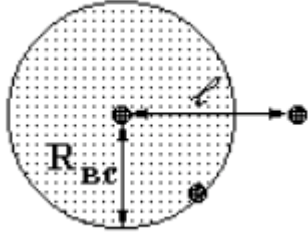
Для вирішення протиріччя, що виникло між теорією і експериментом, була зроблена спроба пояснити механізм поширення полум'я по аерозолі великих часток ($d > 10$ мкм) за допомогою радіаційної теорії горіння гетерогенних систем.

Якщо поширення полум'я в газових сумішах зумовлено прогріванням холодної суміші за рахунок теплопровідності, то поширення полум'я в пилоповітряних сумішах забезпечується за

рахунок запалення часток свіжої суміші випромінюванням від зони реакції і продуктів горіння за схемою:

продукти горіння → радіаційний потік тепла → частки

Стаціонарне поширення фронту полум'я відбувається за естафетним механізмом, який зводиться до того, що одна частка підпалює іншу. Необхідною умовою поширення горіння є попадання в зону теплового впливу частинки, що горить, (в зону “вогненної сфери”) холодної пилінки, тобто $l < R_{вс}$.



Частки, які ще не горять, займаючись, стають джерелами запалення наступних шарів суміші. Енергія, яка виділяється в парогазовій хмарі при горінні, повинна бути достатньою для протікання підготовчих процесів в холодній пилінці.

При дослідженні вибуху аерозолу тетраліна при концентрації близькій до НКМПП було відмічено, що розмір мікрополум'я навколо окремих часток приблизно співпадає з відстанню між частками. Ця обставина є експериментальним підтвердженням естафетного механізму горіння.

Умови для поширення горіння пилоповітряної суміші виникають у результаті передачі тепла із зони запалення до прилягаючої до неї не палаючої частки шляхом випромінювання, теплопровідності і конвекції.

Запалення і горіння пилоповітряної суміші можливі тільки у відповідному діапазоні концентрацій, при визначеній дисперсності твердої горючої фази і достатній потужності джерела запалювання.

Швидкість фронту полум'я u_H визначається з припущення, що прогрівання холодного об'єму аерозолу від початкової температури до температури запалення відбувається за час dt за рахунок променистого потоку від фронту аерозольного полум'я.

$$\sigma T_e^4 dt = \rho u_H c_p \mu (T_{зап} - T_0) dt$$

де s - коефіцієнт Стефана-Больцмана;

T_e - еквівалентна температура випромінювання;

T_0 - початкова температура аерозолу;

ρ - густина аерозолу;

μ - концентрація (об'ємна частка) дисперсної фази в аерозолу;

c_p - об'ємна теплоємність аерозолу.

З цього співвідношення знаходимо:

$$u_H = \frac{\sigma T_e^4}{c_p \rho \mu (T_{зап} - T_0)}$$

Необхідно зауважити, що фронт полум'я в пилоповітряній хмарі може рухатися з прискоренням за наявності певних умов. Одна з головних умов – велика довжина шляху, який проходить фронт полум'я.

Під час горіння пилоповітряних сумішей в замкнених або напівзамкнених протяжних об'ємах (тунелях, галереях, трубах) швидкість поширення полум'я може досягати звукової, при цьому різко

підвищуються тиск і виникають потужні ударні хвилі. Існують експериментальні дані про перехід дефлаграційного горіння пилоповітряних сумішей в подібних умовах в детонаційне, при якому процес перетворення початкових продуктів реакції в кінцеві поширюється з надзвуковою швидкістю. Швидкість поширення горіння при цьому може досягати декількох сотень і навіть тисяч метрів за секунду.

§ 11. Особливості горіння пилу.

§ 11.1. Особливості горіння пилу в осілому стані.

Загалом горіння пилу в осілому стані подібно до горіння твердого горючого матеріалу, з якого цей пил отримано. При нагріванні протікають всі ті ж підготовчі процеси, що характерні для твердих горючих матеріалів.

Основними параметрами, що характеризують пожежну небезпеку аерогелю, є температури займання і самоспалахування.

Однак, через високу дисперсність речовини, горіння аерогелю має певні особливості.

1. Температура займання та час займання для пилу менше, ніж для ТГМ, з якого цей пил отриманий, а швидкість поширення горіння більша.

Це пояснюється розвинутою поверхнею поглинання тепла, підвищеною хімічною активністю, зниженою теплопровідністю матеріалу при його подрібненні, збільшеною адсорбційною здатністю пилу і швидкістю процесу розкладення.

2. Аерогель має підвищену схильність до самозаймання у порівнянні із вихідним матеріалом, з якого пил отриманий, через велику площу поверхні окислення і погіршеними умовами тепловіддачі через низький коефіцієнт теплопровідності дисперсної маси.

3. Відмітною особливістю горіння аерогелю є його здатність переходити у завислий стан. Пил може переходити у завислий стан внаслідок механічної дії (струшування), дії повітряних потоків, а також до завихрення пилу може приводити турбулентний рух продуктів горіння, які утворюються при швидкому поширенні горіння по поверхні відкладення пилу.

При поширенні полум'я над поверхнею аерогелю хвиля горіння приводить до підвищення тиску перед фронтом полум'я і утворення повітряних конвекційних потоків. Глибина зони підвищеного тиску порівнянна з висотою вогненного валу - висотою підйому завихреного пилу H .

Збільшення швидкості поширення фронту полум'я відбувається при збільшенні концентрації пилу в повітрі безпосередньо перед фронтом полум'я.

Потужні конвекційні потоки, що виникають при горінні, можуть приводити до завихрення пилу в всьому об'ємі і переходу горіння в кінетичний режим. Саме ця здатність осілого пилу легко завихрюватися (переходити в стан аерозоль) визначає особливості пожеж, що протікають на промислових об'єктах, пов'язаних з переробкою або отриманням пилу.

4. Окислювальні процеси протікають одночасно як на поверхні пилового шару, так і в його глибині за рахунок кисню, який адсорбований на поверхні часток пилу. Швидкість протікання процесів окислення під шаром горючого пилу на порядок нижче, ніж на поверхні, в результаті горіння в товщі пилового відкладення може перейти в режим тління. Тліючий пил представляє велику небезпеку, оскільки: 1) горючі продукти розкладання, що виділяються, можуть накопичуватися в закритих об'ємах, і горіння з дифузійного може перейти в кінетичне; 2) навіть при слабкому струшуванні (завихренні) тліюча маса може самоспалахувати через різке надходження кисню і викликати вибух завислого пилу.

11.2. Особливості горіння пилу у завислому стані.

Аерозолі по своїх властивостях займають проміжне положення між аерогелем і гомогенною газоповітряною сумішшю. Так як і аерогелі аерозолі є гетерогенними дисперсними системами з однаковою твердою фазою, і поведінка їх визначається фізико-хімічними властивостями цієї

твердої фази. З газоповітряними сумішами аерозолі схожі тим, що горіння більшості з них протікає в кінетичному режимі або із вибухом, і тому їх пожежна небезпека характеризується параметрами, типовими для газових сумішей, а саме: КМПП, мінімальною енергією запалювання, максимальним тиском вибуху.

Однак потрібно відзначити особливості горіння аерозолі у порівнянні із горінням газів.

1) Аерозоль – гетерогенна система, що складається із твердої фази. Ця властивість обумовлює більш високу енергію запалювання (на два порядки вище), чим для газових сумішей.

2) Запалення і поширення полум'я по всьому об'єму аерозолі відбувається тільки в тому випадку, якщо її концентрація знаходиться в діапазоні концентраційних меж запалення.

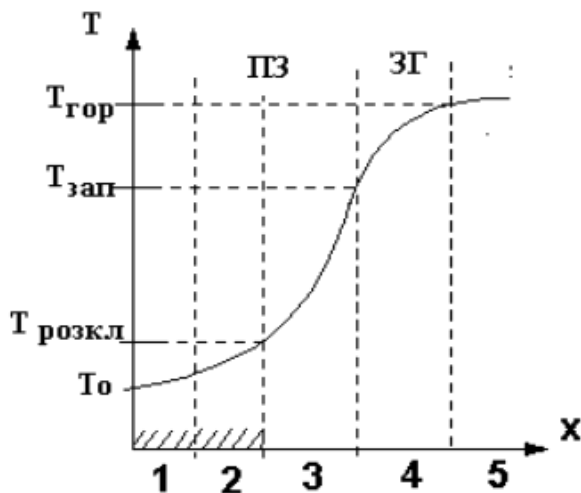
Нижньою (верхньою) концентраційною межею поширення полум'я пилу називається найменша (найбільша) концентрація пилу в повітрі, при якій суміш здатна запалюватися від джерела запалювання з подальшим поширенням горіння на весь об'єм аерозолі.

Проте схильність аерозолів до коагуляції (злипання) і осадження істотно відрізняє їх від газопо- повітряних сумішей. Так, верхня концентраційна межа поширення полум'я для пилу також існує, і може бути визначена в лабораторних умовах. Проте значення верхньої межі є досить невизначеним, що пов'язано зі складністю створення і підтримування протягом достатнього часу рівномірної пилової хмари великої щільності, особливо для крупнодисперсних систем. Отже верхня концентраційна межа поширення полум'я для аерозолі практично не використовується. Це зумовлене тим, що постійне існування концентрацій аерозолі вище верхньої межі, коли виключається запалення, неможливо і завжди буде існувати такий момент часу, коли внаслідок осадження концентрація пилу виявиться у вибухонебезпечному діапазоні.

Вибухонебезпека аерозолі у виробництві характеризується тільки НКМПП.

3. Швидкість поширення полум'я в аерозолі на порядок вище за швидкість поширення горіння в гомогенних газоповітряних сумішах. Ця особливість пояснюється відмінністю механізму поширення полум'я, що, в свою чергу, зумовлено наявністю гетерогенної фази (твердих часток) в аерозолях, які сприяють передачі тепла випромінюванням. Поширення горіння по аерозолі відбувається за естафетним механізмом.

4. Температурний режим у фронті полум'я і поблизу нього аналогічний температурному режиму для газових сумішей, однак кінетичне горіння дисперсних систем пов'язано із протіканням додаткових підготовчих процесів перед фронтом полум'я.



Тому, на відміну від горіння газових сумішей горіння аерозолів ускладнюється додатковою обставиною – часом прогріву часток пилу та можливістю протікання реакції в кінетичному та дифузійному режимі. Тепловиділення відбувається на поверхні частки (гетерогенне горіння) та у полум'ї, що оточує частку.

5. На відміну від гомогенного горіння газоподібних систем для аерозолі характерно декілька режимів горіння залежно від особливостей горіння початкового твердого горючого матеріалу:

гомогенний режим - горіння підготовлених продуктів випаровування, розкладення або сублімації.

квазігомогенний режим - відбувається гетерогенне горіння кожної окремої частки, але загалом горіння дисперсної суміші проходить в об'ємі хмари аерозолу як би в гомогенному виді (початковий матеріал - ТГМ, що не газифікуються, - нелетучі метали, сажа, антрацит).

змішаний режим горіння - газоподібні продукти горять в гомогенному режимі, а вуглецевий залишок може догорати гетерогенним горінням (пил отриманий з ТГМ 2-го роду).

б. Поетапність вибухів.

Якщо під час горіння пилоповітряної суміші із дозвуковою швидкістю поширення полум'я (дефлаграційне горіння) утворюються стислі гази, здатні здійснювати механічну роботу, то таке горіння називають вибуховим.

Вибух пилу - це швидке згоряння аерозолу, внаслідок якого виникає підвищений тиск, зумовлений миттєвим виділенням тепла і газоподібних продуктів. При такому вибуху, хвиля стиснення, достатня для руйнування або пошкодження обладнання. Ця небезпека посилюється, якщо первинний спалах пилу приводить в стан аерозолу осілий пил із подальшим його запаленням.

Поетапні вибухи, що слідуєть в швидкій послідовності один за одним, неодноразово спостерігалися в промислових умовах. При дослідженні вибухів пилу в будівлях, вугільних шахтах встановлено, що первинний вибух відбувається за низької концентрації пилу у повітрі (близької до НКМПП). Це обумовлює малу швидкість поширення фронту полум'я, незначне підвищення тиску. Однак ударна хвиля першого вибуху підіймає в повітря осілий пил і концентрація аерозолу стає значно вищою, при цьому різко збільшуються всі параметри процесу кінетичного горіння аерозолу. Саме з цієї причини подальші вибухи пилоповітряної суміші мають велику потужність, що приводить до руйнування будівельних конструкцій.

11.3. Фактори, що впливають на вибухонебезпеку аерозолу.

Величина нижньої концентраційної межі поширення полум'я НКМПП пилоповітряних систем залежить від ряду чинників, основними з яких є природа ТГМ, з якого отриманий пил, та дисперсність цього матеріалу, склад газового середовища, умови, в яких знаходиться пил і відбувається процес запалення.

Основні параметри, які характеризують вид ТГМ:

1. вологість пилу;
2. зольність матеріалу;
3. вміст летючих компонентів;
4. дисперсність пилу.

Основні параметри, які характеризують склад газового середовища:

5. склад окислювального середовища (вміст кисню і негорючих газів);
6. вміст горючих газів.

Основні параметри, які характеризують умови, в яких знаходиться пил і відбувається процес запалення:

7. потужність джерела запалювання;
8. початкова температура;
9. тиск системи.

Вологість (W,%)

Зі збільшенням вологості пилу зменшується потужність вибуху аерозолу, НКМПП збільшується, оскільки наявність молекул води змінює теплофізичні та структурно-механічні властивості пилу. В процесі запалення пилу частина тепла витрачається на випаровування води і нагрів цієї пари. Водяна пара, в свою чергу, створює навколо частки пилу екрануючий шар, зі зменшеним вмістом кисню і збагачений інертною водяною парою. Підвищення вологості погіршує електризацію. Крім того, вологий пил легше злипається і тим самим зменшує питому активну

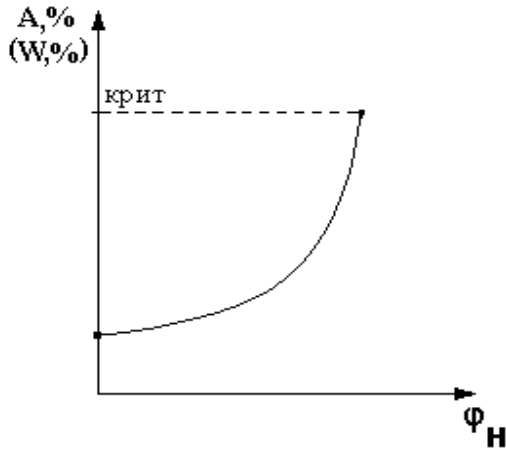
поверхню часток. Чим крупніший пил, тим глибшу сушку можна проводити без побоювань викликати вибух.

При вмісті води 20-30% аерозолі є вибухобезпечними.

Зольність (A, %)

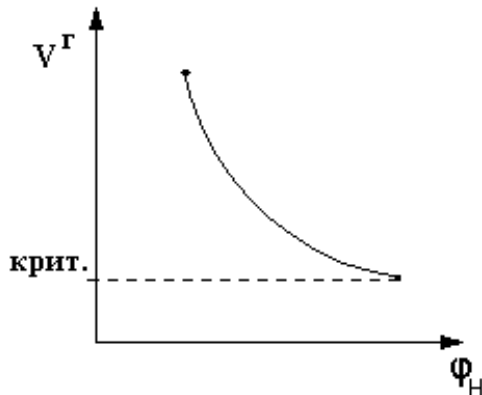
Зольність - процентний вміст в горючому пилу негорючих компонентів. Чим вище зольність, тим менший вміст горючих компонентів, а, отже, вище НКМПП. Присутність інертних домішок в горючому аерозолі зменшує максимальний тиск при вибуху й швидкість його наростання.

Так кам'яновугільний пил, що містить золи більше за 15-20%, не вибухає. Для торфу критичний вміст золи перевищує 50%.



Вміст летючих компонентів (V^r , %)

Вибухонебезпеку пилу визначається можливістю пилу утворювати газоповітряну суміш в концентрації не менше ϕ_n . Із збільшенням вмісту летючих компонентів при розкладанні матеріалу пилу скоріше досягається необхідна для займання кількість горючих летючих продуктів, схильність до вибуху підвищується, а, отже, НКМПП пилу меншає.

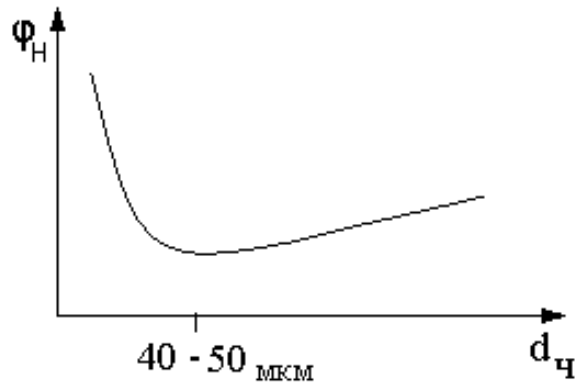


Дисперсність (d_q)

Зі збільшенням дисперсності пилу збільшується його питома поверхня, а, отже, і швидкість прогрівання, газифікації й реакції окислення. При цьому НКМПП зменшується, а максимальний тиск вибуху зростає. Однак, із значним збільшенням дисперсності нижня концентраційна межа поширення полум'я починає зростати, так як меншає радіус вогненної сфери, і для передачі горіння "естафетним" способом необхідна більша кількість часток в одиниці об'єму.

При збільшенні розміру часток від 10 мкм до 40-50 мкм нижня межа знижується приблизно в 2- 2,5 рази, а при подальшому зростанні розміру часток знову йде зростання нижньої концентраційної межі. Крупні частки повільніше прогриваються, відбираючи тепло від зони реакції,

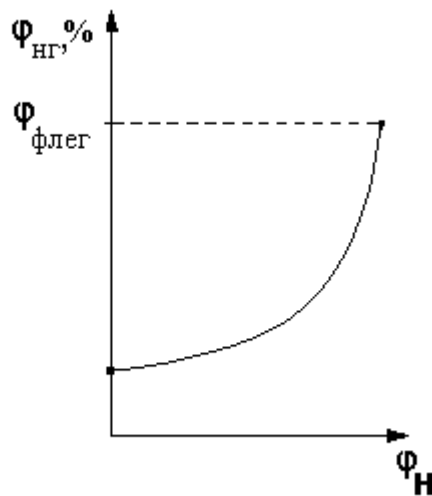
але не утворюючи при цьому летючі продукти газифікації, внаслідок цього в суміші не створюється потрібна концентрація горючих газів, розвиток вибуху стає неможливим. Грубодисперсний пил є вибухобезпечним, так, аерозолі багатьох органічних речовин стають нездатними до поширення полум'я при діаметрі часток порядку 400-500 мкм.



Вміст негорючих газів ($\phi_{нг}$)

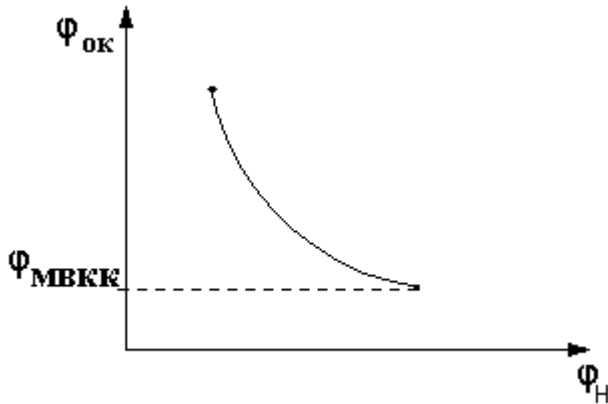
Зі збільшенням вмісту негорючих газів в дисперсійному середовищі вміст кисню зменшується, а, отже, швидкість хімічної реакції окислення й тепловиділення зменшуються, НКМПП збільшується.

Для зниження пожежної небезпеки пилу використовують його властивість поглинати інертні гази й утримувати їх на своїй поверхні.



Вміст кисню в окислювальному середовищі (ϕ_{O_2})

При зменшенні концентрації кисню в окислювальному середовищі горючість пилу зменшується, а НКМПП при цьому збільшується. Критична концентрація кисню, за якої ще можливе виникнення горіння аерозолі, називається мінімальною вибухонебезпечною концентрацією ($\phi_{мвкк}$)



Під мінімальною вибухонебезпечною концентрацією кисню в аерозолі приймається концентрація кисню, нижче за яку неможливо запалення аерозолу із поширенням горіння на весь об'єм суміші.

Не всі речовини при зменшеному змісті кисню втрачають здатність загоратися. Так порошки деяких металів можуть загоратись із подальшим вибухом і у відсутності кисню в середовищі, за наявності в середовищі азоту, діоксиду вуглецю, водяної пари, з якими вони здатні реагувати із виділенням тепла.

Вміст горючих газів ($\phi_{гг}$)

Присутність у пилу невеликих домішок горючих газів різко підвищує пожежну небезпеку таких систем. Аерозолі, що складаються з горючого пилу, горючих газів і газоподібного окислювача, називаються гібридними сумішами.

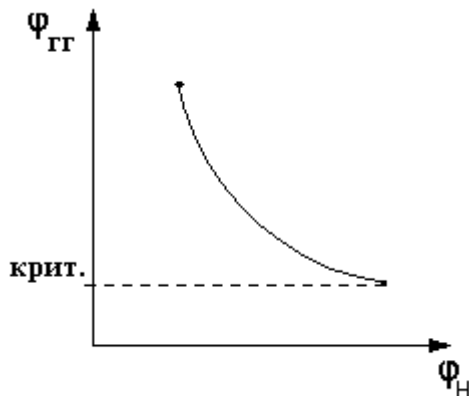
Гібридні суміші утворюються в шахтах, на хімічних підприємствах при висушуванні порошкоподібних матеріалів, розчинених в органічних розчинниках, при переробці полімерів.

Горіння гібридних сумішей має характерні особливості:

іскрові заряди, які не ініціювали горіння пилу, можуть запалювати суміш у присутності невеликої кількості горючого газу;

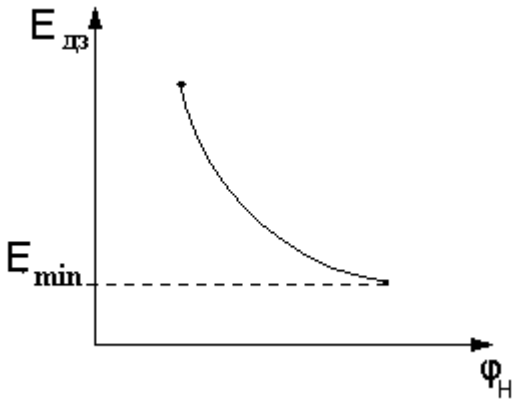
пил і газ, взяті у концентраціях менших НКМПП, при поєднанні можуть утворювати вибухонебезпечні суміші;

тиск вибуху аерозолів підвищується у присутності горючих газів.



Потужність джерела запалювання ($E_{дз}$)

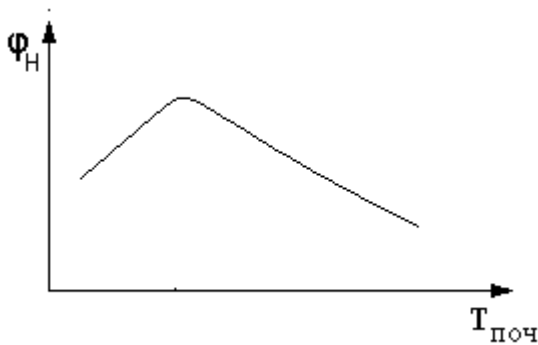
Зі збільшенням потужності джерела запалювання (ДЗ) НКМПП пилу знижується, але до певної межі. Така потужність називається потужністю насичення. Існує також мінімальна енергія запалювання, яка знаходить практичне застосування при розрахунках і наданні рекомендацій по використанню обладнання здатного іскрити на підприємствах із небезпекою вибухів пилу.



Початкова температура (T_0)

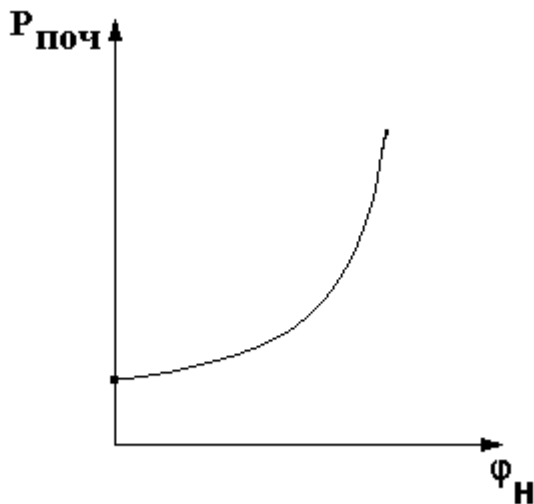
Із підвищенням початкової температури аерозолію меншає вміст кисню в пилу за рахунок десорбції, при цьому швидкість хімічної реакції окислення меншає, НКМПП збільшується.

При подальшому підвищенні температури швидкість реакції окислення збільшується, а тепловтрати на попередній нагрів гетерогенної фази зменшуються, при цьому НКМПП починає зменшуватися.



Початковий тиск (P_0)

У зв'язку із впровадженням в промисловість методів спалювання палива при підвищеному тиску практичний інтерес набуває питання впливу початкового тиску в системі на характер вибуху пилу. Із збільшенням початкового тиску нижня концентраційна межа поширення полум'я аерозолію збільшується.



Максимальний тиск вибуху пилу на відміну від вибуху гомогенних газоповітряних сумішей відповідає коефіцієнту надлишку повітря $\alpha_n = 0,08$, $0,1$.

§ 12. Класифікація пилу за пожежною небезпекою.

Згідно із ДНАОП 0.00-1.32-01 "Правила побудови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок" вибухонебезпечним вважається пил, надлишковий тиск вибуху якого більше або дорівнює 5 кПа.

М.Г. Годжелло на початку 60-х років запропонував класифікувати пил горючих речовин з урахуванням їх пожежної небезпеки як у завислому, так і в осілому стані.

У стані аерозолі пил може горіти в кінетичному режимі, тобто із вибухом, тому за основний параметр пожежної небезпеки обирається НКМПП. У осілому стані пил може самоспалахувати й самозайматися, і для оцінки пожежонебезпечних властивостей аерогелю використовують температуру самоспалахування.

Весь горючий пил можна поділяють на дві групи і чотири класи:

Перша група - вибухонебезпечний пил. Пил, що здатний до кінетичного горіння який має нижню концентраційну межу поширення полум'я меншу за 65 г/м³ включно.

1 клас - найбільш вибухонебезпечний пил з НКМПП 15 г/м³ і нижче;

2 клас - вибухонебезпечний пил з НКМПП від 15 і до 65 г/м³;

Друга група - пожежонебезпечний пил

3 клас - найбільш пожежонебезпечний пил із T_{cc} не вище за 250°C;

4 клас - пожежонебезпечний пил із T_{cc} вище за 250°C.

Для практичних розрахунків концентраційних меж поширення полум'я використовуються переважно емпіричні формули.

У роботі Льюїса і Ельбе зазначено, що для аерозолі із розмірами часток пилу сумірними із розмірами молекул (до 10 мкм) концентраційні межі пилу і пари, яка утворюється під час розкладання пилу, практично співпадають.

НКМПП для пари, утвореної в зоні підготовчих процесів, визначається за формулою:

$$\Phi_H^0 = \frac{100}{1 + h_f \Delta H_f^0 + \sum_{j=1}^n h_j m_j + \sum_{s=1}^q h_s m_s}, \%,$$

де $h_f = 0,0246 \times \text{моль} \times \text{кДж}^{-1}$;

ΔH_f^0 - теплота утворення речовини у газоподібному стані, кДж \times моль⁻¹;

m_j, m_s - число атомів та структурних груп.

h_j, h_s - коефіцієнт відповідно j-го елемента та s-ої групи.

h_j					h_s	
h_C	h_H	h_O	h_N	h_{Cl}	$h_{-C \equiv C-}$	$h_{-C \nabla C-}$
9,134	2,612	-0,522	-0,494	-3,57	7,88	6,50

При збільшенні розміру часток до 40-50 мкм НКМПП знижується приблизно в 2- 2,5 рази, а при подальшому зростанні розміру часток знову йде зростання нижньої концентраційної межі.

Таким чином можна розрахувати значення НКМПП за формулами:

для крупнодисперсного пилу (розмір часток 40-50 мкм):

$$\Phi_H^0 = 0,164 \cdot \mu \cdot \Phi_H^0, \quad \text{г} \cdot \text{м}^{-3},$$

для мілкодисперсного пилю (розмір часток < 10 мкм):

$$\varphi_H' = 0,41 \cdot \mu \cdot \varphi_H^0, \quad \text{г}\cdot\text{м}^{-3},$$

Наявність взаємозв'язку між теплотою згоряння і НКМПП для газів і парів визначила пошук такої ж залежності для пилю. Було досліджено 30 видів технічного пилю органічних речовин, що містять в основному С, Н, О, і 10 видів металевого пилю. Внаслідок досліджень отримана залежність Шоневальда:

$$\varphi_H' = a + \frac{b \cdot 10^6}{Q_H'},$$

г/м³,

де Q_H' – нижча масова теплота згоряння речовини, кДж/кг;

a, b – коефіцієнти, значення яких наведено в таблиці

ПИЛУ	a	b
технічний	-0,604	1,194
палива	-7,952	1,394
металевий	-1,54	1,132
органічних речовин	-2,524	1,235

Однак, існуючі методи розрахункового визначення масової нижньої концентраційної межі поширення полум'я по пилоповітряним системам ґрунтуються на припущенні, що адиабатична температура горіння аерозолу на нижній межі дорівнює 1000°С, що не зовсім обґрунтовано. Цим пояснюється істотне розходження між розрахунковими і експериментальними даними. Тому надійні данні можуть бути отримані лише експериментальним шляхом.

ВИСНОВОК: Урахування особливостей запалення і горіння пилоповітряних сумішей допомагає не тільки попередити вибухи і пожежі на об'єктах, але і правильно організувати гасіння пожеж на виробництвах, пов'язаних з утворенням пилю. Класифікація пилю по пожежній небезпеці є основою для визначення характеру технологічного процесу і категорії виробничих приміщень по вибуховій і пожежній небезпеці.

Розділ 4. Пожежа та її розвиток

Глава 1. Пожежа та її розвиток. Параметри розвитку пожеж.

Пожежі та загибель людей від них можна вважати другою стороною розвитку суспільства. У промислово розвинених країнах збитки від пожеж перевищують 1% національного доходу й мають тенденцію постійного зростання. Не є винятком і Україна.

Рік	Кількість пожеж та загорянь	Загинуло людей внаслідок пожежі	Знизи дітей	Врятовано людей	Збитки прямі (тис. грн.)	Збитки побічні (тис. грн.)	Врятовано мат. цінностей (тис. грн.)	
002	59657	3798	32	1	6625	88673	31624	587158
003	61280	3915	30	1	7518	89072	35266	883890
004	47670	3783	2	9	4102	90092	33863	803

У середньому на 1млн. жителів України від пожеж гине 49 осіб. Щоденно відбувається 168 пожеж, від яких загинуло 7, а травмовано 4 особи.

§ 1. Поняття пожежі.

Пожежа – це неконтрольоване горіння поза спеціальним осередком, що розвивається в просторі і в часі та завдає матеріальні, моральні і екологічні збитки.

1.1. Явища, що супроводжують розвиток пожежі

На пожежах одночасно протікають різноманітні складні фізико-хімічні процеси і явища, що стосуються не тільки самого горіння речовин і матеріалів, але і процесів, що супроводжують горіння і характерні тільки для даної конкретної пожежі.

Явища, що являються постійними й обов'язковими для кожної пожежі, називають загальними явищами пожежі. Тільки ліквідація горіння може привести до припинення загальних явищ.

Так, для всіх пожеж характерними є такі явища як:

1. Горіння з виділенням тепла та продуктів повного і неповного згоряння.
2. Масообмін, що виникає внаслідок утворення на пожежі конвекційних газових потоків, які забезпечують надходження свіжого повітря в зону горіння і відвід продуктів горіння з неї.
3. Теплообмін: тепло, що виділяється в зоні горіння, передається в навколишнє середовище і частково витрачається на нагрів горючих речовин, будівельних конструкцій, тощо, а, отже, робить можливим самостійне поширення пожежі.

Ці три основні процеси нерозривно пов'язані один з одним та взаємообумовлені. Якщо не буде горіння – не виникнуть масообмін та теплообмін, якщо не буде теплообміну, то не відбудеться попередній нагрів горючих матеріалів і горіння стане неможливим. Так само при відсутності масообміну, горіння припиниться через нестачу в зоні горіння свіжого повітря або горючої речовини.

Загальні явища можуть призвести до виникнення окремих явищ. Явища, що носять випадковий характер і притаманні тільки конкретній пожежі, відносять до окремих.

При протіканні пожежі в зону горіння можуть потрапити балони зі стислими або зрідженими газами, вибухові і радіоактивні речовини, присутність яких може призвести до вибуху, або

радіоактивного зараження місцевості. Через вплив високих температур можуть відбуватися й інші явища, такі як деформація і руйнування будівельних конструкцій, трубопроводів, технологічних установок, скипання і викид нафтопродуктів.

До окремих явищ на пожежі відносяться і такі трагічні явища як загибель і травмування людей та тварин.

Сукупність загальних і окремих явищ на пожежі, а також багатьох інших факторів створюють обстановку на пожежі, яка може перешкоджати або сприяти розвитку пожежі і її гасінню.

1.2. Небезпечні фактори пожежі.

Загибель людей на пожежі, нанесення поранень, отруєнь і каліцтв - це найбільше тяжкі наслідки пожежі. Загибель людей безпосередньо від впливу полум'я в практиці зустрічається досить рідко. Частіше причиною загибелі на пожежі є інші прояви пожежі. Відомо, що переважна більшість випадків загибелі людей пов'язана з отруєнням димом.

Первинні та другорядні явища пожежі, що призводять до травмування отруєнню або загибелі людей, а також до знищення або ушкодження матеріальних цінностей, називають небезпечними факторами пожежі.

До небезпечних факторів пожежі, що впливають на людей відносяться: первинні явища пожежі:

- відкритий вогонь і іскри;
- підвищена температура навколишнього середовища і предметів;
- токсичні продукти горіння;
- дим;
- знижена концентрація кисню в повітрі;

другорядні явища пожежі:

- падаючі частини будівельних конструкцій, агрегатів, установок;
- небезпечні фактори вибуху, такі як ударна хвиля;
- отруйні речовини, що надійшли в навколишнє середовище з ушкодженого устаткування;
- електричний струм;
- вогнегасні речовини.

Коротко розглянемо характеристики деяких із приведених явищ.

Дію відкритого вогню, іскор, ударної хвилі при вибуху, враження частинами будівельних конструкцій і апаратів, що падають, ми розглядати не будемо, як явно небезпечні фактори для здоров'я і життя людей.

Підвищення температури повітря призводить до зміни роботи організму людини. Працездатність особового складу на пожежі різко знижується вже при температурах порядку 35-40°C. Так, при відносній вологості повітря 30 і 70 %, (що є характерними для гасіння пожежі) гранично допустимий час перебування людей обмежується:

Температура повітря, °С;	Час працездатності	
	Вологість повітря 15-20%	Вологість повітря 70-75%
40°C	6 годин	4 години
50°C	1,5 години	1 година
60°C	1 година	25 хвилин
70°C	35 хвилин	20 хвилин

При температурі більше 60°C, в умовах пожежі може наступати втрата свідомості. Критичною для людини вважається температура повітря в приміщенні 70°C.

Крім того вражаючу дію роблять і нагріті конструкції. При доторку до поверхонь, що мають температуру більш 80°C, виникають болючі відчуття, а при температурі більш 100 °C – опіки.

Негативно впливає на працездатність людей на пожежі і теплове випромінювання від зони горіння. Особливо актуальне це питання при пожежі нафтових і газових фонтанів, де при організації гасіння на захист особового складу від теплової радіації часом витрачається більше сил та засобів, ніж безпосередньо на само гасіння.

Кількість тепла, що випромінюється факелом у напрямку бойової техніки й особового складу, визначається рівняннями променистого теплообміну довільно розташованих поверхонь по формулі:

$$Q_{\text{пром}} = \epsilon_{\text{пр}} \sigma_0 T_{\text{гор}}^4 S_{\text{пол}}$$

Тепловий потік викликає болючі відчуття і може призвести до опіку незахищених ділянок шкіри. Больові відчуття виникають:

Термін дії	Густина теплового випромінювання, кВт× м ⁻² ;	
	Без захисту	В бойовому одязі
короткочасний вплив	2,8	7,5
тривалий вплив	1,05	4,2

На основі цих критичних значень густини теплового потоку можна теоретично визначити безпечні відстані для розташування бойової техніки і розміщення позиції особового складу пожежних підрозділів при гасінні пожежі.

Дим, який утворюється при пожежі і містить в собі токсичні продукти розкладання та неповного згорання, дуже негативно впливає на організм людини. Так при горінні деяких органічних матеріалів (вовни, шкіри) виділяються такі речовини як сірководень, синильна кислота, піридин, акролеїн, ацетальдегід, при розкладанні деревини виділяються формальдегід, ацетальдегід, феноли, кетони, оксид вуглецю й інші сполуки. На пожежах, особливо при горінні в замкнених приміщеннях, дим різко знижує видимість, що саме по собі стає причиною паніки серед людей, які потрапили в зону задимлення. Крім того, сильне задимлення обмежує можливості по керівництву підрозділами по гасінню пожежі.

Зниження концентрації кисню в повітрі більш ніж на 4 відсотка небезпечно для життя людини, навіть полум'яне горіння припиняється при вмісті кисню менше 15-16%.

При проектуванні будинків і споруд, при розробці оперативних планів пожежогасіння необхідно враховувати небезпечні фактори пожежі, які можуть призвести до загибелі людей.

1.3. Зони пожежі.

Пожежа розвивається в просторі. При цьому можна умовно виділити три зони: зону горіння, зону теплового впливу і зону задимлення.

Зона горіння – це частина простору, в якій протікають процеси термічної підготовки горючих речовин (розкладання, плавлення, випаровування) і сам процес горіння.

Зона горіння включає в себе об'єм парів та газів, обмежений фронтом полум'я і поверхнею речовин, які горять. При гетерогенному горінні зона горіння співпадає з поверхнею горіння. Іноді зона горіння обмежується будівельними конструкціями – стінками будівель, резервуарів, апаратів тощо.

В зоні горіння виділяється все тепло пожежі і розвивається сама висока температура.

Зона теплового впливу – це частина простору, що прилягає до зони горіння і в межах якої протікають процеси теплообміну між поверхнею зони горіння і навколишніми конструкціями і речовинами.

Тепло поширюється в навколишньому просторі за рахунок конвекції та випромінювання. Під впливом теплових потоків із зони горіння в зоні теплового впливу відбувається попередній нагрів горючих речовин і підготовка їх до процесу запалення і поширення горіння.

Якщо пожежа розвивається в приміщенні, то стіни будівлі грають роль екранів, тому зона теплового впливу менша, ніж при пожежі на відкритому просторі. Крім того, дим, який накопичується всередині приміщення, різко знижує інтенсивність випромінювання, оскільки він є поглинаючим середовищем.

Зовнішня межа зони теплового впливу проходить там, де тепловий вплив викликає помітні зміни в стані матеріалів і конструкцій, або створюються умови, які перешкоджають роботі особового складу по гасінню пожежі. Якщо пожежа розвивається в приміщенні, то параметром теплового впливу є критична температура газового середовища (звичайно приймається 70°C), якщо пожежа відбувається на відкритому просторі, то параметром теплового впливу є критична густина теплового потоку. На практиці зоною теплового впливу вважається зона, де робота особового складу без засобів теплового захисту неможлива.

Зона задимлення – частина простору, що примикає до зони горіння, в якій неможливо перебування людей без захисту органів дихання й ускладнені бойові дії підрозділів пожежної охорони через недостатню видимість.

Параметрами для визначення меж зони задимлення є видимість, небезпечна концентрація кисню, небезпечна концентрація токсичних продуктів розкладання та горіння матеріалів. Зовнішня межа зони задимлення вважається там, де густина диму складає 1×10^{-4} , 6×10^{-4} кг \times м⁻³, видимість знижена до 6 - 12 метрів, вміст кисню в повітрі менший 16% і концентрація токсичних газів викликає отруєння людей.

Розміри зони задимлення залежать від умов розвитку пожежі і від метеорологічних умов. Зона задимлення може містити в собі всю зону теплового впливу і навіть значно її перевищувати, як правило, зона задимлення – найбільша зона на пожежі.

1.4. Стадії розвитку та періоди гасіння пожежі.

Пожежа розвивається в часі. Розвиток будь-якої пожежі в часі можна умовно поділити на три стадії: початкову, основну і кінцеву.

На початковій стадії відбувається розвиток пожежі від дії джерела запалення до моменту, коли за рахунок поширення горіння помешкання буде охоплено полум'ям майже повністю. При цьому поступово збільшується температура пожежі, відбувається вигорання кисню в повітрі помешкання і підвищується частка продуктів горіння. Збільшення кількості продуктів горіння в повітрі призводить до різкого зниження видимості.

Перша стадія звичайно триває до 10 хвилин і в цей період вигорає до 20 відсотків пожежного навантаження приміщень, хоча в кожному випадку параметри першої стадії визначаються конкретними умовами розвитку пожежі. Звичайно наприкінці першої стадії через високу температуру відбувається руйнування віконних отворів, що призводить до підсмоктування в приміщення свіжого повітря і зміни параметрів горіння.

В другій стадії пожежі через приплив свіжого повітря швидкість вигорання матеріалів та температура пожежі різко зростають до максимальних значень і протягом другої стадії майже не змінюються. При цьому вигорає до 80-90 відсотків горючих речовин.

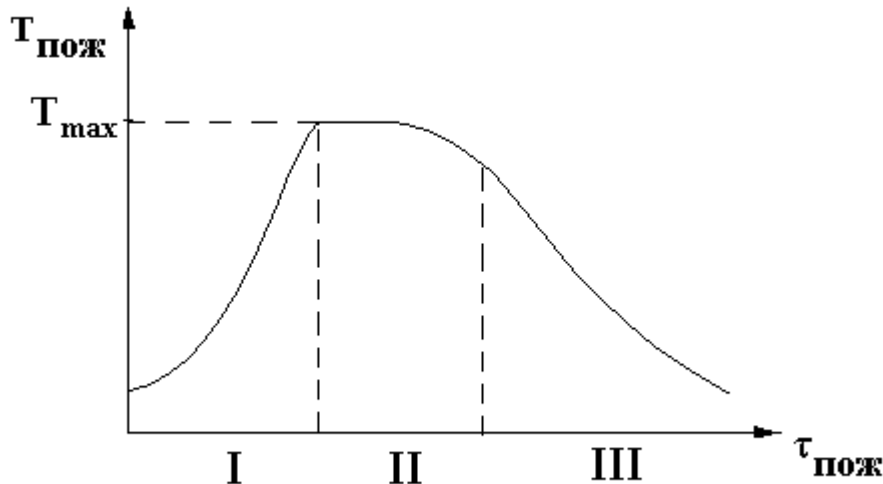
Висока середньо об'ємна температура і потужне теплове випромінювання призводять до швидкого прогріву будівельних конструкцій і втрати їх несучої здатності.

На останній стадії розвитку відбувається завершення процесу горіння, швидкість вигорання падає і починається процес догорання матеріалів, які знаходяться у помешканні. Температура в

приміщенні починає зменшуватися, проте вона тривалий час залишається досить високою через тепловіддачу нагрітими будівельними конструкціями. За рахунок цього процес термічного розкладання найбільше термостійких матеріалів ще продовжується, але без видимих ознак горіння.

Кількість газів, що виходять, стає менше, ніж кількість повітря, що надходить в приміщення. У період охолодження конструкцій можливе руйнування захисного шару залізобетонних конструкцій і втрата їхньої несучої здатності.

Графік зміни температури пожежі в огороженні на різних стадіях розвитку пожежі



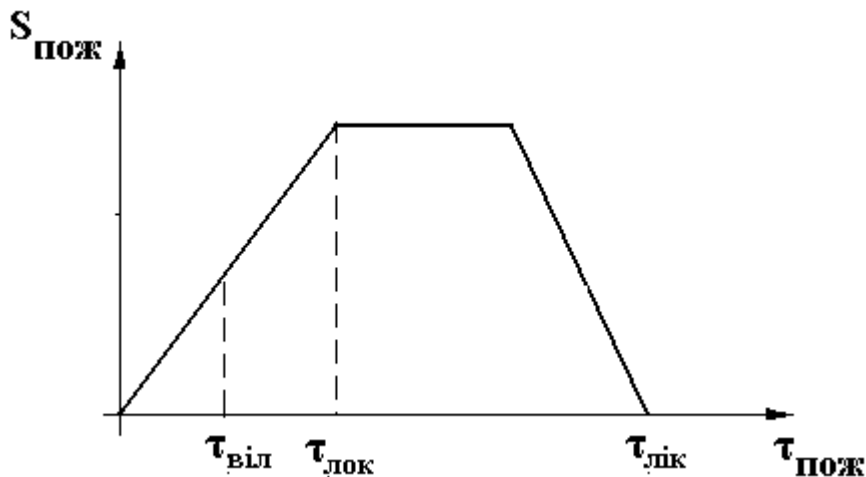
Якщо в процесі розвитку пожежі відбуваються дії по її гасінню, то тривалість пожежі можна поділити на три основні періоди:

періоду вільного розвитку пожежі, $\tau_{\text{віль}}$

періоду локалізації пожежі, $\tau_{\text{лок}}$

періоду ліквідації пожежі, $\tau_{\text{ліквід}}$.

Графік зміни площі пожежі з часом



Найбільше значимий для всього розвитку пожежі є перший період - період вільного розвитку пожежі, у який відбувається найбільше інтенсивний зріст площі горіння, вигорання пожежного навантаження, найбільше інтенсивне тепловиділення і зріст температури.

Період вільного розвитку пожежі триває до моменту введення перших сил та засобів по гасінню пожежі. Він складається з:

$\tau_{\text{виявл}}$ - часу виявлення пожежі,

$\tau_{\text{повід}}$ - часу повідомлення про пожежу,

$\tau_{\text{збору}}$ - часу збору і виїзду по тривозі пожежного підрозділу,

$t_{\text{слід}}$ - часу слідування на пожежу,

$t_{\text{б.д.}}$ - часу проведення бойових дій по організації гасіння пожежі, у який входить час бойового розгортання, проведення розвідки, проведення рятування людей і евакуації матеріальних цінностей. Ця робота може проходити поетапно або одночасно з іншими видами робіт з організації гасіння пожежі.

Ефективні дії пожежних підрозділів на етапі вільного розвитку пожежі забезпечують успішне його гасіння з мінімальними витратами вогнегасних засобів у найкоротші строки. Практично всі протипожежні заходи щодо організації протипожежного захисту й організаційно-технічних заходів спрямовані на скорочення періоду вільного розвитку пожежі.

Період локалізації пожежі – час, протягом якого створені умови для запобігання подальшого розвитку пожежі.

Період ліквідації пожежі – час з моменту локалізації до повного припинення горіння на пожежі

§ 2. Класифікація пожеж

Для кращого вивчення пожеж, для розробки прийомів і засобів гасіння усі пожежі класифікують за різними ознаками на групи, класи і види.

2.1. Класифікація пожеж за умовами газообміну

За умовами газообміну всі пожежі поділяють на дві групи:

1. На відкритому просторі
2. В огороженні

Перша група пожеж характеризується вільним газообміном із навколишнім середовищем, що обумовлює високу швидкість протікання процесів горіння. При цьому теплообмін здійснюється конвекцією та випромінюванням.

Друга група характеризується залежністю газообміну від зовнішніх умов, Теплообмін здійснюється конвекцією, теплопровідністю та випромінюванням.

В кожній групі можна виділити підгрупи.

Пожежі на відкритому просторі поділяються на: окремі, суцільні, масові, вогневий шторм.

Окремі – пожежі, що виникають в окремій споруді або будівлі.

Суцільні – одночасне інтенсивне горіння більшості споруд на даній ділянці.

Масові – сукупність окремих та суцільних пожеж в населених пунктах, на великих промислових підприємствах. Масові пожежі відбувалися при переході суцільних лісових пожеж у населені пункти.

Вогневий шторм – особлива форма розвитку пожежі, яка характеризується утворенням єдиного велетенського турбулентного факелу із потужною конвекційною колонкою потоків нагрітих продуктів згоряння і припливом свіжого повітря зі швидкістю $14-15 \text{ м} \times \text{с}^{-1}$. Наприклад, при пожежі, яка виникла при бомбардуванні м. Гамбург запалювальними бомбами під час другої світової війни, висота конвекційної колонки сягала 4,5 км, а потужні потоки повітря виривали з корінням дерева і втягували їх в зону горіння.

Умови виникнення вогневого шторму: вологість повітря не більше 30%, площа горінням, більше $2,5 \text{ км}^2$, швидкість вітру менше $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Пожежі в огороженні можна поділити на пожежі, що регулюються вентиляцією, та пожежі, що регулюються пожежним навантаженням.

Пожежі, що регулюються вентиляцією, (ПРВ) – пожежі, які протікають при обмеженому вмісті кисню в газовому середовищі приміщення і надлишку горючих речовин та матеріалів. Параметри горіння визначаються інтенсивністю газообміну, оскільки окислювача не вистачає для повного згоряння пожежного навантаження.

Пожежі, що регулюються пожежним навантаженням, (ПРПН) – пожежі, які протікають із надлишком повітря в приміщенні, а розвиток пожежі залежить від наявності пожежного навантаження. По своїм параметрам такі пожежі наближаються до пожеж на відкритому просторі.

Пожежі в огороженні поділяють на відкриті та закриті. Залежно від об'ємно-планувальних особливостей та наявності отворів в огорожах пожежі характеризуються вільним, розвитком або обмеженим газообміном.

Відкриті пожежі розвиваються за умов повністю або частково відкритих отворів. Горіння швидко поширюється, переважно в бік відкритих отворів, через які відбувається перехід полум'я назовні та на сусідні будівлі.

До закритих пожеж відносять пожежі, що протікають за умов повністю зачинених отворів в огорожах. Газообмін здійснюється за рахунок інфільтрації повітря та газів, що виділяються із зони горіння, через нещільності в огороженні, притворах дверей, віконних рам, через системи вентиляції без примусової подачі повітря.

Швидкість вигорання пожежного навантаження залежить від витрати повітря крізь нещільності. Закриті пожежі можуть відбуватися як в закритих приміщеннях будь-якого призначення, а також всередині технологічного обладнання та будівельних конструкціях. Такі пожежі характеризуються тривалим періодом їх виявлення та прихованим поширенням.

Зважаючи на те, що пожежа, як явище, розвивається у часі, вона може відноситися до конкретних груп протягом конкретного проміжку часу свого розвитку.

Оскільки кожній групі або підгрупі пожеж відповідає характерний газообмін, то особливості їх розвитку та впливу на обставини пожежі, пошкодження конструкції, обладнання та матеріалів відрізняються одна від другої. Сукупність таких факторів, як об'ємно - планувальні особливості об'єкта, пожежне навантаження, умови та особливості газового та теплового обміну, визначають температурний режим пожежі

2.2. Класифікація пожеж за зміною площі горіння

За ознакою зміни площі пожежі в часі всі пожежі умовно можна поділити на пожежі, що поширюються, і ті, що не поширюються.

Пожежі, що поширюються, – це пожежі, які розвиваються з постійною зміною розмірів зони горіння: площі, периметру, фронту пожежі та інших. Поширення пожеж на відкритому просторі відбувається за різними напрямками і з різною швидкістю залежно від умов розташування горючих матеріалів та зовнішніх умов, що супроводжують пожежу, таких як: умови теплообміну, напрямок та сила вітру, висота полум'я, наявність іскор та інших.

Пожежі, що не поширюються, – це такі пожежі, у яких площа зони горіння не змінюється з часом (обмежена площею розташування горючої речовини). Вони являють собою окремий випадок пожеж, коли загорання оточуючих об'єктів за рахунок променистого теплообміну неможливо. До таких пожеж можливо віднести пожежі на нафтових та газових свердловинах, пожежі у резервуарах для зберігання нафти та нафтопродуктів. До пожеж, що не поширюються, також можуть бути віднесені і такі, коли горінням охоплена вся будівля, споруда чи речовина, що зберігається, при умовах, що поблизу немає інших горючих речовин та умов розповсюдження на них пожежі.

Локальні пожежі за час їх розвитку можуть переходити у пожежі, що поширюються. Так, при горінні окремого резервуара з нафтою зона горіння не змінюється, а, отже, пожежа не поширюється, але при викиду нафти чи при деформації стінок металевого резервуару відбувається раптове збільшення площі горіння, тобто розповсюдження горіння.

2.3. Класифікація пожеж за видом горючої речовини

У залежності від виду й агрегатного стану горючого матеріалу, який в основному горить в осередку пожежі, різко змінюються не тільки основні параметри розвитку пожежі, але змінюються прийоми і засоби гасіння пожежі, застосовувані для цього вогнегасних речовини.

В залежності від фізико-хімічних властивостей речовин, які горять, і особливостей їх горіння та гасіння всі пожежі умовно поділяють на класи А, В, С, Д та Е, класи підрозділяють на підкласи (ГОСТ 27331-87 “Пожарная техника. Классификация пожаров”).

До пожеж класу А відносяться пожежі, при яких в основному горять тверді горючі речовини. У свою чергу пожежі класу А підрозділяються на підклас А1 і А2. До пожеж підкласу А1 відносять горіння тліючих матеріалів (всі целюлозовмісні матеріали), тобто матеріали, для яких характерний як гомогенний, так і гетерогенний режим горіння. Горіння матеріалів, що горять тільки в гомогенному режимі, без тління, відносять до пожеж підкласу А2.

До пожеж класу В відносяться пожежі горючих і легкозаймистих рідин, а також зріджуваних твердих речовин. В тих випадках, коли горять водонерозчинні рідини або тверді речовини, що при нагріванні переходять в рідкий стан, пожежу відносять до підкласу В1 (нафта і нафтопродукти, каучук, поліетилен). При горінні водорозчинних горючих рідин пожежі відносять до підкласу В2.

Ця градація дуже істотна з точки зору вибору вогнегасної речовини. Так, при гасінні спиртів, які добре розчиняються у воді, необхідно застосовувати особливі стійкі до впливу спиртів піноутворювачі, так звані, плівкоутворюючі піноутворювачі типу ПО-1С, бо піна, утворена із піноутворювача загального призначення, при контакті з водорозчинними рідинами миттєво руйнується і гасіння не відбувається.

При горінні горючих газів пожежі відносять до класу С.

Пожежі горючих металів і металоорганічних сполук мають ряд особливостей, пов'язаних із параметрами процесу горіння й у зв'язку з цим із вибором вогнегасної речовини. З цієї причини пожежі металів і металоорганічних сполук винесли в окремий клас Д, що поділяють на три підкласи Д1, Д2 і Д3.

До пожеж підкласу Д1 відносять горіння, так званих, легких металів - металів другої, третьої і четвертої групи періодичної системи Менделєєва (магній, алюміній, стронцій, барій, титан, цирконій і інші). Їх горіння супроводжується сильним тепловиділенням, високою температурою і тепловим випромінюванням.

Пожежі лужних металів відносять до підкласу Д2, головною їхньою особливістю є спроможність самого металу реагувати з водою і водопінними засобами гасіння. У випадку горіння металоорганічних сполук пожежі відносять до підкласу Д3.

Незважаючи на те, що при горінні електроустановок під напругою фактично горять як тверді речовини (ізоляція), так і рідини (мастило систем охолодження), пожежі електроустановок під напругою відносять до пожеж класу Е.

§ 3. Параметри розвитку пожеж

Для того щоб можна було описувати, досліджувати, або порівнювати пожежі необхідно використовувати параметри, які б характеризували різні сторони розвитку пожеж.

Основними параметрами розвитку пожежі є:

- пожежне навантаження,
- тривалість пожежі,
- площа, периметр і фронт пожежі;
- лінійна швидкість поширення пожежі;
- масова швидкість вигорання пожежного навантаження;
- температура пожежі;
- інтенсивність газообміну;
- щільність задимлення;
- теплота пожежі.

Пожежне навантаження $R_{\text{пож}}$ – це питома кількість теплоти, що може виділитися в помешканні або будинку при пожежі.

Пожежне навантаження об'єкта визначається як сума постійного і тимчасового пожежного

навантаження. Постійне навантаження включає горючі будівельні конструкції і матеріали. В тимчасове навантаження включається пожежне навантаження від речовин і матеріалів, які зберігаються, виробляються і переробляються в ході технологічного процесу в даному приміщенні.

Пожежне навантаження визначається за формулою:

$$P = \frac{\sum m_i Q_i}{S_{\text{підл}}} \quad \text{кДж/м}^2$$

Пожежне навантаження буде визначати тривалість пожежі, інтенсивність задимлення, теплоту та температуру пожежі.

Іноді пожежне навантаження виміряють як масу всіх горючих та важкогорючих матеріалів, що приходиться на одиницю площі підлоги приміщення. Наприклад, пожежне навантаження житлового сектору в середньому складає 50 кг/м², а пожежне навантаження складського приміщення може сягати 3000 кг/м².

Тривалість пожежі - це час із моменту виникнення пожежі до повного припинення горіння.

Площа пожежі $S_{\text{пож}}$ – площа проекції зони горіння на горизонтальну або вертикальну площину.

Фронт пожежі – частка периметру, на якій поширення пожежі відбувається найбільш інтенсивно.

Масова швидкість вигорання v_m , – кількість речовини, що вигоряє в одиницю часу з одиниці площі горіння, кг· м⁻²· с⁻¹.

$$v_m = \frac{dm}{S_{\text{пож}} d\tau}$$

Швидкість вигорання речовини у твердому або рідкому стані залежить насамперед від природи речовини, інтенсивності газообміну, часу розвитку пожежі, інтенсивності теплового впливу.

Лінійна швидкість поширення пожежі v_l – відстань, яку проходить фронт пожежі за одиницю часу, м· с⁻¹.

$$v_l = \frac{dl}{d\tau}$$

Температура пожежі на відкритому просторі – температура зони горіння.

Температура пожежі на відкритому просторі залежить від концентрації горючого в зоні горіння і його складу і практично не змінюється в часу. При гасінні пожежі вогнегасними засобами вона може змінюватися, але в обмеженому діапазоні. Температуру відкритої пожежі можна розраховувати як адіабатичну температуру горіння речовини.

Температура пожежі в огороженні – середньооб’ємна температура газового середовища в приміщенні, в якому відбувається пожежа.

Інтенсивність газообміну I_G – кількість повітря, що припливає за одиницю часу до одиниці площі пожежі, кг· м⁻²· с⁻¹.

$$I_G = \frac{G_{\text{пов}}}{S_{\text{пож}}}$$

де $G_{\text{пов}}$ – витрата повітря, кг· с⁻¹.

Густина задимлення – кількість диму, що знаходиться в одиниці об’єму приміщення, г· м⁻³.

$$I_3 = \frac{V_{\text{дугвор}} - V_{\text{двизал}}}{V_{\text{прим}}}$$

Теплота пожежі $Q_{\text{пож}}$ – кількість тепла, що виділяється в зоні горіння за одиницю часу.

$$Q_{\text{пож}} = \eta \cdot v_m \cdot S_{\text{пож}} \cdot Q_n', \text{ кДж с}^{-1},$$

де η - коефіцієнт повноти згоряння, який залежить від умов газообміну;

v_m - масова швидкість вигорання ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$);

$S_{\text{пож}}$ - площа пожежі, м^2 ;

Q_n' - робоча теплота згоряння, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

На пожежах найчастіше відбувається горіння твердих горючих матеріалів, оскільки саме вони визначають велику частку пожежного завантаження житлових приміщень, складів і виробничих приміщень. Так в Україні за даними статистики біля 80% загальної кількості пожеж сталися в житловому секторі. Великою проблемою є пожежі природних рослинних матеріалів - лісові пожежі, пожежі зернових і кормових культур. В середньому на всіх континентах виникає біля 200 тис. лісових пожеж в рік. Щорічно ми стаємо свідками повідомлень про великі степові і лісові пожежі в тайговій частині Російської федерації, Австралії, північній Америці або Європі, Малайзії.

§ 4. Загальні закономірності розвитку пожеж класу А

Розвиток пожеж твердих горючих матеріалів має певні закономірності і особливості, які пов'язані з агрегатним станом горючих матеріалів.

Першою особливістю і загальною рисою всіх пожеж класу “А” є те, що поверхня горіння ТГМ може не співпадати із площею пожежі. Отже для того, щоб врахувати цю особливість вводять коефіцієнт поверхні горіння $K_{\text{п}}$, який визначає фактичну величину площі горіння. $K_{\text{п}}$ показує у скільки разів поверхня горіння $S_{\text{гор}}$ більша, ніж площа пожежі $S_{\text{пож}}$:

$$K_{\text{п}} = S_{\text{гор}}/S_{\text{пож}}$$

Коефіцієнт поверхні при горінні ТГМ завжди більше одиниці і залежить від способу укладки матеріалу та його подрібненості (горіння дерев'яних колод, дощок, стружки, штабелів пиломатеріалів, стелажів із ТГМ, меблів тощо). Для деяких типових об'єктів промисловості характерні коефіцієнти поверхні зведені до таблиць і можуть змінюватися від 2-3 до 10-50, а для складів пиломатеріалів $K_{\text{п}}$ можуть досягати і 100.

Коефіцієнт поверхні горіння впливає на основні параметри розвитку пожежі класу “А” такі як масова швидкість вигорання, теплота пожежі, температурний режим пожежі. Так при зміні коефіцієнту поверхні горіння для пиломатеріалів з 2,5 до 16 масова швидкість вигорання збільшується з 70 до 450 $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ година})$.

Час вигорання пожежного навантаження теж змінюється залежно від коефіцієнту поверхні:

$$\tau_{\text{вигор.}} = P/(\eta K_{\text{п}} v_m^0)$$

Другою особливістю і загальною закономірністю пожеж класу А є те, що вони поширюються.

Загальну тривалість пожежі (час із моменту виникнення пожежі до повного припинення горіння) можна представити як суму часу поширення горіння і часу, за який відбудеться повне вигорання пожежного навантаження.

$$\tau_{\text{пож}} = \tau_{\text{пош}} + \tau_{\text{вигор}}$$

Якщо $\tau_{\text{пош}} \ll \tau_{\text{вигор}}$, тобто $\tau_{\text{пож}} \approx \tau_{\text{вигор}}$, то такі пожежі можна віднести до тих, що не поширюються. До таких пожеж відносяться пожежі класу С або В, при яких горіння охоплює всю горючу речовину за дуже короткий проміжок часу, а, отже, тривалість пожежі визначається процесом вигорання горючої речовини. (При пожежах, пов'язаних з витіканням рідини, фронт полум'я рухається разом з рідиною).

Як відомо, швидкість поширення горіння по поверхні ТГМ значно менша, ніж швидкість поширення горіння в газових сумішах або по поверхні рідин. Час, за який горіння охоплює поверхню ТГМ, (час поширення горіння $\tau_{\text{пош}}$) порівнянний з часом вигорання пожежного навантаження, а, отже, і з тривалістю пожежі.

$$\tau_{\text{пош}} \approx \tau_{\text{вигор}}$$

В деяких випадках $t_{\text{пош}} \gg t_{\text{вигор}}$ (степові пожежі, пожежі злаків на корні), коли незначне пожежне навантаження встигає вигоріти, площа зони горіння не збільшується в часі, а рухається тільки зона горіння по поверхні горючого матеріалу. Таким чином пожежі класу А відносяться до тих, що поширюються.

$$\tau_{\text{пош}} = L/v_1;$$

Параметром, що буде визначати процес поширення пожежі, є лінійна швидкість поширення фронту пожежі v_1 .

Третьою загальною закономірністю пожеж класу А є те, що лінійна швидкість поширення пожежі залежить від часу розвитку пожежі. v_1 змінюється таким чином:

вільний розвиток пожежі

- до 10 хвилини розвитку – приймається рівною 0,5 табличного значення;

$$v_{1\tau < 10} = 0.5 v_1^0$$

- з 10-ої хвилини розвитку до введення сил і засобів по гасінню пожежі приймається рівною табличному значенню:

$$v_{1\tau > 10} = v_1^0$$

з моменту введення сил і засобів до локалізації пожежі 0,5 табличного значення швидкості.

$$v_{1\text{лок}} = 0,5 v_1^0$$

після локалізації $v_1 = 0$

Для того щоб визначити площу пожежі на будь-який час розвитку необхідно розрахувати радіус розвитку пожежі і залежно від місця виникнення горіння визначити форму зони горіння.

Радіус розвитку пожежі:

$$\tau_{\text{розв.}} < 10 \text{ хвилин}$$

$$R = 0.5 v_1^0 \tau$$

$$\tau_{\text{розв.}} > 10 \text{ хвилин}$$

$$R = 0.5 v_1^0 10 + v_1^0 (\tau - 10)$$

Четвертою особливістю і загальною закономірністю пожеж класу А є те, що з часом розвитку пожежі площа і форма зони горіння будуть змінюватися. Форма зони горіння залежить від:

— місця виникнення осередку пожежі;

У залежності від наявності огорожуючих конструкцій або форми самого горючого навантаження пожежа може приймати різні форми (кругову, кутову, прямокутну).

— часу розвитку пожежі;

По мірі розвитку пожежа може переходити з однієї форми в другу: на початку – кругова, при досягненні огорожі – прямокутна, при переході в інше приміщення – кутова.

— наявності різних видів пожежного навантаження;

При наявності матеріалів з різними пожежонебезпечними властивостями найбільш інтенсивне поширення горіння буде відбуватися по матеріалах з найбільшою горючістю (у яких лінійна швидкість поширення горіння буде найбільшою), що приведе до утворення зони горіння складної форми

— неоднорідність розміщення пожежного навантаження;

Пожежне навантаження може розміщуватися нерівномірно по площі, а також розташовуватися на різних рівнях (горіння матеріалів в стелажах, у висотних складах, горіння горючих покриттів стін, завіс). Тоді поширення горіння буде здійснюватися не тільки по горизонталі, але і розповсюджуватися у вертикальному напрямі. Швидкість поширення пожежі по вертикалі залежить від кута нахилу розташування горючого матеріалу. При поширенні пожежі вгору швидкість поширення може бути в два - три рази більше, ніж по горизонталі; при поширенні зверху вниз швидкість знижується.

— наявності конвекційних потоків повітря

При рівномірному розподілі повітря, що надходить до зони горіння, відбувається рівномірне поширення пожежі і рівномірне вигорання горючого навантаження по всій площі. Якщо ж з'являється рух повітряних потоків (направлений вітер на відкритому просторі, або конвекційний потік повітря в приміщенні) то швидкість горіння в місцях інтенсивного надходження повітря більше, ніж там, де повітря не вистачає, отже, збільшується і швидкість поширення фронту пожежі в 2-3 рази.

Всі ці чинники можуть привести до утворення складної форми зони горіння.

Отже визначальними параметрами розвитку пожежі класу "А" є пожежне навантаження, лінійна швидкість поширення полум'я, масова швидкість вигорання, які в свою чергу залежать від виду горючого матеріалу, умов газообміну на пожежі, коефіцієнту поверхні горіння K_p , часу розвитку пожежі.

§ 5. Особливості розвитку пожеж твердих горючих матеріалів в огорожах

Пожежі в огороженні – пожежі, у яких тепло і масообмін обмежені будівельними конструкціями. Ці обмеження обумовлюють особливості розвитку пожежі класу А в приміщеннях. Розглянемо ці особливості по кожній зоні пожежі.

Зона горіння

Форма зони горіння залежить від місця виникнення пожежі, розмірів приміщення і часу розвитку пожежі.

На практиці для прогнозування можливої обстановки на пожежі, при розробці оперативного плану пожежогасіння приймається ряд припущень:

1. Горюче навантаження в приміщенні розподілено рівномірно;
2. Пожежа розповсюджується в усіх напрямках рівномірно;
3. Пожежа приймає розрахункові форми розвитку: кругову, сектор або прямокутну форму розвитку.
4. Перехід з однієї форми розвитку пожежі в іншу відбувається при підході фронту пожежі до огорожуючих конструкцій;
5. При досягненні протипожежних конструкцій поширення фронту горіння припиняється на час їх вогнестійкості;

Залежно від місця виникнення горіння на початковій стадії зона горіння може приймати форму кола, півкола або кутову. По мірі розвитку пожежі форма зони горіння може мінятися і перейти в прямокутну. При поширенні горіння в декількох приміщеннях складну форму пожежі умовно розбивають на декілька простих.

Масова швидкість вигорання матеріалів при пожежах в огороженні залежить від умов газообміну. Якщо повітря поступає струменем (концентрованим потоком), то найбільш інтенсивне горіння відбувається в місці надходження повітряного потоку і на шляху його руху. В цих місцях відмічається найбільший прогар матеріалу, аж до його повного вигорання. Масова швидкість вигорання змінюється в залежності від відношення площі отвору, через який здійснюється повітрообмін, до площі пожежі. При зменшенні площі отвору меншає масова швидкість вигорання матеріалів.

Зона теплового впливу

Оскільки теплообмін на пожежі обмежений будівельними конструкціями, зона теплового впливу визначається променистою і конвекційною теплопередачею від зони горіння. При цьому ускладнений вихід конвекційних потоків гарячих продуктів горіння, і розвиток пожежі супроводжується накопичення тепла. Відбувається поступове збільшення температури пожежі, оскільки за температуру пожежі в огороженні приймається середньооб'ємна температура газового середовища в приміщенні.

Межа зони теплового впливу визначається критичною температурою газового середовища (для людей – біля 70°C)

Зона задимлення

Зона задимлення обмежена будівельними конструкціями, тому розвиток пожежі супроводжується накопиченням диму в приміщенні.

При пожежах, які розвиваються в умовах нестачі окислювача, горіння може відбуватися тільки в місцях надходження повітря. Інша частина об'єму зазнає сильного теплового впливу, при цьому може відбуватися термічне розкладання горючих матеріалів з утворенням горючих парів і газів. Внаслідок різкого надходження свіжого повітря в приміщення концентрація горючих газів може потрапити до вибухонебезпечних меж і статися їх об'ємне запалення в кінетичному режимі, тобто вибух.

При пожежах в огороженні можливе регулювання зони задимлення за допомогою вентиляції, при використанні димососів, а також при організації конвекційних потоків повітря (розкриття отворів).

Висновок: прогнозування розвитку пожеж в огорожах дозволить вам розробляти план пожежогасіння і раціонально використати сили і засоби на пожежі.

§ 6. Особливості розвитку пожеж твердих горючих матеріалів на відкритих просторах

Пожежі на відкритих просторах досить часто явище. До них відносяться:

пожежі споруд, коли горінням охоплена зовнішня поверхня будівлі або вся споруда загалом;

пожежі на складах твердих горючих матеріалів (скирти сіна, штабелі лісопиломатеріалів і т.п.);

лісові і степові пожежі, пожежі торфовищ та ін.

Пожежі твердих горючих матеріалів на відкритих просторах відрізняються від пожеж в огорожах по багатьох параметрах. Ці пожежі протікають без обмеження тепло і масообміну і, тому зовнішні умови більшою мірою впливають на їх розвиток.

Зона горіння

Зона горіння при пожежі на відкритому просторі визначається розподілом горючих речовин по поверхні і формується під впливом теплового випромінювання і конвекційних потоків. На відміну від пожеж в огороженні розвиток пожеж на відкритому просторі багато в чому визначається швидкістю і напрямком вітру, рельєфом місцевості, метеорологічними умовами, вмістом вологи в матеріалі і багато чим інше.

У безвітряну погоду (швидкість вітру менше за 1 м/с) форма розвитку пожежі визначається особливістю розміщення пожежного навантаження. У тих випадках, коли горючі матеріали розміщені приблизно рівномірно і немає зовнішніх обмежень, то швидкість поширення фронту полум'я приблизно однакова у всіх напрямках і пожежа розвивається по круговій схемі. При подальшому розвитку площа пожежі буде визначатися перешкодами. Це можуть бути протипожежні розриви, дороги, будівлі і споруда, протипожежні прокоси в місцях збору врожаю, просіки, водні і інші перешкоди.

При вітрі характер поширення горіння змінюється і навіть незначний вітер зі швидкістю 1,5-2 м/с відхиляє полум'я, що приводить до зміни швидкості поширення горіння з підвітряного боку. При збільшенні швидкості вітру до 20 м/с лінійна швидкість поширення пожежі зростає майже в 2 рази.

Швидкість поширення пожежі у залежності від швидкості вітру можна розрахувати по формулах:

Для штабелів пиломатеріалів

$$v_1 = v_1^0 \left[1 + 0,14 \left(\frac{v_{\text{вітр}}}{v_1^0} \right)^{0,32} \right]$$

де $v_{\text{вітр}}$ - швидкість вітру, м/с;

v_1^0 - нормативна лінійна швидкість поширення полум'я, м/с;
 v_1 - швидкість поширення фронту полум'я з урахуванням вітру, м/с.
 Для фрезерного торфу:

$$v_1 = \left(\frac{v_{\text{вітр}} - 2,5}{2,1} \right)^2$$

Для кускового торфу вологістю до 25 %:

$$v_1 = \left(\frac{v_{\text{вітр}} - 2,5}{7,5} \right)^2$$

де v_1 - лінійна швидкість поширення полум'я, м/год;
 $v_{\text{вітр}}$ - швидкість вітру, від 5 до 15 м/с.

Для лісових пожеж залежність лінійної швидкості поширення від вітру має більш складний вигляд і в деяких випадках такі дані зведені в таблиці. Проте існують емпіричні формули розрахунку швидкості поширення фронту пожежі в напрямках фронту, тилу і флангу:

$$v_{1\text{тил}} = \frac{260\varepsilon}{\rho(16 + W_{\text{абс}})}$$

$$v_{1\text{фр}} = v_{1\text{тил}} \left(1 + 2,7 v_{\text{пол}}^{2/v_{\text{пол}} + 1} \right)$$

де ε – коефіцієнт чорноти полум'я (0,14 – 0,45)
 ρ – густина горючого шару (підстилка, обпале листя, торф), кг/м³;
 $v_{\text{пол}}$ – швидкість вітру під пологом деревостою на висоті 2 м, м/с;
 $W_{\text{абс}}$ – вологість горючого шару, %.

Співвідношення між швидкістю поширення пожежі по фронту, флангам і тилу можна визначити по формулах:

$$v_{1(\text{фл})} = 0,35 v_{1(\text{фр})} + 0,17$$

$$v_{1(\text{тил})} = 0,1 v_{1(\text{фр})} + 0,2$$

Розрізняють 5 класів пожежної небезпеки лісів

Клас пожежної небезпеки лісу	Ступінь пожежної небезпеки
I	відсутність небезпеки
II	мала
III	середня
IV	висока
V	надзвичайна

Зміна швидкості поширення горіння у напрямку вітру приводить до зміни форми розвитку пожежі. При швидкості вітру більше за 5 м/с пожежа переходить в кутову форму. Кут розвитку можна визначити як

$$\alpha = 65 - 2,6 v_{\text{вітр}}$$

де α - кут поширення в градусах;

$v_{\text{вітр}}$ - швидкість вітру, м/с.

Для відкритих пожеж характерною є поява конвекційної колонки. Підйом нагрітих продуктів горіння відбувається через різницю густини нагрітих продуктів згорання і холодного повітря

$$\Delta P = gh(\rho_{\text{пг}} - \rho_{\text{в}}).$$

Висота підйому димогазової колонки вимірюється кількома десятками метрів. Чим більше площа горіння, тим вище конвекційна колонка над осередком горіння.

При організації конвекційної колонки нагріті продукти горіння підіймаються із великою швидкістю, а в нижню частину відбувається приплив холодного повітря, що приводить до турбулізації потоку. При цьому відбувається винесення у верхню частину колонки разом з продуктами горіння іскор і головешок, що догорають. При збільшенні площі горіння збільшується і висота підйому цих тліючих часток. Вгорі відбувається активне змішування гарячих продуктів горіння з холодним повітрям і зниження їх температури. Швидкість підйому продуктів горіння знижується. У безвітряну погоду конвекційна колонка підіймається на ту висоту, де температура продуктів горіння і навколишнього повітря порівнюються. При цьому припиняється рух вгору і починається поширення продуктів горіння в горизонтальному напрямі. Важкі частки вуглецю, іскри, дрібні шматочки матеріалу, що не догоріли, втрачають підймальну силу і починають випадати на землю. Таким чином, відбувається перенесення осередків пожежі далеко за межі зони горіння. При вітрі збільшується відстань, на якій станеться розліт іскор. Відмічені випадки перенесення іскор із зони горіння на відстань, що перевищує два кілометри.

Дальність розльоту від осередку пожежі іскор і головешок, які здатні спричинити загорання, можна визначити за формулами:

для штабелів лісопиломатеріалів при швидкості вітру до 9 м/сек:

$$L_{\text{розл}} = \frac{14,7S_{\text{пож}}v_{\text{вітр}}}{v_{\text{віт}}^3}$$

для штабелів лісопиломатеріалів при швидкості вітру більше 9 м/сек

$$L_{\text{розл}} = \frac{14,7S_{\text{пож}}v_{\text{вітр}}}{v_{\text{віт}}^2}$$

для фрезерного торфу:

$$L_{\text{розл}} = \left(\frac{v_{\text{віт}} - 2}{1,3} \right)^2$$

для кускового торфу вогкістю до 25 процентів:

$$L_{\text{розл}} = \left(\frac{v_{\text{віт}} - 4,5}{1,5} \right)^2$$

де $v_{\text{віт}}$ - швидкість вітру, м/с

$v_{\text{віт}}$ - швидкість витання часток, що розлітаються, приймається 9 м/с.

Отже зона горіння може поширюватися не тільки за рахунок теплопередачі, але і за рахунок розльоту іскор.

На розвиток горіння сильно впливає рельєф місцевості. Швидкість поширення пожежі вгору по схилу значно вище, ніж у горизонтальному напрямку. Це обумовлено впливом конвекційних потоків гарячих продуктів горіння, які попередньо прогрівають горючий матеріал. Самостійне поширення верхової пожежі зі схилу вниз практично не спостерігається. Подібне явище неодноразово зафіксоване на лісових пожежах в Криму.

Значний вплив на швидкість поширення пожежі здійснюють кліматичні умови. Це обумовлено залежністю вологості ТГМ на відкритій поверхні від погодних умов: пори року, особливостей клімату і навіть часу доби. Так встановлено, що штабель пиломатеріалів при температурі 8°С повністю охоплюється вогнем через 8 хвилин, а при температурі 15°С - через 4 хвилини. Висока температура повітря сприяє зниженню вологості матеріалу і саме цим можна пояснити те, що швидкість розвитку лісових пожеж знижується у нічний час.

Зона теплового впливу

Умови теплообміну при пожежах на відкритих просторах істотно відрізняються від умов теплообміну при пожежах в огороженні. На таких пожежах тепло не накопичується в зоні горіння, а вільно передається у навколишній простір. Теплообмін здійснюється із необмеженим простором, і з цієї причини за температуру пожежі приймають температуру в зоні реакції горіння. На відміну від пожеж в огороженні, на відкритих пожежах температурний режим протягом всієї пожежі залишається постійним.

Зона теплового впливу на відкритій пожежі визначається переважно променистим теплообміном, оскільки конвекційні потоки, як правило, рідко впливають на поверхню землі. Однак в особливих умовах конвекційні потоки можуть значно впливати на обстановку пожежі, а, отже, і на тактику дії пожежних підрозділів. Так, при розвитку низової пожежі лісу, при якій відбувається горіння лісової підстилки, можливе так зване стрибкоподібне поширення пожежі. У цьому випадку тліючий характер горіння низової пожежі не дає значного променистого потоку, але підготовка горючого матеріалу відбувається за рахунок прогрівання конвекційними потоками. Після попереднього прогрівання матеріалу відбувається запалення продуктів термічного розкладання, при цьому пожежа “стрибає” вгору і охоплює частину горючого матеріалу, після чого відбувається поширення вже верхової пожежі.

Межі зони теплового впливу визначаються критичною густиною теплового потоку, кВт/м^2 .

Ступінь захисту	Величина критичної густини теплового потоку $q_{кр}$, кВт/м^2	
	тривалий час	обмежений час
для людей без теплового захисту	0,56	1,05
для людей у бойовому одязі	4,2	7,0
для пожежної техніки	12,5	

Зона задимлення

Має свої особливості і зона задимлення. При горінні у безвітряну погоду на обмеженій площі продукти горіння підіймаються вертикально вгору і практично не впливають на особовий склад, задіяний у гасінні пожежі. При пожежах лісу, торфу і лісопиломатеріалів, складів твердих горючих матеріалів, а також при пожежах за умов, коли швидкість вітру знаходиться в межах від 5 до 12 м/с, зона задимлення притискається до землі, і температура у ній може бути високою, що значною мірою впливає на організацію гасіння пожежі.

Не зважаючи на необмежену кількість окислювача у навколишньому середовищі, при пожежах на відкритому просторі теж утворюються продукти неповного згорання. Це трапляється через потужні конвекційні потоки продуктів горіння, які під час свого руху не дають потрапити кисню в середину зони горіння. Отже в центрі зони горіння окислення буде проходити з нестачею кисню.

На відміну від пожеж в огорожах зона задимлення на відкритому просторі не регулюється.

Глава 2. Особливості розвитку пожежі класу "В" на відкритому просторі

§ 1. Закономірності виникнення та розвитку пожежі горючих рідин

1.1. Можливість утворення горючого середовища і його запалення

Пожежа класу В може виникнути внаслідок запалення пароповітряного середовища, яке утворюється над поверхнею рідини, яка, в свою чергу, може знаходитися в технологічному обладнанні (резервуарах, технологічних апаратах) або розлитою, внаслідок аварійної ситуації.

У технологічному процесі зберігання нафти і нафтопродуктів в резервуарах можуть створюватися умови для виникнення і розвитку пожежі: за певних умов утворюється горюче середовище всередині і зовні резервуара, а також можливе виникнення джерела запалювання.

Окислювачем, необхідним для горіння, є кисень із навколишнього середовища. Утворення горючого середовища і поява в ньому джерела запалювання приводить до виникнення пожежі.

Можливість виникнення пожежі в технологічному обладнанні із горючими рідинами (ГР) зумовлюється можливістю утворення горючої пароповітряної суміші і появи джерел запалювання в його внутрішньому газовому просторі.

При зберіганні ГР в закритому об'ємі пара над поверхнею рідини є насиченою, і оцінку горючості даної суміші можна проводити по температурних межах поширення полум'я:

$$T_{HTMPP} \leq T_{факт} \leq T_{VTMPP}$$

де: $T_{факт}$ – середня робоча температура рідини;

T_{HTMPP} і T_{VTMPP} – відповідно нижня і верхня температурні межі поширення полум'я.

Оцінка горючості пароповітряної суміші по температурних межах поширення полум'я проста і зручна, однак в конкретних виробничих умовах можливість її застосування обмежена, оскільки температурні межі характеризують тільки насичену пару. При проведенні різних технологічних операцій (наповнення, відкачка) концентрація пари в газовому просторі відхиляється від стану насичення навіть при постійній температурі навколишнього середовища і самої горючої рідини, тому температурні межі не можуть характеризувати стан горючості внутрішнього середовища. У таких випадках оцінку потрібно виконувати по концентраційних межах поширення полум'я, а робочу концентрацію пари визначати розрахунком.

Умови утворення у просторі резервуара горючої пароповітряної суміші визначаються співвідношенням:

$$\varphi_n \leq \varphi \leq \varphi_v,$$

де φ_n і φ_v – відповідно нижня і верхня концентраційні межі поширення полум'я; φ – робоча концентрація пари горючої рідини.

Розрахунок робочої концентрації пари рідини в резервуарі без теплової ізоляції враховує температурні перепади і вид технологічних операцій (наповнення, відкачка нафтопродукту, простій пустого резервуара). Однак слід зазначити, якщо в якості горючої рідини виступають нафта, бензин, гас, мазут, то при всіх технологічних операціях всередині резервуара створюється пожежовибухонебезпечна концентрація пари.

При появі джерела запалювання всередині резервуара можливе запалення горючого середовища і вигорання парів в кінетичному режимі (вибух).

В зовнішньому просторі горюче середовище може виникнути:

- внаслідок виходу парів горючої рідини через дихальні пристрої технологічного обладнання,
- внаслідок випаровування рідини при аварійному розливі горючої рідини.

Вихід парів горючої рідини через дихальні пристрої технологічного обладнання називається "диханням" резервуару. При збільшенні температури навколишнього середовища, за рахунок збільшення інтенсивності пароутворення із поверхні рідини, відбувається так зване "мале дихання". При заповненні резервуара горючою рідиною змінюється внутрішній об'єм газового простору і при цьому відбувається витіснення пари назовні, так зване "велике дихання".

Пожежну небезпеку від загазованості території переважно визначає "велике дихання", коли відбувається короткочасний, але потужний викид пари. Ступінь загазованості атмосфери залежить від кількості пари, що виходить, яку можна визначити розрахунком:

$$G_a = \left[V_1(1-\varphi_1) \frac{P_1}{T_1} - V_2(1-\varphi_2) \frac{P_2}{T_2} \right] \frac{\varphi}{1-\varphi} \frac{1}{R_r}$$

де V_1, V_2 – об'єм газового простору резервуара до і після закачування відповідно;

P_1, P_2 – тиск насиченої пари при температурах T_1 і T_2 відповідно;

φ_1, φ_2 – концентрація пари горючої рідини в об'ємі V_1, V_2 при температурі T_1 і T_2 відповідно;

$\varphi_{сер}$ – середня концентрація пари горючої рідини;

R – універсальна газова стала.

Розрахункова формула для горизонтального розміру (радіусу) зони вибухонебезпечних концентрацій має вид:

$$L = 10 \left(\frac{1.5 g \Phi_{\text{факт}}}{\Phi_{\text{н}}} \right)^{0,66}$$

де L – розмір (радіус) зони, м;

g – продуктивність насосів, що заповнюють резервуар, м³/с;

$\Phi_{\text{факт}}$ - фактична концентрація парів при даній температурі і тиску, %;

$\Phi_{\text{н}}$ - нижня КМПП, %.

Згідно ГОСТ 12.1.004-89 діаметр зони загазованості з урахуванням розміру резервуару можна визначити за формулою:

$$D_{\text{заг}} = D_{\text{рез}} + 10 H_{\text{рез}} \left(\frac{g \Phi_{\text{факт}}}{\Phi_{\text{н}} H_{\text{рез}}^2} \right)^{0,86}$$

Поява джерела запалювання в цій зоні приведе до об'ємного запалення пари з вибухом.

Джерела запалювання можуть бути природного походження від впливу навколишнього середовища і від необережного поводження людей з вогнем. Основними джерелами запалювання для резервуарів є:

- прямі удари блискавки,
- розряди статичної електрики;
- фрикційні іскри, що утворюються внаслідок механічних ударів при ручному вимірюванні рівня і відборі проб, при виконанні робіт по ремонту і обслуговуванню резервуара,
- самозаймання пірофорних сульфідів заліза (є характерним для резервуарів з нафтою з високим вмістом сірки).

Приблизно 35% всіх зареєстрованих пожеж і загорянь відбувається на резервуарах, що ремонтуються або очищуються.

При аварійному виході горючих рідин із резервуарів або іншого технологічного обладнання площа розливу рідини, визначається її масою, рельєфом місцевості і властивостями ґрунту. Площа, яку займає рідина при її виході на поверхню визначається за формулою:

$$S_{\text{розл.рід}} = \frac{G_{\text{вит}} \tau_{\text{вит}}}{h_{\text{рід}}},$$

де $G_{\text{вит}}$ – витрата витікання рідини, кг/с; $h_{\text{рід}}$ – висота шару рідини, м; $\tau_{\text{вит}}$ – час витікання, хв.

При цьому відбувається активне випаровування в навколишнє середовище. Загальна маса горючої пари з урахуванням часу випаровування може бути визначена як:

$$m = I_{\text{вип}} \tau_{\text{вип}} S_{\text{вип}}$$

де $I_{\text{вип}}$ – інтенсивність випаровування, кг/(м²·с);

$\tau_{\text{вип}}$ – час випаровування, с;

$S_{\text{вип}}$ – площа випаровування, м².

Радіус зони загазованості із концентрацією пари, що перевищує нижню концентраційну межу поширення полум'я $\Phi_{\text{н}}$, можна розрахувати за формулою:

$$R_{\text{заг}} = 3,15 \sqrt{\frac{\tau}{60}} \left(\frac{P_{\text{пар}}}{\varphi_{\text{н}}} \right)^{0,8} \left(\frac{m_{\text{пар}}}{\rho_{\text{пар}} P_{\text{пар}}} \right)^{0,33},$$

де $\rho_{\text{пар}}$ – густина пари за даної температури, кг/м³;

$P_{\text{пар}}$ – тиск насиченої пари за даної температури, кПа;

$m_{\text{пар}}$ – маса пари, що випарувалися за повний час, але не більше за 60 хвилин, кг;

$\varphi_{\text{н}}$ – нижня концентраційна межа поширення полум'я, %.

При визначенні розмірів зовнішніх небезпечних зон з урахуванням подальших процесів розвитку пожежі, зону загазованості доцільно розділяти на дві області:

- зона, в якій утвориться концентрація пари з в області запалення;
- зона, в якій утвориться концентрація пари більша верхньої межі поширення полум'я.

При запаленні газової хмари, в якій утворилася горюча суміш з концентраціями від нижньої до верхньої межі поширення полум'я, горіння протікає в кінетичному (вибуховому) режимі.

Потужність вибуху можна оцінити у порівнянні із стандартним вибухом відповідної маси тринітротолуолу. Тротиловий еквівалент вибуху парогазової системи розраховується як:

$$W_{\text{ТНТ}} = 0,45 \frac{Q'_{\text{н}}}{Q_{\text{ТНТ}}} m_{\text{пр}} \approx 0,98 \cdot 10^{-5} Q'_{\text{н}} m_{\text{пр}},$$

де $Q'_{\text{н}}$ – масова теплота згоряння речовини, кДж/кг;

$m_{\text{пр}}$ – маса речовини, що бере участь у вибуху, кг;

$Q_{\text{ТНТ}}$ – питома енергія вибуху тринітротолуолу (ТНТ), приймається рівною 46 000 кДж/кг.

При вибуху парогазової суміші безпосередньо в процесі горіння бере участь не вся маса горючої речовини, а лише її частка. З цієї причини при розрахунку тротилового еквівалента враховується приведена маса пари і газів, що бере участь у вибуху. Її визначають за формулою:

$$m_{\text{пр}} = m \cdot Z,$$

де m – маса речовини, що утворила вибухонебезпечну суміш, кг;

Z – коефіцієнт участі пари і газів у вибуху.

Z обирається залежно від умов вибуху:

в незамкненому просторі $Z = 0,1$

в замкненому просторі:

для водню $Z = 1$

для інших горючих газів $Z = 0,5$

для парів ЛЗР і ГР $Z = 0,3$

Вибухи парів і газів супроводжуються підвищенням тиску. Надлишковий тиск, що виникає при цьому в ударній хвилі, може приводити до руйнування будівель і технологічних установок, травм і загибелі людей. До травм і загибелі можуть приводити і повторні наслідки вибухів, такі як уламки скла, частин апаратів, що розлітаються, та ін.

Можливу руйнівну дію ударної хвилі при вибуху можна оцінити за величиною надлишкового тиску ΔP . Радіус зони руйнування можна розрахувати за формулою:

$$R_{\text{т}} = \Psi \sqrt[3]{W_{\text{ТНТ}}},$$

де $W_{\text{ТНТ}}$ – тротиловий еквівалент, кг;

Ψ – коефіцієнт, що враховує значення надлишкового тиску при вибуху.

Для людей:

- летальні наслідки від розриву легень $\Delta P = 70$ кПа $\Psi = 3,54$; - легкі травми і контузії $\Delta P = 12$ кПа $\Psi = 9,79$;

Для будівель і споруд дію ударної хвилі можна оцінити як:

- повне руйнування будівель і споруд $\Delta P = 50$ кПа $\psi=4,09$; - сильне руйнування і пожежі $\Delta P = 30$ кПа $\psi=5,36$ - середнє руйнування і можливі пожежі $\Delta P = 20$ кПа $\psi=6,89$; - слабе руйнування будівель $\Delta P = 10$ кПа $\psi=11,16$.

При потужних парогазових викидах вибухонебезпечні концентрації можуть утворитися тільки на зовнішній межі зони загазованості. Всередині зони концентрація газів може перевищувати верхню концентраційну межу поширення полум'я. У цьому випадку в кінетичному режимі згоряє тільки зовнішня частина зони загазованості, а інша частина газової хмари буде вигоряти на периферії в дифузійному режимі. При цьому утворюється вогненна сфера, яка через різницю густини підіймається вгору. Після виникнення горіння в такій частині зони загазованості в резервуарному парку пожежа на початковій стадії локалізується на дихальних пристроях резервуара.

У зоні впливу вогненної сфери відбувається практично миттєве згорання більшості тканих матеріалів, шкіри людини. Тепловий вплив у вогненній сфері викликає летальні наслідки.

Радіус вогненної сфери можна визначити виходячи із приведеної маси горючої речовини, що бере участь у вибуху, за формулою:

$$R_{\text{вс}} = 29,6 \cdot 3 \sqrt{\frac{W_{\text{тнт}}}{T_{\text{гор}}}}, \text{ м}$$

Час життя вогненної сфери і її теплового впливу на особовий склад визначається за формулою:

$$\tau_{\text{вс}} = 4,6 \cdot 3 \sqrt{\frac{W_{\text{тнт}}}{T_{\text{гор}}}}, \text{ с}$$

Одним з факторів, що обумовлює поширення пожежі і ураження людей, є теплове випромінювання вогненної сфери при вибухах. Опіки відкритих ділянок шкіри виникають при тепловому потоку більше за $q_{\text{min}} = 1,4$ кВт/м². При цьому відстань, на якій людина може отримати опіки шкіри, визначається за формулою:

$$R_{\text{опік}} = 95 \cdot 3 \sqrt{\frac{W_{\text{тнт}}}{T_{\text{гор}}}},$$

де $T_{\text{гор}}$ - практична температура горіння речовини, К.

Таким чином, пожежі горючих рідин супроводжуються небезпечними явищами. Їх вплив може приводити до значних матеріальних втрат, травм, і навіть загибелі людей. До небезпечних чинників пожежі горючих рідин відносяться:

- відкритий вогонь;
- теплове випромінювання від полум'я;
- токсичні продукти горіння;
- небезпечні фактори вибуху (ударна хвиля; осколки зруйнованого технологічного обладнання, скління і частин будівель).
- можливість скипання нафти і нафтопродуктів;
- можливість викиду рідини, що горить, із резервуару.

Час до викиду розраховується за формулою:

$$\tau_{\text{внк}} = \frac{H_{\text{гр}} - h_{\text{вод}}}{V_{\text{прогр}} + V_{\text{внгор}}}, \text{ хв.}$$

де $H_{гр}$ – висота шару горючої речовини, м; $h_{вод}$ – висота шару води в резервуарі, м; $V_{прогр}$ – швидкість прогрівання, м/хв.; $V_{вигор}$ – швидкість вигорання, м/хв.

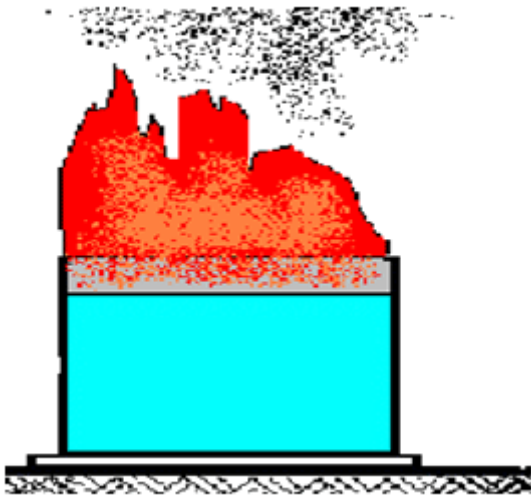
1.2. Модель пожежі в резервуарному парку.

Основними підприємствами по зберіганню нафтопродуктів є резервуарні парки і нафтобази. Резервуари для нафти і нафтопродуктів відносяться до промислових споруд підвищеної пожежної небезпеки.

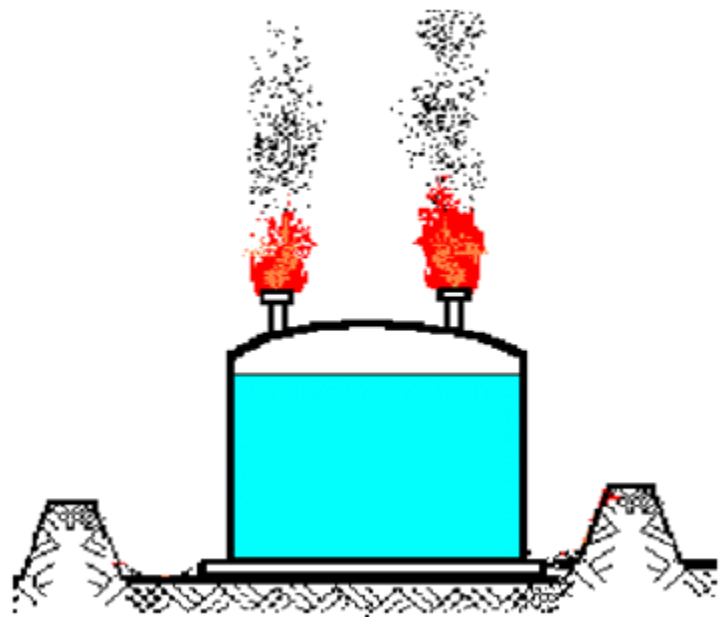
При розгляді основних закономірностей процесів виникнення і протікання пожежі необхідно скласти модель пожежі в резервуарі. Пожежу в резервуарному парку нафти і нафтопродуктів можна представити як логічну систему послідовних і взаємопов'язаних процесів.

За умовами виникнення і розвитку горіння в початковій стадії, а також з урахуванням можливості викиду і розтікання рідини, що горить, пожежі нафти і нафтопродуктів в резервуарах можна розділити на три основні види:

- внутрішня пожежа – пожежа з вибухом всередині газового простору і з подальшим горінням рідини в резервуарі;



- пожежа на дихальних пристроях – горіння пари, що виходить з резервуара на дихальних пристроях або на інших отворах;

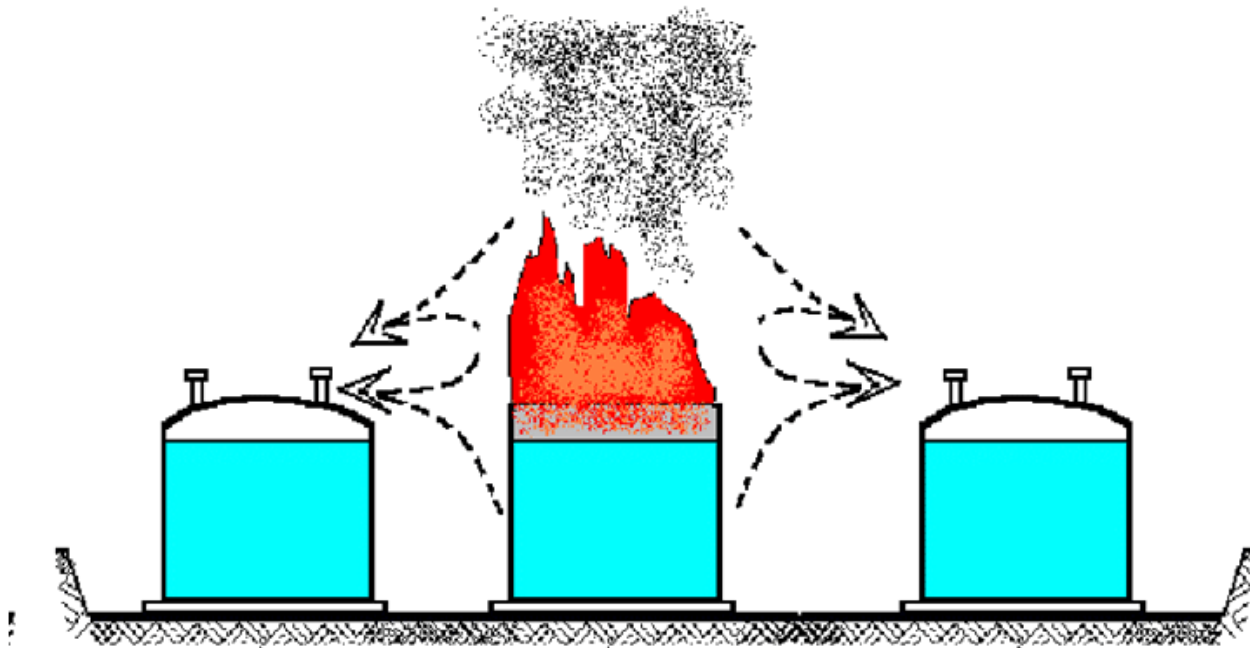


- зовнішня пожежа – пожежа з аварійним витіканням або викидом рідини з резервуарів і з горінням її в обвалуванні.

Застосування такої схеми до резервуарних парків дає просту і наочну модель виникнення і розвитку пожежі як послідовність резервуарів в певних типових

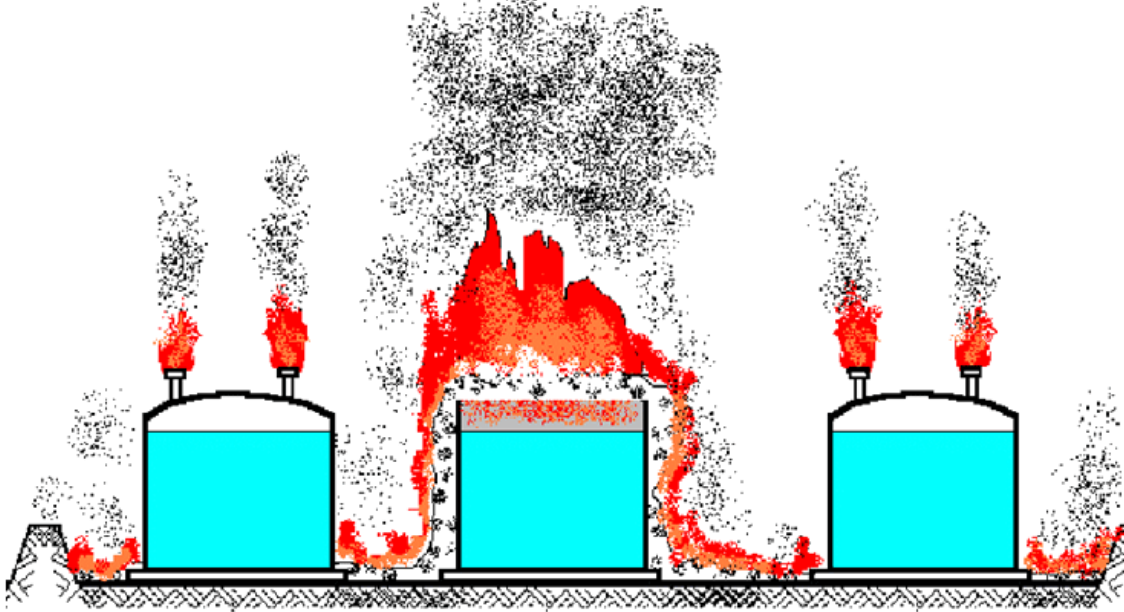
станах. При розвитку пожежі характер може змінюватися (наприклад, від пожежі на дихальних пристроях до внутрішньої пожежі і далі до зовнішньої пожежі). Поширення пожежі в конкретних умовах залежить від виробничої ситуації, місця виникнення і характеру пожежі в початковій стадії.

У стадії виникнення пожежі основним є нормально працюючий резервуар. Після виникнення пожежі з'являються резервуари, що відкрито горять і (або) з горінням на отворах. Наприклад, при вимірюванні рівня або відборі проби з резервуара внаслідок появи фрикційної іскри виникає внутрішня пожежа, яка, як правило, починається з вибуху пароповітряної суміші всередині резервуара і нерідко супроводжується загибеллю або травмуванням людей, що виконують цю роботу.



Під дією інтенсивного теплового випромінювання від резервуара, що горить, відбувається розвиток пожежі. Резервуари, які не горять і нормально працюють, перетворюються в ті, що обігріваються пожежею, внаслідок чого відбувається швидке прогрівання внутрішнього парогазового середовища, а також дихального і іншого обладнання резервуарів. При цьому поверхня, яка обігрівається, нагрівається до значних температур, що може привести до запалення горючого середовища. Виникає пожежа на дихальних пристроях. Тривале горіння пари на дихальній арматурі

приводити до плавлення вогнеперешкоджувачів.

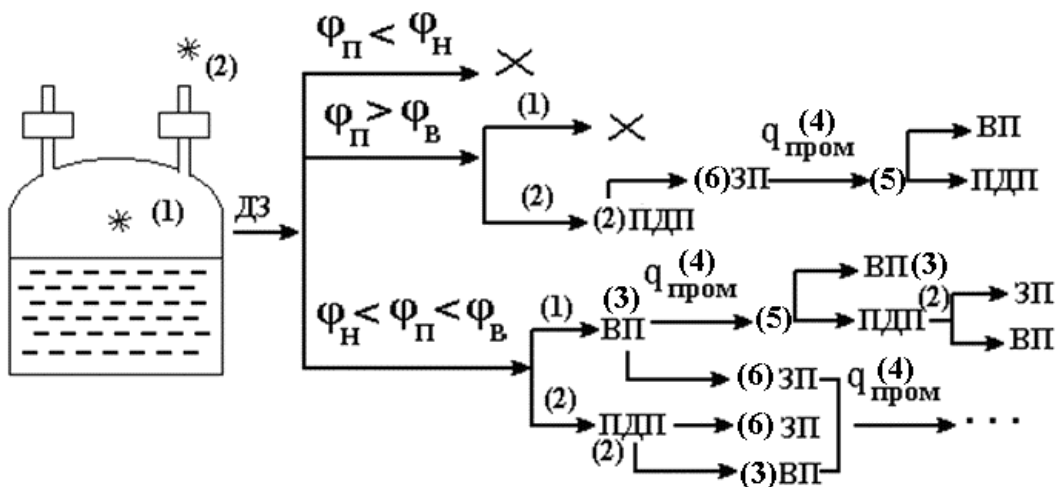


Як правило, проскоку горіння в середину резервуара при цьому не спостерігається, і горіння продовжується в факельному режимі. Однієї з причин стабілізації горіння в отворах резервуара є надмірний тиск пари всередині резервуара.

При спробі відкачати горючу рідину з резервуара або при розкритті додаткових отворів для подачі вогнегасних речовин на поверхню рідини тиск пари в резервуарі може знизитися, і полум'я проскакує всередину резервуара. При цьому горіння переходить в кінетичне, тиск продуктів вибуху може привести до відриву покриття резервуара і ускладнення обстановки на пожежі. Перехід горіння на дзеркало рідини також може відбуватися після втрати механічної міцності і деформації покриття резервуара.

Крім того, з часом внутрішня пожежа внаслідок аварійного руйнування резервуара і витікання горючої рідини в обвалування або викиду і скипання може перейти у зовнішню пожежу. Резервуар, що не горить і знаходиться в одному обвалуванні з тим, що зруйнувався, знову піддається тепловому впливу. Тривалість вигорання рідини в обвалуванні залежить від роду горючої рідини і пористості ґрунту.

Причиною швидкого поширення пожежі є близьке розташування резервуарів один від одного. Обстановка на пожежі різко ускладнюється з появою кожної нової пари – резервуар, що горить відкрито, і резервуар, що обігривається пожежею.



1. Резервуар до пожежі; 2. Резервуар із пожежею на дихальних пристроях 3. Резервуар із внутрішньою пожежею; 4. Теплове випромінювання; 5. Резервуар, що знаходиться під впливом теплового випромінювання; 6. Зовнішня пожежа.

У представлену модель вписується будь-яка реальна пожежа в резервуарному парку навіть при наявності будь-якого незвичайного зовнішнього впливу, не пов'язаного з технологічним процесом.

§ 2. Небезпечні фактори, що супроводжують розвиток пожежі класу

Пожежі горючих рідин супроводжуються небезпечними явищами. Їх вплив може приводити до значних матеріальних втрат, травм, і навіть загибелі людей. До небезпечних чинників пожежі горючих рідин відносяться:

- Відкритий вогонь;
- Теплове випромінювання від факела полум'я;
- Токсичні продукти горіння;
- Можливість скипання нафти і нафтопродуктів;
- Можливість викиду рідини, що горить, з резервуара;
- Небезпечні фактори вибуху (ударна хвиля; осколки зруйнованого технологічного обладнання, скління і частин будівель).

2.1. Променистий теплообмін при горінні рідин.

Одним з небезпечних чинників розвитку пожежі в резервуарному парку є тепловий вплив факела полум'я над резервуаром. Теплове випромінювання полум'я впливає на особистий склад, що бере участь в гасінні пожежі, на пожежну техніку. Через неможливість знаходитися в безпосередній близькості від резервуара складно здійснити подачу вогнегасних речовин безпосередньо у осередок горіння для гасіння. Наявність променистого та конвекційного теплообміну створює загрозу нагріву і запалення рядом розташованого обладнання і резервуарів. Внаслідок теплового впливу на металеві конструкції відбувається їх швидке прогрівання і втрата механічної міцності. Крім того при нагріві поверхонь резервуара і його обв'язки до небезпечних температур (температури самоспалахування) вони можуть стати джерелом запалювання горючої пароповітряної суміші. Внаслідок цього пожежа може швидко розповсюдитися на територію усього резервуарного парку. У разі такого розвитку пожежі для його ліквідації буде потрібні дуже багато часу, а також сил і засобів гарнізонів пожежної охорони.

Кількість енергії, яка передається променистим потоком, складає приблизно 40 % енергії, що виділяється при горінні пароповітряної суміші.

Щільність теплового потоку на поверхню конструкцій, що обігріваються визначається як

$$q_{\text{л}} = \psi \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot T_{\text{ф}}^4 \cdot S_{\text{ф}},$$

де $S_{\text{ф}}$ – площа поверхні факелу полум'я над резервуаром; ψ – коефіцієнт опромінюваності; σ_0 – стала Больцмана; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – ступінь чорноти полум'я $T_{\text{ф}}$ – температура факелу полум'я.

Інтенсивність випромінювання залежить від площі, що випромінює, яка, в свою чергу, залежить від форми зони горіння. Форма факелу над резервуаром постійно міняється, але для визначення характеристик горіння її можна прийняти у вигляді конуса або циліндра з діаметром рівним діаметру резервуара і висотою $H_{\text{ф}}$. Висота полум'я залежить від діаметра резервуара і роду горючої рідини. Відомо, що при горінні продукту в резервуарі розмірами від 2 до 23 метрів висота факела полум'я пропорційна діаметру резервуара і для різних рідин вона визначається як:

- для бензину $H_{\text{ф}} = 1.5 D$;
- для дизельного палива $H_{\text{ф}} = 1D$;
- для етилового спирту $H_{\text{ф}} = 0.8D$.

Безпечну відстань від резервуара, що горить, до сусіднього резервуара можна визначити, використовуючи рівняння променистого теплообміну між довільно розташованими тілами по формулі

$$R_{\text{без}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{пр}} \sigma T_{\text{гор}}^4 S_{\text{ф}}}{\pi q_{\text{кр}}}}$$

Якщо форму факела полум'я над резервуаром прийняти у вигляді прямокутника з висотою рівної 0.7 діаметра резервуара при горінні ЛЗР і 0.6 при горінні ГР можна записати як

$$R_{\text{без}} = 0,02D \sqrt{\frac{\eta Q_{\text{Н}}^1 v_{\text{м}} \cos \alpha}{q_{\text{кр}}}}$$

Враховуючи висоту резервуара $H_{\text{р}}$, безпечну відстань можна визначити як:

$$L_{\text{без}} = \sqrt{R^2 - H_{\text{р}}^2}$$

Для скорочення часу розрахунків на пожежах та пожежно-технічних навчаннях для вертикальних сталевих резервуарів можна використовувати формулу

$$R_{\text{без}} = 0.77 \cdot v^{0.592} \cdot \exp(-0.134 \cdot q_{\text{кр}})$$

Для визначення інтенсивності теплового потоку від факела над рідиною, що розлилася, необхідно розрахувати ефективну площу і висоту факела над поверхнею горіння. Висота факела полум'я $H_{\text{ф}}$, розраховується по формулі Томсона

$$H_{\text{ф}} = 3,46d \left(\frac{v_{\text{м}}}{\rho \sqrt{dg}} \right)^{0.61} = 1.72d \left(\frac{v_{\text{м}}}{\rho \sqrt{d}} \right)^{0.61}$$

де d - ефективний діаметр протоки, визначається за формулою m^2 ;

S - площа протоки, m^2 ;

$v_{\text{м}}$ - масова швидкість вигорання рідини, $кг/(м^2 \cdot с)$;

ρ - густина повітря, $кг/м^3$, приймається рівної 1.205 кг/м^3 .

g - прискорення вільного падіння, 9.81 м/с^2 .

2.2. Скипання і викид рідини на пожежі

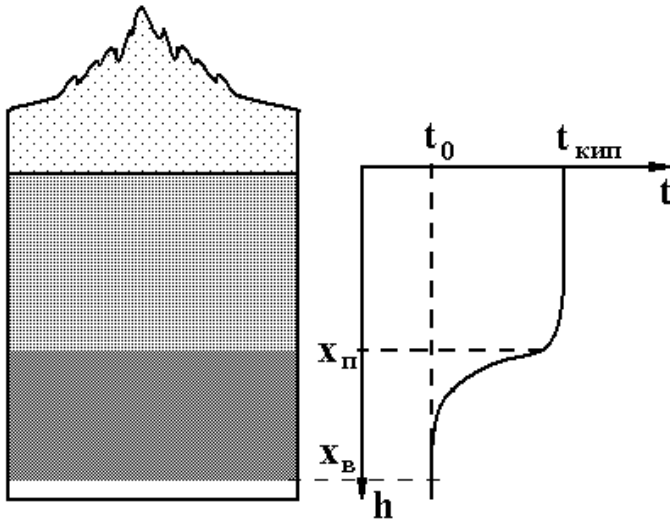
Горючі рідини, що мають високу теплоту пароутворення і велику теплопровідність, мають швидкість вигорання меншу, ніж швидкість прогрівання в глибину. Прогрівання рідини в глибину здійснюється за рахунок теплопровідності самої рідини, стінок резервуара, температура яких вище за температуру рідини (коефіцієнт теплопровідності металу на порядок вище, ніж у рідини), та конвекційного масопереносу, що виникає в глибині рідини. Більш нагріта у стінок рідина підіймається вгору, що сприяє інтенсивному перемішуванню і швидкому прогріванню рідини на значну глибину.

При горінні сумішевих рідин верхній шар, що втратив внаслідок випаровування і вигорання легкі фракції, стає більш важким і починає опускатися вниз до холодних шарів рідини. При цьому свіжа рідина нагрівається та спливає до поверхні, де продовжується її нагрів від полум'я, і, отже, збільшується товщина прогрітого шару.

Процес прогрівання нафти пов'язаний також із наявністю в ній вологи. Із збільшенням вмісту вологи в ГР швидкість прогрівання збільшується. Це пояснюється тим, що вода сприяє виникненню

інтенсивних конвекційних потоків в товщі ГР. Для нафти і важких нафтопродуктів, особливо обводнених, швидкість прогрівання в 4-10 раз перевищує швидкість їх вигорання.

При цьому утворюється шар з однаковою температурою, близькою до температури кипіння рідини, який називається гомотермічним. Товщина гомотермічного шару зростає з часом. Зміну товщини гомотермічного шару у часі можна представити у вигляді графічної і математичної залежності:



$$x = x_{\text{п}} (1 - e^{-\mu t})$$

де $x_{\text{п}}$ – максимальна критична товщина прогрітого шару продукту, що горить; μ – коефіцієнт, що залежить від властивостей рідини і діаметру резервуару; t – час від початку формування прогрітого шару; $x_{\text{в}}$ – положення шару води; t_0 – початкова температура продукту, що горить; $t_{\text{кип}}$ – температура кипіння продукту, що горить

Формування нагрітого шару і наявність води, яка завжди міститься в тій або іншій кількості в самій нафті і на дні резервуару, є причиною і необхідними умовами виникнення особливо небезпечних явищ, що супроводжують пожежі нафти і деяких нафтопродуктів в резервуарах, – скипання і викид рідини, що горить.

У процесі вигорання температура прогрітого шару нафти може підвищитися до 300°C. Через деякий час прогрітий шар нафти досягає придонного шару води, і нагріває його. Вода нагрівається до температури значно вище за температуру кипіння, оскільки в придонній воді знаходиться мало центрів пароутворення і на водяну подушку зверху тисне шар горючої рідини. З вигоранням тиск стовпа горючої рідини знижується. Перегрів буде продовжуватися доти, доки всередині шару води не виникнуть центри пароутворення. У цей момент станеться об'ємне закипання води з виділенням великої кількості водяної пари (1л води дає 1700 л водяної пари), яка викине нафту, що горить, із резервуару на велику висоту.

Якщо в придонній воді достатньо центрів пароутворення, то вона не перегрівається. На лінії розділу нафтопродукт — вода починає кипіти і утворюється парова плівка. Об'єм плівки наростає, і парова подушка, що утворюється через конвекційні потоки формується в паровий пухир і виходить на поверхню. Внаслідок цього найбільш нагріті верхні шари рідини, що горить, енергійно опускаються вниз і безпосередньо попадають на водяну подушку і приводять до бурхливого скипання всієї маси води. Тиск пари виштовхує рідину, що горить з резервуара. При цьому раптово викинута рідина, що горить, може покрити велику площу поблизу осередку горіння разом із людьми, будівлями і пожежною технікою. Відомі випадки, коли десятки тонн нафти викидалися на відстань декілька десятків метрів від осередку горіння.

Таким чином, викид рідини, що горить, може статися при виконанні наступних умов:

- горюча рідина легша, ніж вода; - горюча рідина не розчинна в воді; - під шаром горючої рідини знаходиться вода, - рідина при горінні прогрівається в глибину з

утворенням гомотермічного шару, що досягає шар води, - температура гомотермічного шару вище за температуру кипіння води.

Відсутність однієї з цих умов виключає можливість викиду. У зв'язку з цим викиди спостерігаються при горінні тільки нафти і мазуту і не спостерігаються при горінні таких нафтопродуктів, як гас, дизельне паливо і інші. Нафта і мазут прогриваються углиб достатньо інтенсивно, і температура прогрітого шару при цьому майже завжди вища за 100°C. Гас, дизельне паливо при горінні прогриваються повільно і не утворюють прогрітого шару однакової температури. Бензин прогривається також швидко, як нафта і мазут, але температура прогрітого шару нижче за температуру кипіння води, тому викид при горінні бензину малоімовірний.

Проміжок часу від початку горіння до настання викиду визначається швидкістю прогрівання продукту і практично дорівнює часу, протягом якого прогрітий шар нафти досягає придонного шару води. Щоб розрахувати цей час, необхідно знати товщину шару продукту, що горить і швидкість прогрівання.

$$\tau = \frac{H_{ГР} - h_{H_2O}}{v_1 + v_{прогр}}$$

де v_1 - лінійна швидкість вигорання, см/хвил;

$v_{прогр}$ - швидкість прогрівання рідини, см/ хвил;

$H_{ГР}$ - рівень наповнення резервуара, м;

h_{H_2O} - висота придонного шару води, м.

Викид можна легко попередити, якщо видалити придонний шар води. Однак, викид може відбуватися і при перемішуванні нагрітих шарів при подачі компактних струменів води.

Характерними ознаками початку викиду є виникнення вібрації стінок резервуару, що супроводжується шумом, і зростання розмірів факелу полум'я.

Однак викид, що має характер сильного вибуху, - явище порівняно рідке. Частіше буває більш або менш спокійне переливання нафти через борт резервуару, так зване скипання рідини. Скипання - перехід в пару значної кількості дрібних краплин води, що знаходиться в нафтопродукті, і пов'язана з цим поява на поверхні рідини піни, що горить, яка може переливатися через борт резервуару, розповсюджуючи горіння на сусідні ділянки.

Якщо в резервуарі з нафтою вода знаходиться в стані емульсії, то в початковий період горіння вода більш або менш рівномірно буде розподілена в товщі ГР. При нагріванні внаслідок зменшення в'язкості верхнього шару нафти краплі води опускаються в глибину рідини і поступово накопичуються там, де в'язкість нафти порівняно велика. При цьому краплі води нагріваються і при досягненні певної температури закипають. Частки води перетворюються в пару, пухирці якого, рухаючись вгору, обгортаються плівкою нафтопродукту. ГР при цьому сильно піниться, переливається через борт резервуара, тобто відбувається її скипання (точніше скипання води, що міститься в нафті).

Явище скипання характерне для в'язких горючих рідин з високою температурою кипіння. Скипання можливе тільки при певному вмісті вологи в нафтопродукті (для нафти - вище за 3,8%, для мазуту - вище за 0,6%). Крім того, скипання може бути результатом невмілого гасіння пожежі, коли водна емульсія утворюється із води, що попадає з водопінними засобами гасіння.

Скипання виникає набагато раніше за викид, коли ще немає яких-небудь певних даних, що дають можливість точно передбачити момент настання скипання. Скипання залежить від сорту і вологості нафти, висоти вільного борту і т. д. Досліди показують, що нафта, яка містить 1% води, скипає через 45 - 60 хв. від початку горіння. Якщо при цьому рівень нафти в резервуарі високий, скипання з переливанням нафти через борт може періодично повторюватися.

Основною ознакою початку скипання є збільшення розмірів факелу полум'я. У деяких випадках перед початком скипання виникає сильний шиплячий шум. Необхідно також мати на

увазі, що скипання може початися при подачі на поверхню рідини, що горить, води або піни. У зв'язку з тим, що ефективних заходів попередження скипання поки немає, велике значення набуває оперативність при гасінні нафти, в резервуарах.

Висновок: Визначення часу до можливого викиду, вибір безпечної відстані від резервуара, що горить, місце, де потрібне додаткове охолодження конструкцій, дозволяє правильно організувати бойову роботу по рятуванню людей і гасінню пожеж. При розробці оперативних планів пожежегасіння необхідно враховувати можливість впливу їх на особовий склад і планувати заходи для запобігання загибелі і травматизму.

Глава 3. Особливості розвитку пожежі класу С

Проблема вибухонебезпеки на підприємствах є дуже важливою, актуальність якої весь час зростає. Ви знаєте про тяжкі наслідки численних аварій в шахтах, де пожежі починалися з вибуху метано-повітряної суміші. Пожежі, що відбуваються на газонафтових родовищах і відкритих технологічних установках з горючими газами, також наносять значного матеріального і соціального збитку.

Пожежі класу С можуть виникнути при аваріях на хімічних підприємствах, які застосовують, зберігають чи виробляють горючі гази, на газопроводах, на підприємствах по видобутку природних газів (газових родовищах).

Як показує практика, першими в боротьбу з наслідками аварій вступають пожежники. Тому при розробці оперативних планів пожежегасіння, складанні планів ліквідації аварій і їх наслідків спеціалістам пожежної охорони дуже важливо заздалегідь знати яка обстановка буде складатися та супроводжувати розвиток пожежі.

При пожежах класу С на особовий склад впливають небезпечні фактори пожежі, до яких відносяться:

- відкритий вогонь;
 - небезпечні фактори вибуху, такі як:
 - ударна хвиля;
 - осколки зруйнованого технологічного обладнання і частин будівель;
 - теплове випромінювання від факелу полум'я;
 - тривалий вплив низькочастотних коливань великої потужності;
 - випадання газового конденсату і горючих рідин з газо-нафтогазового фонтану;
 - токсичні продукти, що утворилися при горінні або виділилися з пошкодженого обладнання.
- Розглянемо докладніше при яких умовах можуть виникнути ці явища.

§ 1. Закономірності розвитку пожеж технологічних установок з горючими газами.

Технологічні установки по переробці газу можуть містити як природні газові суміші, так і індивідуальні гази. Ємності, в яких зберігається горючий газ, можуть бути об'ємом від 1000 до 200 000 м³. У резервуарах для зберігання газу в скрапленому виді може міститися від 160 до 3200 м³ газу. У технологічних установках в залежно від їх призначення може міститися до 60 тонн парогазової суміші. Дуже небезпечними з точки зору виникнення вибуху є газгольдери. Більшість вибухів і пожеж в газгольдерах відбувається при проведенні ремонтних робіт та в періоди пуску.

Аналіз аварій, які відбулися на підприємствах, що використовують горючі гази, показує, що вони мають ряд загальних закономірностей розвитку. Загальна схема розвитку аварійної ситуації така:

1. Відбувається первинний вихід (викид або витікання) горючих газів із закритого обладнання;
2. Утворюється газоповітряна хмара;
3. Відбувається запалення і вибух газової хмари;

4. Відбувається руйнування технологічного обладнання і будівель в зоні підвищеного тиску;
5. У місцях руйнування виникають нові осередки вибухів і крупних пожеж.

Розвиток аварійної ситуації по даній схемі приводить до ланцюгового розвитку пожежі на підприємствах.

Основну небезпеку представляє утворення зони загазованості навколо резервуарів, газгольдерів і технологічних установок з горючими газами. Межа зони загазованості, в якій може статися запалення із вибухом, визначається областю концентрацій, що перевищують значення нижньої концентраційної межі поширення полум'я.

При відсутності вітру горизонтальний розмір зони загазованості можна розрахувати по формулі:

$$R_{\text{заг}} = 14,563 \left(\frac{m_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}} \Phi_{\text{н}}} \right)^{0,33} \approx 14,6 \sqrt[3]{\frac{m_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}} \Phi_{\text{н}}}},$$

де $m_{\text{г}}$ - маса горючого газу, що надійшов у відкритий простір при аварійній ситуації, кг; $\rho_{\text{г}}$ - густина горючого газу за розрахункової температури і тиску, кг/м³; $\Phi_{\text{н}}$ - нижня концентраційна межа поширення полум'я для горючого газу, %.

При запаленні газової хмари, частина в якій утворилася горюча суміш з концентраціями від нижнього до верхньої межі поширення полум'я згорає в кінетичному (вибуховому) режимі. Всередині зони концентрація газів може перевищувати верхню концентраційну межу поширення полум'я і дана частина газової хмари буде вигоряти на периферії в дифузійному режимі. При цьому утвориться вогненна сфера, яка через різницю густини підіймається вгору.

У зоні впливу вогненної сфери відбувається практично миттєве згорання більшості тканих матеріалів, шкіри людини. Тепловий вплив у вогненній сфері викликає летальні наслідки.

Діаметр вогненної сфери можна визначити виходячи із приведеної маси горючої речовини, що бере участь у вибуху по формулі

$$R_{\text{ВС}} = 1,93 W_{\text{ТНТ}}^{0,33} \approx 1,93 \sqrt[3]{W_{\text{ТНТ}}}$$

де $R_{\text{ВС}}$ - радіус вогненної сфери із температурою рівною температурі вибуху, м;

$W_{\text{ТНТ}}$ - тротиловий еквівалент вибуху пари газової середи, кг.

Тротиловий еквівалент для парів газових середовищ розраховується як:

$$R_{\text{ВС}}^{\text{фак}} = \frac{R_{\text{ВС}}}{\left(\frac{T_{\text{гор}}}{T_{\text{ад}}} \right)^{0,33}} = R_{\text{ВС}} \sqrt[3]{\frac{3600}{T_{\text{гор}}}},$$

$$\tau_{\text{ВС}}^{\text{фак}} = \frac{\tau_{\text{ВС}}}{\left(\frac{T_{\text{гор}}}{T_{\text{ад}}} \right)^{3,33}} = \tau_{\text{ВС}} \left(\frac{3600}{T_{\text{гор}}} \right)^{3,33},$$

де $Q'_{\text{н}}$ - масова теплота згорання речовини, кДж/кг;

$m_{\text{пр}}$ - маса речовини, що бере участь у вибуху, кг;

$Q_{\text{ТНТ}}$ - питома енергія вибуху тринітротолуолу (ТНТ), приймається рівною 46 000 кДж/кг.

При вибуху пари та газової суміші безпосередньо в процесі горіння бере участь не вся маса горючої речовини, а лише її частка. З цієї причини при розрахунку тротилового еквівалента враховується маса пар і газів, що беруть участь у вибуху. Її визначають з розрахунку:

$$m_{\text{пр}} = m \cdot Z,$$

де m - маса речовини, що вийшла за період аварії і утворила вибухонебезпечну суміш, кг;

Z - коефіцієнт участі парів і газів у вибуху, який приймається в залежності від умов вибуху

в незамкненому просторі $Z = 0,1$
в замкненому просторі:
для водню $Z = 1$
для інших горючих газів $Z = 0,5$
для парів ЛЗР і ГР $Z = 0,3$

Час життя вогненної сфери і її теплового впливу на особовий склад визначається по формулі

$$\tau_{BC} = 4,6 \cdot 3 \sqrt[3]{\frac{W_{ТНГ}}{T_{гор}}}, \text{ с}$$

Температура при вибуху газоповітряної суміші досягає максимальних значень і може бути визначена як адиабатична температура горіння речовини при постійному об'ємі. Розрахункове значення температури вибуху більшості вуглеводнів можна приймати 3600 К, але реальна температура горіння у фронті полум'я значно нижча, тому дійсний радіус вогненної сфери, і час її життя визначається по формулі:

$$R_{BC}^{фак} = \frac{R_{BC}}{\left(\frac{T_{гор}}{T_{ад}}\right)^{0,33}} = R_{BC} \sqrt[3]{\frac{3600}{T_{гор}}},$$

$$\tau_{BC}^{фак} = \frac{\tau_{BC}}{\left(\frac{T_{гор}}{T_{ад}}\right)^{3,33}} = \tau_{BC} \left(\frac{3600}{T_{гор}}\right)^{3,33},$$

де $T_{ад}$ - адиабатична температура горіння при постійному об'ємі, К;

$T_{гор}$ - практична температура горіння речовини, К.

Якщо врахувати, що практична температура горіння більшості вуглеводневих газів не перевищує 1367 К, то можна записати

$$R_{BC}^{фак} \approx 1,38 R_{BC},$$

$$\tau_{BC}^{фак} \approx 7,57 \tau_{BC},$$

Висоту підйому вогненної сфери можна визначити як

$$H_{BC} = R_{BC}^{фак},$$

Одним з факторів, що обумовлює поширення пожежі і ураження людей, є теплове випромінювання вогненної сфери при вибухах. Опіки відкритих ділянок шкіри виникають при тепловому потоку більше за $q_{min} = 1,4 \text{ кВт/м}^2$. При цьому відстань, на якій людина може отримати опіки шкіри, визначається за формулою:

$$R_{без} = \frac{95 * W_{ТНГ}^{0,33}}{T_{гор}^{0,33}} = 95 \sqrt[3]{\frac{W_{ТНГ}}{T_{гор}}},$$

де $T_{гор}$ - практична температура горіння речовини, К.

Опіки сітківки очей можуть відбуватися на відстані

$$R_{без} = 144 \sqrt[3]{\frac{W_{ТНГ}}{T_{гор}}}.$$

На практиці вибухи відбуваються при запаленні газової або пароповітряної суміші. Вибухи пари і газів супроводжуються підвищеним тиском. Надлишковий тиск, що виникає при цьому в ударній хвилі, може приводити до руйнування будівель і технологічних установок, травм і загибелі людей.

До травм і загибелі можуть приводити і повторні наслідки вибухів, такі як уламки скла, частин апаратів, що розлітаються, та інше. Можливе руйнування при вибуху можна оцінити за надлишковим тиском вибуху ΔP і відповідним йому значенням коефіцієнту ψ .

Для людей ураження від ударної хвилі можна оцінити за наступним даними:

- летальні наслідки від розриву легень $\Delta P = 70$ кПа, $\psi = 3,54$; - розрив барабанних перетинків $\Delta P = 35$ кПа, $\psi = 4,91$; - легкі травми і контузії $\Delta P = 12$ кПа, $\psi = 9,79$;

Для будівель і споруд дію ударної хвилі можна оцінити як:

- повне руйнування будівель і споруд $\Delta P = 50$ кПа, $\psi = 4,09$; - сильне руйнування і пожежі $\Delta P = 30$ кПа, $\psi = 5,36$; - середнє руйнування і можливі пожежі $\Delta P = 20$ кПа, $\psi = 6,89$; - слабке руйнування будівель, можливі окремі пожежі $\Delta P = 10$ кПа, $\psi = 11,16$; - граничне значення надлишкового тиску $\Delta P = 5$ кПа, $\psi = 18,49$ - руйнування віконного скла $\Delta P = 2$ кПа, $\psi = 34$;

Можливе руйнування на відстані від епіцентру можна визначити залежно від надлишкового тиску. Радіус зони руйнування можна розрахувати по формулі:

$$R_r = \Psi \sqrt[3]{W_{\text{ТНТ}}}$$

де $W_{\text{ТНТ}}$ - тротиловий еквівалент, кг; ψ - коефіцієнт, що враховує значення надлишкового тиску при вибуху.

Визначити коефіцієнт ψ можна по формулі

$$\Psi = \frac{88,61 + 1,82 * \Delta P}{1 + 1,86 * \Delta P}$$

Величину надлишкового тиску на будь-якій відстані від геометричного центру вибуху, що розвивається при згорянні газо- та пароповітряної суміші, визначають по формулі

$$\Delta P = P_0 \left(0,8 \frac{W_{\text{ТНТ}}^{0,33}}{r} + 3 \frac{W_{\text{ТНТ}}^{0,66}}{r^2} + 5 \frac{W_{\text{ТНТ}}}{r^5} \right), \text{ кПа}$$

де P_0 - атмосферний тиск, кПа; r - відстань від геометричного центра газоповітряної хмари, м;

$W_{\text{ТНТ}}$ - тротиловий еквівалент, кг.

§ 2. Особливості горіння газових фонтанів.

Горіння газових фонтанів – це характерний приклад дифузійного горіння газів. На практиці розрізняють:

- газові фонтани - вміст в продукті, що виходить, не менше за 95% газу; - газонафтові фонтани - вміст газу більше за 50% і нафти до 50 %; - нафтові фонтани - вміст нафти більше за 50 %.

Пожежі на газових і газонафтових фонтанах відрізняються від нафтових тим, що продукт, який виходить, встигає згоріти в повітрі, а при горінні нафтових фонтанів вигоріти встигають тільки попутний газ і легкі фракції нафти, а все інше випадає навколо свердловини і продовжує горіти і розтікатися по поверхні.

Природні гази із газових родовищ які характеризуються низьким вмістом важких вуглеводнів умовно називають сухі гази. Гази із газоконденсатних родовищ складаються із суміші сухих газів,

пропан-бутанової фракції, ароматичних вуглеводнів, газового бензину і дизельного пального. Нафтові гази більш багаті важкими фракціями. Вміст сухих газів в попутному газі невеликий, а основну частину складають пропан-бутанова фракція, ароматичні вуглеводні, фракції газового бензину і дизельного пального. Крім перелічених компонентів до складу природного газу може входити водень, сірководень, оксид вуглецю, азот і деякі інші гази.

Аварії на нафтогазових промислах можуть супроводжуватися повним обривом фонтанного обладнання над поверхнею або нижче за рівень ґрунту. Явище виходу газу або нафти безпосередньо з ґрунту називається грифоном.

Фонтан може бути як вертикальним і похилим. При відкритому фонтануванні внаслідок зриву обладнання факел звичайно буває компактним, а при виході через фланці - розпиленим.

При розпиленому факелі фронт полум'я має розвинену поверхню, що приводить до збільшення поверхні випромінювання.

При викиді нафти і газу із свердловини продукт виходить зі швидкістю близькою до швидкості звуку. При таких швидкостях потоки, що виходять, перемішуються, і закінчення має чітко виражений турбулентний режим рушення. Фонтан, що горить, по його висоті умовно можна розділити на наступні зони:

1. Зона відриву полум'я, частина фонтану безпосередньо від гирла до видимого горіння факела вона залежить від $T_{гор}$ тиску і може досягати від половини до трьох метрів.

2. Зона запалення, в якій відбувається запалення і горіння фонтану. У цій зоні газ і нафта повністю згоряє, оскільки повітря ще може проникнути в зону горіння.

3. Зона догорання, яка розповсюджується від верху зони запалення до верху зони горіння.

При тривалій пожежі, коли відбувається вигорання прокладок в вентилях або деформація самої арматури, фонтан може змінювати свою форму ставати похилим, або розпиленим.

Висота факела газонафтового фонтану перевищує висоту газового, оскільки меншає ступінь розпилення потоку газу, а нафтові фонтани можуть мати меншу висоту через високу густину продукту.

Висота компактного газового фонтану залежить від витрати газу або дебіту свердловини. Збільшення дебіту свердловини приводить до збільшення висоти фонтану. Висота факелу газового фонтану визначається емпіричною залежністю:

$$H_{\phi} = 23g_{\phi}^{0,4},$$

де g_{ϕ} - витрата або дебіт газу, млн. м³ /добу;

Для спрощення розрахунків можна використати більш просту формулу:

$$H_{\phi} = 20\sqrt{g_{\phi}}$$

Цей зв'язок може бути використаний для орієнтовного визначення дебіту по висоті факела газового фонтану. Витрату компактного газового фонтану можна оцінити по висоті газового фонтану виразом:

$$g_{\phi} = 0,0025H_{\phi}^2,$$

Основну небезпеку при горінні фонтану представляє теплове випромінювання факелу.

Методика визначення безпечних відстаней від газових фонтанів

Для спрощення приблизних розрахунків безпечних відстаней факел умовно приймають як крапкове джерело енергії. Тоді густину теплового потоку, що передається випромінюванням від факелу, можна визначити як:

$$q_{гр} = \frac{f \cdot Q_{пож}}{4 \cdot \pi \cdot R^2}$$

де $Q_{пож}$ - кількість тепла, що виділяється у факелі полум'я, кДж/с;
 R - відстань від центра факела до точки, що розглядається на поверхні землі, м.

Речовина	Коефіцієнт випромінювання факела
Мета	0,2
Пропан	0,33
Вуглеводні	0,4

f - коефіцієнт випромінювання факела, що залежить від молярної маси вуглеводу і визначається за формулою:

$$f = 0,05 \sqrt{M},$$

де M - молярна маса вуглеводу, кг/кмоль.

Кількість енергії, що виділяється при згорянні газу в фонтані, можна визначити як:

$$Q_{пож} = \eta \cdot Q_{н}'' \cdot g_{ф},$$

де η - питомий коефіцієнт хімічної повноти згорання;

$Q_{н}''$ - нижча об'ємна теплота згорання вуглеводу, кДж/м³;

$g_{ф}$ - витрата (дебіт) газового фонтану, м³/с.

Якщо дебіт газового фонтану даний в мільйонах метрів кубічних за добу, то теплоту пожежі можна записати:

$$Q_{пож} = 11,57 \cdot \eta \cdot Q_{н}'' \cdot g_{ф}$$

де $g_{ф}$ - дебіт свердловини в млн. м³ / добу.

Знаючи критичну густину теплового потоку для особового складу і пожежної техніки, можна розрахувати граничну відстань від центра факела за формулою:

$$R = \sqrt{\frac{f \cdot Q_{пож}}{4 \pi \cdot q_{кр}}},$$

де $q_{кр}$ - критична густина теплового потоку для матеріалу, кВт/м².

Безпечну відстань можна визначити з урахуванням висоти газового фонтану за формулою:

$$L_{без} = \sqrt{R^2 - \left(h + \frac{H_{ф}}{2} \right)^2}.$$

де h - відстань від поверхні землі до нижнього краю зони запалення фонтану, м.

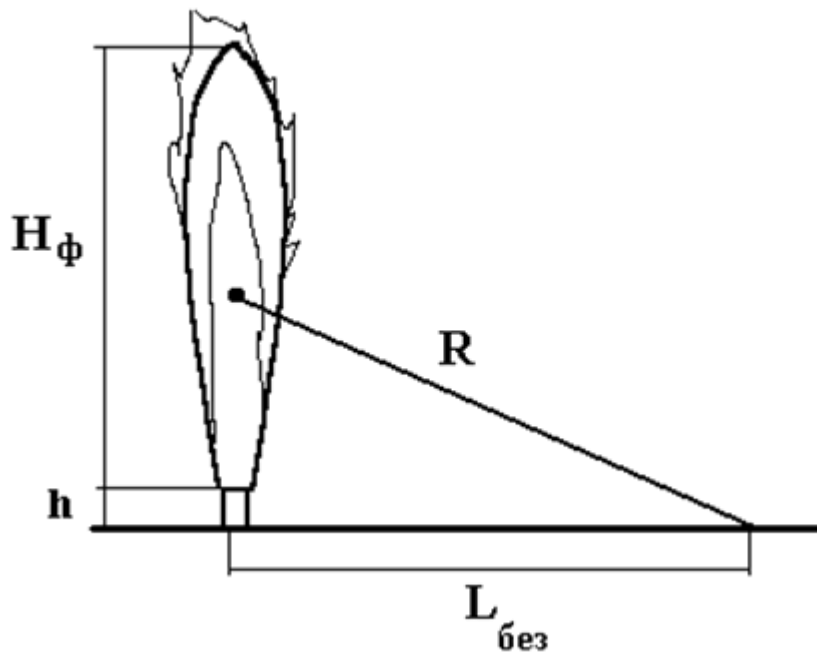


Схема для визначення безпечної відстані від газового фонтану.

Визначення безпечної відстані від свердловини до місця розташування особового складу і пожежної техніки при гасінні дозволяє правильно організувати бойову роботу по рятуванню людей і гасінню пожежі.

Крім випромінювання, небезпечним фактором при пожежах гаонафтових фонтанів є вплив низькочастотних коливань великої потужності.

Таким чином, при пожежах класу С на особовий склад впливають такі небезпечні фактори пожежі, як:

- відкритий вогонь; - небезпечні фактори вибуху, такі як ударна хвиля та осколки зруйнованого технологічного обладнання і частин будівель; - теплове випромінювання від факелу полум'я; - тривалий вплив низькочастотних коливань великої потужності; - випадання газового конденсату і горючих рідин з газо-нафтогазового фонтану; - токсичні продукти, що утворилися при горінні або виділилися з пошкодженого обладнання.

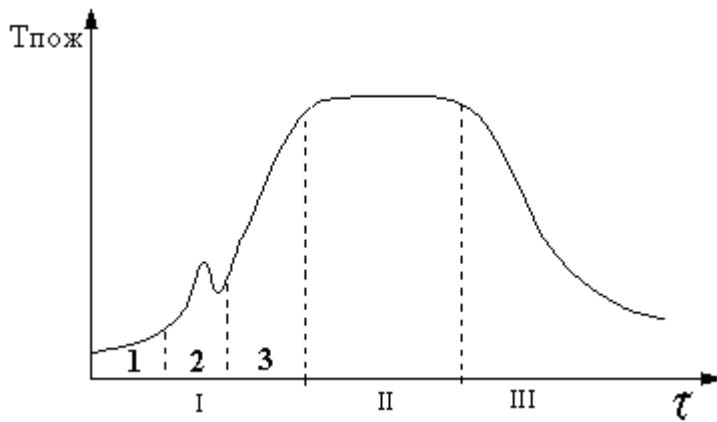
Глава 4. Загальні закономірності розвитку пожежі в огорожі.

§ 1. Динаміка розвитку пожежі в огорожі.

Під розвитком пожежі розуміють зміну основних параметрів пожежі в часі та просторі. Найголовнішими параметрами пожежі в приміщенні, які змінюються з часом, є площа пожежі, температура пожежі, інтенсивність задимлення на пожежі. Ці параметри можна не тільки виміряти, але і спрогнозувати їх зміну за допомогою розрахунків.

Розглянемо як змінюються параметри пожежі в часі та просторі з моменту виникнення загоряння до виходу на стаціонарний режим вільного розвитку пожежі (тобто без гасіння) в приміщенні звичайного типу. Середньостатистичне приміщення звичайного типу має в якості пожежного завантаження тверді горючі матеріали (деревина або вироби із деревини), які рівномірно розподілені по поверхні підлоги, початкова температура в приміщенні становить 20°C, висота стелі від 3 до 6 м, площа підлоги 30–40 м², площа отворів приблизно 10% площі підлоги.

Як було сказано раніше, розвиток будь-якої пожежі в часі можна умовно поділити на три стадії: початкову, основну і кінцеву.



На першій стадії можна виділити три фази. Перша фаза – перехід загоряння в пожежу. Більшість пожеж, пов'язаних із горінням ТГМ, починається з виникнення горіння при дії джерела запалювання на невеликій ділянці. Після цього горіння повільно поширюються по поверхні горючого матеріалу. При збільшенні площі горіння інтенсивніше прогриваються та розкладаються матеріали, збільшується інтенсивність конвекційних потоків повітря та продуктів горіння, поступово зростає середньооб'ємна температура. Тривалість початкової фази залежить від місця виникнення загоряння, розташування пожежного навантаження, розмірів приміщення, виду горючого матеріалу, умов газообміну. Як правило, перехід загоряння в пожежу триває перші 3-5 хвилин.

Після цього починається друга фаза – об'ємний розвиток пожежі. Поступово збільшується температура газового середовища в приміщенні, а отже збільшується інтенсивність процесу попереднього прогріву, розкладення та виділення горючих летючих продуктів, які обумовлюють збільшення об'єму зони горіння. Швидкість поширення пожежі, а, отже, і площа пожежі теж збільшуються, що, в свою чергу, приводить до зростання температури пожежі (до 250-300°C). Полум'я заповнює практично весь об'єм приміщення, а процес поширення полум'я відбувається вже не по поверхні ТГМ, а під впливом конвекційних та променистих потоків тепла займаються матеріали, які знаходяться окремо від зони горіння, тобто поширення відбувається дистанційно.

Приблизно через 10 хвилин при температурі 300°C руйнується скло. Починається третя фаза розвитку, коли всі параметри пожежі найбільш змінюються і досягають максимальних значень. Гарячі продукти горіння витікають з приміщення, продукти розкладання можуть виходити за межі приміщення і там догоряти (вогонь виривається із отворів назовні). Стрибокподібно змінюється інтенсивність газообміну. Під інтенсивністю газообміну розуміють кількість повітря, що поступає в одиницю часу до одиниці площі пожежі. Холодне повітря інтенсивніше поступає в зону горіння. При цьому температура в приміщенні може на короткий час знизитися, але за рахунок збільшення повноти згоряння, лінійної швидкості поширення пожежі та швидкості вигорання пожежного навантаження теплота пожежі різко збільшується, і температура газового середовища в приміщенні (температура пожежі) підвищується до 600-800°C. Задимлення досягає максимального значення.

Після 20-30 хвилин розвитку залежно від розмірів приміщення починається друга стадія – розвинена пожежа, коли всі параметри пожежі стабілізуються. Ця фаза може тривати ще 20-30 хвилин в залежно від пожежного навантаження.

Третя стадія пожежі, догорання, характеризується поступовим зниженням температури та задимлення, так як основна частина горючих матеріалів вже вигоріла.

На поверхні деревини утворюється вуглецевий шар товщиною 5-10 мм, який перешкоджає подальшому прогріванню матеріалу в глибину і виходу летючих горючих компонентів термічного розкладання. Інтенсивність надходження горючих газів в зону горіння зменшується, зменшується інтенсивність гомогенного горіння. Це призводить до зміни всіх інших параметрів розвитку пожежі.

В приміщенні накопичується велика кількість продуктів горіння, а концентрація кисню знижується до 16-17%. Гомогенне горіння переходить в тління. Площа пожежі при цьому не змінюється, але площа горіння скорочується.

Зміну основних параметрів пожежі з часом розвитку пожежі можна представити у вигляді графіків

Як правило гасіння пожежі особовим складом починається через 20-30 хвилин вільного розвитку, коли всі параметри пожежі вже досягли свого максимального значення. Отже при проведенні бойових дій необхідно враховувати той факт, що на будівельні конструкції вже певний час впливають високі температури, що зменшує їх несучу здатність.

Так, в 1990 році при пожежі на Сирдар'їнській та Екібастузській електростанціях вже через 30 хвилин після виникнення пожежі обрушився дах в машинному залі на площі більше 10000 та 17000 м².

Для зниження пожежної небезпеки більшості промислових об'єктів необхідно оснащати приміщення автоматичними системами пожежної сигналізації та гасіння пожежі, які включаються на перших фазах розвитку пожежі, і здатні якщо і не повністю загасити пожежу, то не дають розвинутися пожежі до її максимального розвитку.

Для уніфікації методики визначення вогнестійкості будівельних конструкцій на підставі проведення натурних дослідів пожеж у житлових і промислових будинках була запропонована залежність температури пожежі від часу його розвитку

$$t = 345 \lg (8\tau + 1)$$

де τ - час розвитку пожежі понад 10 хвилин.

Такий температурний режим називається - стандартним режимом. Стандартний температурний режим відбиває тільки експериментальні дані і тільки за умови, що пожежа розвивається як необмежена.

.

§ 2. Фактори, що впливають на температурний режим пожежі.

Температура пожежі в огорожі залежить від багатьох факторів. У загальному випадку температура пожежі в огорожі є функцією:

- об'єму приміщення; - часу розвитку горіння; - площі пожежі; - кількості пожежного навантаження; - виду горючої речовини (теплоти згоряння речовини, масової швидкості вигорання речовини, швидкості поширення горіння); - інтенсивність газообміну; - тепловтрат на нагрівання конструкцій, - теплоємності і температури повітря, що надходить в приміщення і т.д.

Динаміку розвитку пожежі визначає тепловиділення, що супроводжує процес горіння, тобто теплота пожежі.

теплота пожежі – це кількість тепла, що виділяється в зоні горіння за одиницю часу.

$$Q_{\text{пож}} = \eta \cdot v_m \cdot S_{\text{пож}} \cdot Q_n'$$

де: η - коефіцієнт повноти згоряння, який в свою чергу залежить від умов газообміну;

v_m - масова швидкість вигорання (кг/(м²·хв));

$S_{\text{пож}}$ - площа пожежі, м² ;

Q_n' - теплота згоряння, кДж/кг.

Масова швидкість вигорання та площа пожежі, яка визначається лінійною швидкістю поширення, залежать від часу розвитку пожежі, температури та інтенсивності газообміну. Приведені швидкості вигорання та поширення можна представити у вигляді:

$$v_m = (a_1 T_n + b_1 I_r) v_m^0$$

$$v_l = (a_2 T_n + b_2 I_r) v_l^0$$

де a_1, a_2, b_1, b_2 – емпіричні коефіцієнти, числові значення яких визначається дослідним шляхом для кожного горючого матеріалу; T_n – середнє значення температури пожежі; I_r – інтенсивність газообміну; v_m^0, v_l^0 – масова та лінійна швидкості горіння даного горючого матеріалу, які визначені за стандартних умов.

Таким чином, кількість тепла, що виділяється на пожежі, а, отже і температура пожежі істотно залежать від організації вентиляції між приміщенням і зовнішнім середовищем. Зв'язок між температурою пожежі і інтенсивністю газообміну дуже складний і залежить від конкретних властивостей речовини, що горить, та особливостей приміщення, де відбувається пожежа.

Якщо повітрообмін у приміщення не обмежений, то інтенсивність горіння збільшується, зростає температура в зоні реакції горіння. З іншого боку, це повітря має достатньо низьку температуру, тому температура пожежі буде падати. Який саме з цих двох факторів буде найбільше суттєвим, залежить від конкретної ситуації.

Треба враховувати, що продукти неповного згоряння утворюються незалежно від коефіцієнта надлишку повітря (у верхній частині дифузійного полум'я горіння завжди відбувається при нестачі кисню).

Коефіцієнт надлишку повітря можна визначити розрахунком з умови, що

$$\alpha_{\text{п}} = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{п}}^{\circ}}$$

де $G_{\text{п}}$ - фактична витрата повітря, м³/хв.; $G_{\text{п}}^{\circ}$ - теоретично необхідна витрата повітря, м³/хв.;

Теоретично необхідна витрата повітря визначається як

$$G_{\text{п}}^{\circ} = \eta S_{\text{пож}} v_{\text{м}} v_{\text{п}}^{\circ} \rho_{\text{п}}$$

де $S_{\text{пож}}$ - площа горіння, м²; $v_{\text{м}}$ - масова швидкість вигорання, кг/(м² хв.); $v_{\text{п}}^{\circ}$ - питомий об'єм повітря на згоряння кг речовини, м³/кг; $\rho_{\text{п}}$ - густина повітря, кг/м³.

Фактична витрата повітря визначається як

$$G_{\text{п}} = \mu \omega_{\text{п}} S_{\text{прит}} \rho_{\text{п}}$$

де μ - коефіцієнт опору отвору; $\omega_{\text{п}}$ - швидкість руху повітряного потоку, м/хв.; $S_{\text{прит}}$ - площа приточного отвору, м².

Виходячи із розглянутих умов, коефіцієнт надлишку повітря при пожежі в огорожі визначається як

$$\alpha_{\text{п}} = \frac{\mu * \omega * S_{\text{прит}}}{\eta * v_{\text{м}} * S_{\text{пож}} * v_{\text{п}}}$$

Пожежі в огорожі по умовам їх розвитку можна умовно поділити на:

1. Пожежі, що регулюються пожежним навантаженням, (ПРН) - параметри горіння визначаються кількістю та типом пожежного завантаження, для повного згоряння якого окислювача достатньо;

2. Пожежі, що регулюються вентиляцією, (ПРВ) - параметри горіння визначаються інтенсивністю газообміну, оскільки окислювача не вистачає для повного згоряння пожежного навантаження.

Якщо умови газообміну такі, що пожежу можна віднести до ПРН, то температура пожежі майже така, як при пожежі на відкритому просторі. Збільшення відношення $S_{\text{прит}}/S_{\text{пож}}$ веде до збільшення швидкості росту температури та її значення. При зменшенні відношення $S_{\text{прит}}/S_{\text{пож}}$ температура пожежі дещо падає, але різко підвищується тривалість пожежі.

Критерієм, за яким можна визначити тип пожежі, є кратність газообміну. Кратність газообміну n – відношення кількості повітря, що теоретично необхідне для повного згоряння пожежного навантаження в приміщенні, до кількості повітря, що надходить в дане приміщення.

$$n = V_n^0 / V_n$$

Якщо $n \leq 15$, в приміщенні можлива ПРН, при $n \geq 20$ – ПРВ. Якщо n потрапляє в проміжок між 15 і 20, в приміщенні буде розвиватися перехідний режим пожежі.

§ 3. Критичний час розвитку пожежі в огорожі.

При пожежі в огорожі тепло і масообмін обмежені огорожуючими конструкціями, тепло і дим накопичуються в приміщенні, а тому зона теплового впливу і зона задимлення змінюються. Зона задимлення характеризується зниженим вмістом кисню та підвищеним вмістом токсичних речовин, а зона теплового впливу характеризується критичною температурою, при якій відбуваються фізичні зміни матеріалу. Отже з розвитком пожежі настане момент часу, коли все приміщення буде охоплено цими зонами і перебування в них людей буде неможливе. Такий час називають критичним часом розвитку пожежі.

Критичний час розвитку пожежі – час від виникнення горіння до настання теплового удару або зниження концентрації кисню нижче гранично припустимих значень. Критичний час розвитку є функцією об'єму приміщення, площі пожежі, теплоти згорання, масової швидкості вигорання.

Час настання критичного стану по температурі може бути розраховано виходячи із рівняння теплового балансу. Частина загального тепла, що виділилося при пожежі, витрачається на нагрівання стін приміщення за рахунок променистої теплопередачі $Q_{\text{пром}}$. Інша частина $Q_{\text{підг. проц.}}$ витрачається на підготовчі процеси, що протікають в горючій речовині при її підготовці до горіння (попередній нагрів, розкладання, випаровування). Частина тепла $Q_{\text{кон}}$, витрачається на нагрівання холодного повітря, що надходить у зону горіння, і на нагрівання продуктів горіння. Сума цих трьох складових дорівнює загальній кількості тепла, що виділяється при пожежі.

$$Q_{\text{пож}} = Q_{\text{пром}} + Q_{\text{підг. проц.}} + Q_{\text{кон}}$$

$$Q_{\text{пром}} + Q_{\text{підг. проц.}} \approx kQ_{\text{пож}}$$

k – коефіцієнт тепловтрат, який визначає частку тепла пожежі, що витрачається на нагрівання конструкцій приміщення та самої горючої речовини, і дорівнює:

$$k = \frac{13S_{\text{огор}}}{Q_{\text{н}}' v_{\text{м}} S_{\text{пож}}}$$

Тоді тепловий баланс можна переписати:

$$Q_{\text{пож}} = Q_{\text{кон}} + kQ_{\text{пож}}$$

$$(1-k)Q_{\text{пож}} = Q_{\text{кон}}$$

$$Q_{\text{пож}} = \tau_{\text{пож}} \cdot \eta \cdot v_{\text{м}} \cdot S_{\text{пож}} \cdot Q_{\text{н}}'$$

$$Q_{\text{кон}} = V_{\text{прим}} C_p (T_{\text{пож}} - T_0)$$

$$(1-k) \eta Q_{\text{н}}' S_{\text{пож}} v_{\text{м}} \tau_{\text{пож}} = V_{\text{прим}} C_p (T_{\text{пож}} - T_0)$$

Якщо площа пожежі практично стала (при горінні рідин), то розрахунок критичного часу до досягнення критичної температури в приміщенні проводиться по формулі

$$\tau_{\text{кр}}^t = \frac{V_{\text{прим}} C_p (t_{\text{кр}} - t_0)}{(1-k) \eta Q_{\text{н}}' S_{\text{пож}} v_{\text{м}}} = 1,27 \frac{V_{\text{прим}} C_p (t_{\text{кр}} - t_0)}{\eta Q_{\text{н}}' S_{\text{пож}} v_{\text{м}}}$$

Якщо прийняти $k = 0.21$, $C_p = 1,29$ кДж/(кг·К), $t_{\text{кр}} = 70^\circ\text{C}$, а $t_0 = 20^\circ\text{C}$, то можна записати:

$$\tau_{\text{кр}}^t = 81,9 \frac{V_{\text{прим}}}{\eta Q_{\text{н}}' S_{\text{пож}} v_{\text{м}}}$$

Для приміщень, в яких горять тверді горючі матеріали, площа пожежі з часом розвитку збільшується і визначається радіусом розвитку пожежі, який, в свою чергу, залежить від квадрату лінійної швидкості поширення горіння та квадрату часу розвитку пожежі. Отже, з урахуванням цієї залежності критичний час перебування людей визначається як:

форма розвитку пожежі – кругова (осередок пожежі в центрі приміщення)

$$\tau_{кр}^t = 3 \sqrt{\frac{V_{прим} C_p (t_{кр} - t_0)}{\pi (1 - k) \eta Q'_н v_m v_l^2}} = 2.973 \sqrt{\frac{V_{прим}}{\eta Q'_н v_m v_l^2}}$$

форма розвитку пожежі – півколо (осередок пожежі біля стіни)

$$\tau_{кр}^{02} = 3 \sqrt{\frac{0,33 * 2 * V_{прим}}{\eta \pi v_l^2 v_m v_{п}^0}} = 0.5953 \sqrt{\frac{V_{прим}}{\eta v_l^2 v_m v_{п}^0}}$$

форма розвитку пожежі – чверть кола (осередок пожежі в куті приміщення)

$$\tau_{кр}^{02} = 3 \sqrt{\frac{0,33 * 4 * V_{прим}}{\eta \pi v_l^2 v_m v_{п}^0}} = 0.7493 \sqrt{\frac{V_{прим}}{\eta v_l^2 v_m v_{п}^0}}$$

де v_l - лінійна швидкість поширення горіння, м/хв.;

v_m - масова швидкість вигорання;

$Q'_н$ - масова теплота згорання горючого матеріалу;

η - коефіцієнт повноти згорання.

Критичний час розвитку пожежі можна визначити також по зниженню концентрації кисню в повітрі приміщення. При зниженні концентрації кисню в повітрі до 16% відбувається втрата свідомості, при зниженні концентрації нижче 14- 15 % наступають в організмі людини необоротні процеси, і може наступити смерть.

Швидкість зниження концентрації кисню в приміщенні, в якому відбувається пожежа, залежить від об'єму повітря, необхідного для повного згорання одиниці кількості речовини, від площі горіння, масової швидкості вигорання, від об'єму приміщення. Якщо вважати, що нормальна життєдіяльність організму припиниться при вигоранні 21-14 = 7 % кисню, що відповідає 7·4,76 = 33,32 % повітря по об'єму, то умова кисневого балансу для приміщення із пожежею становитиме:

$$0,3332 V_{прим} = v_{п}^0 v_m S_{пож} \eta \tau_{кр}$$

де $V_{прим}$ - повний об'єм приміщення, м³;

$S_{пож}$ - площа горіння, м²;

v_m - масова швидкість вигорання речовини, кг/(м² хв.).

Час до настання критичного стану по кисню для приміщень, в яких горять тверді горючі матеріали, з урахуванням збільшення площі пожежі з часом можна записати:

$$\tau_{кр}^{02} = \frac{0,33 V_{прим}}{\eta S_{пож} v_m v_{п}^0}$$

форма розвитку пожежі – кругова (осередок пожежі в центрі приміщення)

$$\tau_{кр}^{02} = 3 \sqrt{\frac{0,33 * V_{прим}}{\eta \pi v_l^2 v_m v_{п}^0}} = 0.4723 \sqrt{\frac{V_{прим}}{\eta v_l^2 v_m v_{п}^0}}$$

форма розвитку пожежі – півколо (осередок пожежі біля стінки)

$$\tau_{кр}^{02} = 3 \sqrt{\frac{0,33 * 2 * V_{прим}}{\eta \pi v_1^2 v_m v_{п}^0}} = 0.5953 \sqrt{\frac{V_{прим}}{\eta v_1^2 v_m v_{п}^0}}$$

форма розвитку пожежі – чверть кола (осередок пожежі в куті приміщення)

$$\tau_{кр}^{02} = 3 \sqrt{\frac{0,33 * 4 * V_{прим}}{\eta \pi v_1^2 v_m v_{п}^0}} = 0.7493 \sqrt{\frac{V_{прим}}{\eta v_1^2 v_m v_{п}^0}}$$

Звичайно, при зниженні концентрації кисню в повітрі приміщення змінюються і параметри горіння речовини, так що виведені залежності носять умовний вид, але, використовуючи їх можна приблизно визначити нормативний час початку бойових дій по рятуванню людей на пожежі.

Висновок: планувати будівництво пожежних підрозділів на об'єктах і в населених пунктах, проводити навчання командного й особового складу необхідно виходячи з того, що час вільного розвитку пожежі не може бути більше критичного часу для об'єкту, у якому знаходяться люди. При упорядкуванні планів пожежогасіння необхідно проводити попередній аналіз можливої обстановки пожежі.

Глава 5. Основні моделі, що описують температурний режим пожежі в огорожі.

Під температурним режимом пожежі розуміють зміну температури пожежі в часі. За температуру пожежі в огороженні приймають середньооб'ємну температуру газового середовища в приміщенні.

Існує три основні моделі, що описують температурний режим при пожежі в огорожі:

1. Диференційна модель тепло та масообміну пожежі в огорожі;
2. Інтегральна модель розрахунку температури пожежі, що розвилася.
3. Зонна модель розрахунку температури і швидкості наростання температури над крапковим джерелом горіння

Найбільш повною є диференційна модель, в якій енергетичний і матеріальний баланс пожежі представлені у вигляді диференційних рівнянь. Диференційна модель дозволяє визначити температуру пожежі на будь якій стадії розвитку пожежі. Точність отриманих результатів залежить від прийнятих при розрахунках припущень. При достатньо повному охопленні умов тепло та масообміну може бути отриманий досить точний результат. Робота з диференційною моделлю сполучена з використанням складних математичних розрахунків і потужної обчислювальної техніки. і тому на практиці використання диференціальної моделі зустрічається дуже рідко.

Значно частіше для прогнозування температурного режиму при пожежі в огорожі використовують інтегральну або зонну моделі розвитку пожежі.

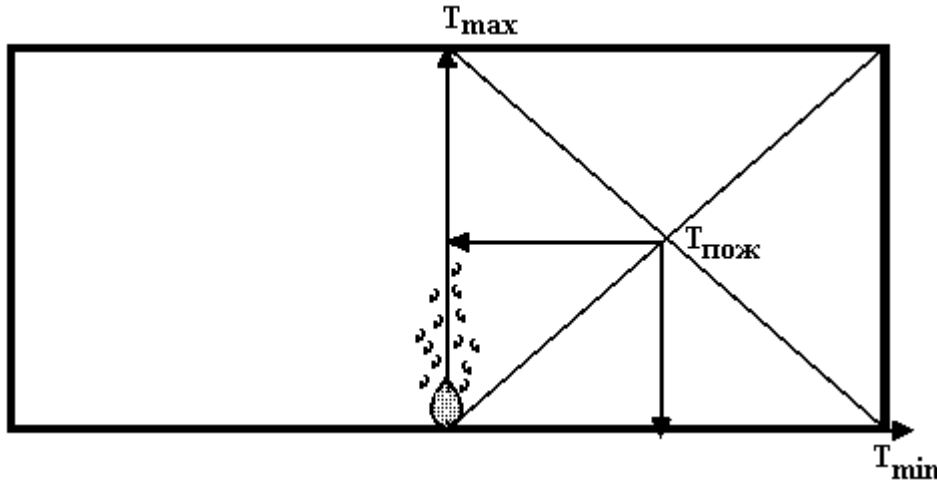
§ 1. Інтегральна модель температурного режиму пожежі в огорожі.

Найбільш простою моделлю температурного режиму пожежі в приміщенні є інтегральна модель, яка припускає, що все тепло пожежі рівномірно розподілено по об'єму приміщення і витрачається на нагрівання газового середовища та будівельних конструкцій. З деякими припущеннями її можна використовувати при розрахунку температурного режиму пожежі в огороженні на будь-який момент його розвитку. На практиці саме інтегральна модель частіше використовується для прогнозування ситуації, що склалась при пожежі в приміщенні.

1.1. Основні положення інтегральної моделі температурного режиму.

Інтегральна модель передбачає, що осередок пожежі знаходиться в центрі підлоги приміщення. При цьому температура лінійно збільшується із підвищенням точки вимірювання, і зменшується при віддаленні від центру. Температура максимальна над осередком пожежі під

перекрыттям і мінімальна в нижній точці, віддаленій від осередку горіння. Середньооб'ємна температура визначається в геометричному центрі приміщення.



Розрахункове визначення температури пожежі ґрунтується на рівнянні теплового балансу пожежі.

При горінні речовин і матеріалів на площі $S_{\text{пож}}$ в одиницю часу виділяється теплота пожежі:

$$Q_{\text{пож}} = \eta \cdot v_m \cdot S_{\text{пож}} \cdot Q_{\text{н}}'$$

де: η - коефіцієнт повноти згоряння;
 $Q_{\text{н}}'$ - теплота згоряння, Дж/кг (Дж/м³);
 v_m - масова швидкість вигорання (кг/(м²*с));
 $S_{\text{пож}}$ - площа пожежі, м².

Тепло, що виділяється при пожежі, витрачається на нагрівання продуктів згоряння, які видаляються із приміщення - $Q'_{\text{пг}}$, нагрівання продуктів згоряння, які залишаються в приміщенні - $Q''_{\text{пг}}$, (саме вони визначають температуру пожежі), тепло, що витрачається на нагрівання будівельних конструкцій - $Q_{\text{констр}}$, тепло, що витрачається на протікання підготовчих процесів в горючому матеріалі - $Q_{\text{підг}}$, тепло, що випромінюється через отвори за межі приміщення - $Q_{\text{пром}}$.

$$Q_{\text{пож}} = Q'_{\text{пг}} + Q''_{\text{пг}} + Q_{\text{констр}} + Q_{\text{підг}} + Q_{\text{пром}}$$

Якщо позначити суму тепловтрат як частку від загальної теплоти пожежі, тобто:

$$Q'_{\text{пг}} + Q_{\text{констр}} + Q_{\text{підг}} + Q_{\text{пром}} = m Q_{\text{пож}},$$

рівняння теплового балансу можна записати

$$Q_{\text{пож}} = m Q_{\text{пож}} + Q''_{\text{пг}}$$

$$(1 - m) Q_{\text{пож}} = Q''_{\text{пг}}$$

За температуру пожежі приймається середньооб'ємна температура, до якої нагрівається газове середовище в приміщенні під час протікання пожежі. Газове середовище складається із продуктів горіння, що утворюються під час протікання пожежі, та надлишкового повітря. Отже тепло, що витрачається на нагрів газového середовища в приміщенні від початкової температури до температури пожежі, можна визначити по формулі:

$$Q''_{\text{пг}} = v_m S_{\text{пож}} c_p (v_{\text{пг}} + (\alpha_{\text{п}} - 1) v_{\text{п}}) \cdot (T_{\text{пож}} - T_0)$$

$$(1 - m) \eta \cdot v_m \cdot S_{\text{пож}} \cdot Q_{\text{н}}' = v_m \cdot S_{\text{пож}} \cdot c_p \cdot (v_{\text{пг}} + (\alpha_{\text{п}} - 1) v_{\text{п}}) \cdot (T_{\text{пож}} - T_0)$$

Звідси середньооб'ємну температуру пожежі можна визначити за формулою:

$$T_{\text{пож}} = \frac{Q_{\text{н}}' (1 - m) \eta}{c_p [v_{\text{пг}}^0 + v_{\text{п}}^0 (\alpha - 1)]} + T_0$$

В цьому рівнянні невідомими залишаються c_p та m . Крім того розрахункове значення являється середнім по всій площі та висоті приміщення, що відповідає рівномірному полю температур по всьому об'єму приміщення. Але при пожежі в приміщенні немає рівномірного поля температури.

Визначити не тільки середньооб'ємну температуру пожежі, але і температуру газового середовища в будь якій точці приміщення в заданий час розвитку пожежі можна за допомогою критеріальних рівнянь теплового балансу пожежі в огорожі.

Температура пожежі на будь-який момент розвитку визначається як добуток адіабатичної температури горіння $T_{ад}$ на безрозмірний коефіцієнт, що враховує втрати тепла на нагрівання навколишніх конструкцій тепловим випромінюванням і втрати тепла теплопровідністю

$$T_{пож\tau} = \Theta T_{ад}$$

Безрозмірний коефіцієнт Θ визначається як відношення критерію Больцмана, Bo , який характеризує частку тепла, що передається продуктами горіння огорожуючим поверхням у процесі променистого теплообміну, до критерію Нуссельта Nu , який характеризує співвідношення між теплом, переданим конвекцією і теплопровідністю.

$$\Theta = \frac{0.7Bo^{0.17}}{Nu^{0.01}}$$

З огляду на те, що процес відведення тепла теплопровідністю в конструкції, які сприймають тепловий потік, на початковому етапі пожежі незначний, можна записати:

$$\Theta = 0.66 Bo^{0.17}$$

Критерій подібності Больцмана можна визначити із рівняння

$$Bo = \left(\frac{\eta S_{пож} v_m C_p v_{пр}}{60\sigma_0 \epsilon_{звд} S_{огор} T_{ад}^3} \right)$$

де $S_{пож}$ - площа горіння, m^2 ; σ_0 - постійна Больцмана, $5.76 \cdot 10^{-11}$ кВт/ (м К) ; $S_{огор}$ - загальна площа огорожуючи конструкцій, m^2 ; η - коефіцієнт повноти згорання; v_m - масова швидкість вигорання, $кг/(m^2 хв)$; $v_{пр}$ - питомий об'єм продуктів горіння, $m^3/кг$; $\epsilon_{звд}$ - приведена ступінь чорноти полум'я; C_p - теплоємність продуктів горіння, $кДж/(m^3 К)$.

У зоні горіння продукти згорання нагріваються до адіабатичної температури горіння $T_{ад}$, яка може бути визначена по формулі

$$T_{ад} = \frac{\eta * Q_n'}{c_p v_{пр}} + 273$$

де Q_n' - нижня масова теплота згорання речовини, $кДж/кг$; η - коефіцієнт повноти згорання, C_p теплоємність продуктів горіння, $кДж/(m^3 К)$; $v_{пр}$ - питомий об'єм продуктів горіння, $m^3/кг$.

Отже, середньооб'ємну температуру газового середовища в приміщенні при пожежі в будь-який момент часу можна визначити за формулою:

$$T_{пож\tau} = 0.66 T_{ад} \left(\frac{\eta S_{пож} v_m C_p v_{пр}}{60\sigma_0 \epsilon_{пр} S_{огор} T_{ад}^3} \right)^{0.17}$$

Висновок: використовуючи інтегральну модель, можна одержати наближені характеристики пожежі і використовувати їх у розробці тактичного задуму при підготуванні пожежно-тактичних навчань, оперативних планів пожежегасіння або під час пожежно-технічної експертизи.

1.2. Визначення температурного режиму розрахунковим методом.

Для того, щоб визначити середньооб'ємну температуру газового середовища в приміщенні на визначений момент часу, необхідно знати адіабатичну температуру горіння заданої горючої речовини і значення критерію Больцмана.

$$T_{\tau} = \Theta T_{ад} = 0.66 Bo^{0.17} T_{ад}$$

Отже перша частина методики визначення температури пожежі в огорожі полягає в розрахунку адіабатичної температури горіння:

$$T_{ад} = \frac{\eta Q'_H}{c_p v_{пт}} + 273,$$

а друга – в розрахунку критерію Больцмана:

$$Bo = \left(\frac{\eta S_{пож} v_m c_p v_{пт}}{60 \sigma_0 \varepsilon_{пр} S_{отв} T_{ад}^3} \right).$$

При цьому необхідно пам'ятати, що об'єм продуктів горіння залежить від коефіцієнту надлишку повітря, теплоємності газового середовища від температури продуктів горіння, масової швидкості вигорання, від часу розвитку пожежі.

Методика розрахункового визначення температури пожежі в огорожі.

1. Для горючої речовини із довідника [6] виписати параметри, що визначають умови розвитку пожежі:

v_1 - лінійна швидкість поширення горіння, м/хв.;

v_{m}° - масова швидкість вигорання, кг/(м² хв);

Q'_H - нижча теплота згорання речовини, кДж/кг;

$v_{п}^{\circ}$ - питомий теоретичний об'єм повітря, м³/кг;

$v_{пт}^{\circ}$ - питомий теоретичний об'єм продуктів згорання, м³/кг;

η - коефіцієнт повноти згорання.

2. Розрахувати площу пожежі на заданий час розвитку;

2.1. Розрахувати радіус поширення пожежі $R_{п}$

2.2. Залежно від форми розвитку розрахувати площу $S_{пож}$ пожежі.

3. Для визначення коефіцієнта надлишку повітря, питомої теплоємності продуктів горіння, об'єму продуктів горіння необхідно попередньо задатися температурою пожежі в першому приближенні ($T_{пож}$). Значення температури пожежі вибирається виходячи із досвіду роботи або попереднього розрахунку за методикою стандартного температурного режиму пожежі.

4. Визначити коефіцієнт надлишку повітря;

4.1. Визначити загальну площу розкритих отворів і площу отворів, працюючих на притоку.

Приймається, що розкриваються всі отвори, які потрапляють у зону горіння; в разі розташування отворів на різних рівнях, на притоку працюють нижні отвори, а на вихід продуктів горіння – верхні. Якщо отвори знаходяться на одному рівні, то на притоку повітря працює 1/3 площі всіх отворів:

$$S_{прит} = S_{отв} / 3,$$

а висота приточної частини отворів визначається із рівняння:

$$h_{прит} = \frac{h_{отв}}{1 + 3 \sqrt{\frac{T_{пож}}{T_0}}}.$$

4.2. Коефіцієнт надлишку повітря при пожежі в огорожі можна визначити розрахунком за формулою:

$$\alpha_{п} = 159.5 \frac{S_{прит}}{S_{пож} v_{п}^{\circ} v_m} \sqrt{h_{прит} \frac{T_{пож} - T_0}{T_{пож}}},$$

Якщо коефіцієнт надлишку повітря стає менше одиниці ($\alpha_{п} < 1$), то пожежа класифікується як обмежена газообміном, полум'яне горіння протікає тільки в місцях притоки повітря. На іншій площі горіння переходить у тління. Але дана модель не дозволяє проводити розрахунок

температури пожежі, що супроводжується тлінням матеріалів. Отже, якщо коефіцієнт надлишку повітря, розрахований по формулі, виявиться менше одиниці, то в наступних розрахунках коефіцієнт надлишку повітря приймається рівним одиниці.

У тому випадку, коли коефіцієнт надлишку повітря стає значно вище одиниці ($\alpha_{\text{п}} \gg 1$), процес тепло і масообміну буде мало залежати від геометричних розмірів конструкцій. При цьому процес горіння розвивається так само, як за умов відкритої пожежі, і не буде впливати на зміну температури в пожежі.

5. Розрахувати фактичний питомий об'єм продуктів згорання з урахуванням надлишку повітря:

$$v_{\text{пр}} = v_{\text{пр}}^0 + v_{\text{п}}^0 (\alpha - 1),$$

6. Розрахувати приведену масову швидкість вигорання речовини;

Масова швидкість вигорання речовини змінюється залежно від часу розвитку пожежі.

$$v_{\text{м}} = v_{\text{м}}^0 \left(0.3 + 0.7 \sqrt{\frac{\tau_{\text{пож}}}{30}} \right),$$

7. Розрахувати об'ємну теплоємність газового середовища в приміщенні під час пожежі;

Об'ємна питома теплоємність продуктів горіння залежить від їх складу і температури за формулою:

$$C_{\text{р}} = 1.25 + \left(0.12 + \frac{0.1}{0.25 + \alpha_{\text{п}}} \right) \frac{T_{\text{пож}}}{1000}.$$

8. Розрахувати значення приведеного ступеня чорноти системи "полум'я – огорожуюча поверхня":

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{1 + 0.0022(T_{\text{пож}} - 273)}.$$

9. Визначити площу огорожуючих конструкцій;

Повна поверхня огорожуючих конструкцій $S_{\text{огор}}$ визначається як сума поверхні стін, підлоги і стелі, які сприймають тепловий потік. Якщо пожежа відбувається в кількох суміжних приміщеннях, то площу огорожуючих конструкцій можна визначити як суму площ конструкцій кожного приміщення:

$$S_{\text{огр}} = \sum_{i=1}^n S_{\text{огр},i} = \sum_{i=1}^n 2(a_i b_i + a_i h_i + b_i h_i).$$

10. Розрахувати адиабатичну температуру горіння:

$$T_{\text{ад}} = \frac{\eta Q_{\text{н}}}{c_{\text{р}} v_{\text{пр}}} + 273,$$

11. Розрахувати середньооб'ємну температуру пожежі в приміщенні на заданий час розвитку. Підставивши числові значення сталої Больцмана у вираз отримаємо:

$$T_{\text{пож}} = 18.1 T_{\text{ад}} \left(\frac{\eta S_{\text{пож}} v_m C_p v_{\text{пр}}}{\varepsilon_{\text{пр}} S_{\text{отр}} T_{\text{ад}}^3} \right)^{0.17}$$

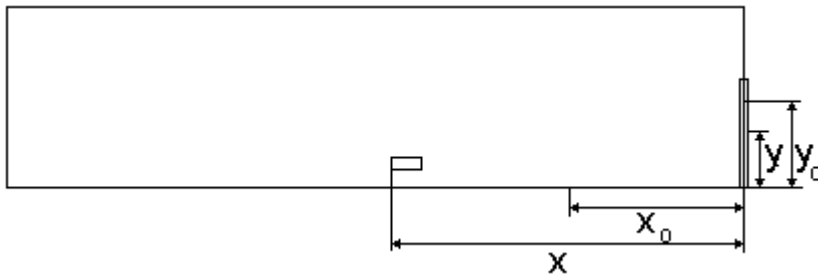
12. Провести порівняння розрахованої середньооб'ємної температури пожежі із попередньо заданими значеннями температури в першому наближенні. При розбіжності більш 10% необхідно задатися новим значенням температури і повторити розрахунок. При цьому отримане значення середньооб'ємної температури пожежі приймають за друге наближення.

13. Визначити координати заданої точки приміщення, x , y .

14. Розрахувати значення температури в заданих точках приміщення на заданий час розвитку пожежі:

$$T_{x,y,\tau} = T_{\tau} \left(0.8 + 0.2 \frac{y}{y_0} \right) \left(1.33 - \frac{x}{2x + x_0} \right),$$

де x і y - координати точки, у якій визначається температура пожежі. Початок відліку ведеться від фронту пожежі;



Вид приміщення збоку

$x_0 = 0,25$ ширини приміщення, $y_0 = 0,5h$ висоти приміщення.

1.3. Визначення температурного режиму пожежі за допомогою номограм.

Аналіз величин, що входять до критерію Больцмана, показує, що в умовах пожежі середньооб'ємна температура залежить від теплоти пожежі, умов газообміну (надлишку повітря) та часу розвитку пожежі. Отже температуру пожежі в огорожі можна представити як функцію:

$$t = f(q, \alpha, \tau)$$

де q – густина теплового потоку, що надходить до огорожуючи конструкцій, Вт/м²

Статистична обробка експериментальних даних дозволила представити ці залежності у вигляді номограм, тому і визначення температурного режиму пожежі може проводитися із використанням цих номограм.

Методика визначення температури пожежі по номограмах.

1. Для горючої речовини із довідника [6] визначити:

v_m - масову швидкість вигорання, кг/(м² хв.);

v_l – лінійна швидкість поширення горіння, м/хв.;

Q_n - масову теплоту згорання, кДж/кг;

$v_{\text{п}}^{\circ}$ - питомий теоретичний об'єм повітря, м³/кг;

$v_{\text{пр}}^{\circ}$ - питомий теоретичний об'єм продуктів згорання, м³/кг;

η - коефіцієнт повноти згорання.

2. Розрахувати площу пожежі на заданий момент часу розвитку.

2.1. Розрахувати радіус поширення пожежі, $R_{\text{п}}$, м.

2.2. Залежно від форми розрахувати площу пожежі, $S_{\text{п}}$, м².

3. Розрахувати площу підлоги, та огорожуючих конструкцій в приміщенні.

$$S_{\text{отр}} = 2(ab + ah + bh)$$

4. Визначити площу розкритих отворів, що працюють на вихід продуктів згоряння, і площу отворів, що працюють на притоку свіжого повітря.

Приймається, що в разі розташування отворів на різних рівнях, на притоку працюють нижні отвори, а на вихід – верхні. Якщо отвори знаходяться на одному рівні, то на притоку повітря працює 1/3 площі отворів.

5. Визначити коефіцієнт надлишку повітря по номограмі.

5.1. Визначити співвідношення $S_{\text{пож}}/S_{\text{підл}}$ і $S_{\text{притоки}}/S_{\text{пож}}$.

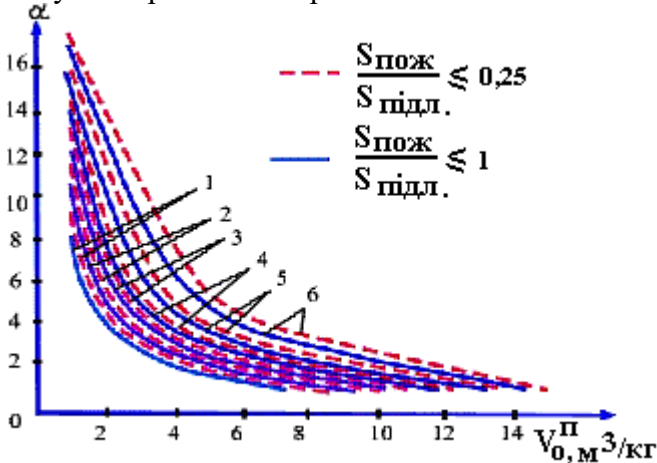
5.2. За значенням $S_{\text{притоки}}/S_{\text{пож}}$ – номер пари кривих

Крива 1 – $S_{\text{притп}}/S_{\text{пож}}, < 0,04$; Крива 2 – $0,04 < S_{\text{притп}}/S_{\text{пож}}, < 0,06$; Крива 3 – $0,06 < S_{\text{притп}}/S_{\text{пож}}, < 0,10$;

Крива 4 – $0,10 < S_{\text{притп}}/S_{\text{пож}}, < 0,17$; Крива 5 – $0,17 < S_{\text{притп}}/S_{\text{пож}}, < 0,25$; Крива 6 – $0,25 < S_{\text{притп}}/S_{\text{пож}}, < 0,33$.

, а за значенням $S_{\text{пож}}/S_{\text{підл}}$ визначити тип кривої (суцільна або пунктирна).

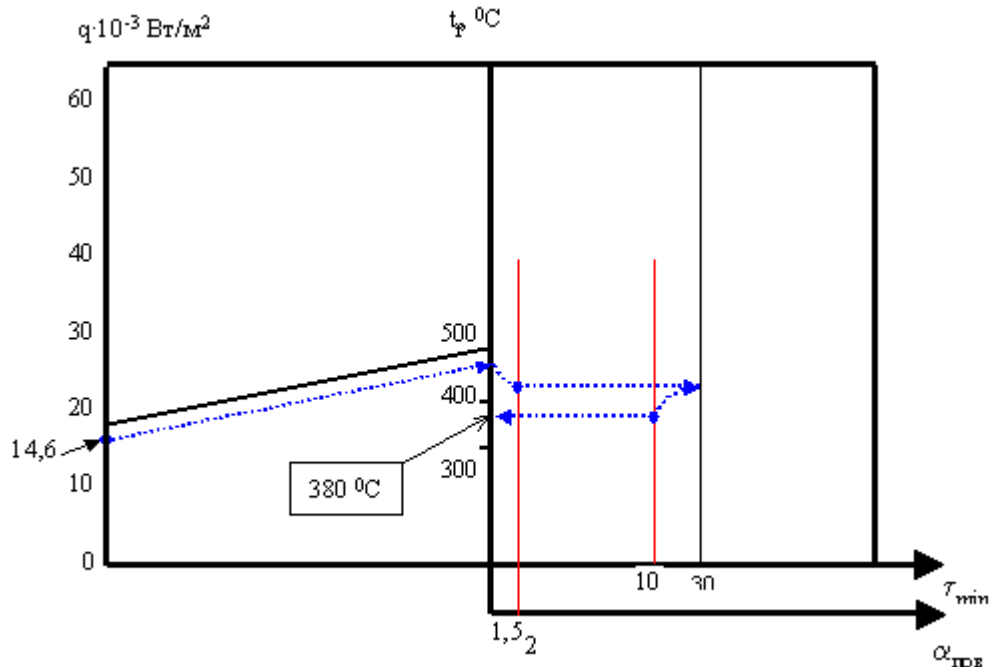
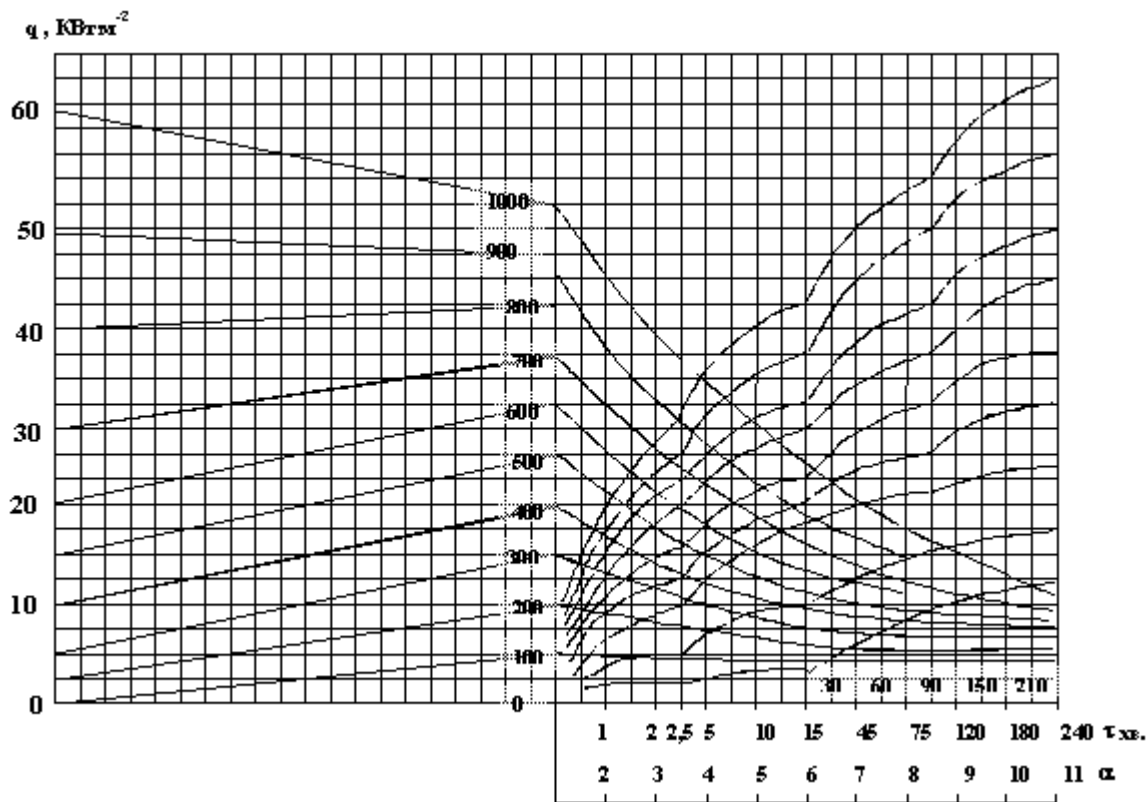
5.3. По табличному значенню питомого теоретичного об'єму повітря $v_{\text{п}}^{\circ}$ визначити коефіцієнт надлишку повітря по номограмі.



6. Розрахувати густину теплового потоку на одиницю площі огорожуючих конструкцій:

$$q = \frac{\eta v_{\text{п}} Q_{\text{н}}' S_{\text{п}}}{60 S_{\text{огор}}}, \text{ кВт/м}^2.$$

7. Користуючись номограмою, по отриманих значеннях теплового потоку, коефіцієнту надлишку повітря визначається середньооб'ємна температура пожежі у визначений час.



На лівій осі ординат знаходимо значення густини теплового потоку q , ($\text{кВт}/\text{м}^2$) і рівновіддалено від найближчої залежності температури пожежі від густини теплового потоку проводимо пряму на праву вісь ординат – вісь температур. Потім рівновіддалено від найближчої кривої залежності температури від коефіцієнта надлишку повітря опускаємось до перетину із перпендикуляром, встановленим із точки, що відповідає α . Із одержаної точки, паралельно осі абсцис проводимо пряму до перетину із перпендикуляром, встановленим із точки $\tau = 30$ хв. Потім рівновіддалено від найближчої кривої залежності температури від часу розвитку пожежі пересуваємось до перетину із перпендикуляром, встановленим із точки, що відповідає τ . Із

отриманої точки паралельно осі абсцис проводимо пряму на вісь температур і знаходимо відповідне значення температури пожежі в огороженні:

Користуючись другою номограмою, можна приблизно визначити, як буде змінюватися температура газів по мірі віддалення від джерела пожежі: вона вище середньооб'ємної над осередком горіння і нижче в нижній зоні вдалині від осередку горіння.

8. Визначити безрозмірні координати точки x/x_0 , y/y_0 ,

де x - положення точки по горизонталі; y - положення точки по вертикалі; $x_0 = 0,25a$ (a - ширина приміщення), $y_0 = 0,5h$, (h - висота приміщення).

9. Визначити температуру в заданій точці приміщення, використовуючи номограму.

По кривій x/x_0 переміщаємося до пересічення з перпендикуляром, відновленим до осі абсцис у точці 2, паралельно осі абсцис повертаємося на вісь температур і одержуємо температуру на заданий час.

ВИСНОВОК: На підставі отриманих даних по зміні температури як у цілому в помешканні, так і в окремих його точках можна робити практичні висновки про поведінку будівельних конструкцій в умовах пожежі. Розрахунок температурного режиму пожежі в огороженні може бути основою при прогнозуванні умов розвитку пожежі і розробки тактичного задуму при проведенні практичних занять пожежних підрозділів на об'єктах. Використовуючи результати розрахунку середньооб'ємної температури можна визначити положення області рівних тисків при повітрообміні.

1.4. Фактори, що впливають на температуру пожежі в огороженні

Температура пожежі в огороженні залежить від множини факторів. Динаміку розвитку пожежі визначає тепловиділення, що супроводжує процес горіння, тобто теплота пожежі та умови газообміну.

теплота пожежі – це кількість тепла, що виділяється в зоні горіння за одиницю часу.

$$Q_{\text{пож}} = \eta Q_n v_m S_{\text{пож}}$$

де η - коефіцієнт повноти згорання, який залежить від умов газообміну;
 v_m - масова швидкість вигорання (кг/(м² хв));
 $S_{\text{пож}}$ - площа пожежі, м²;
 Q_n - теплота згорання, кДж/кг.

Масова швидкість вигорання та площа пожежі, яка, в свою чергу, визначається лінійною швидкістю поширення, залежать від часу розвитку пожежі, температури та інтенсивності газообміну. Таким чином, кількість тепла, що виділяється на пожежі, і температура пожежі істотно залежать від організації вентиляції між приміщенням і зовнішнім середовищем. Зв'язок між температурою пожежі і інтенсивністю газообміну дуже складний і залежить від конкретних властивостей речовини, що горить, та особливостей приміщення, де відбувається пожежа.

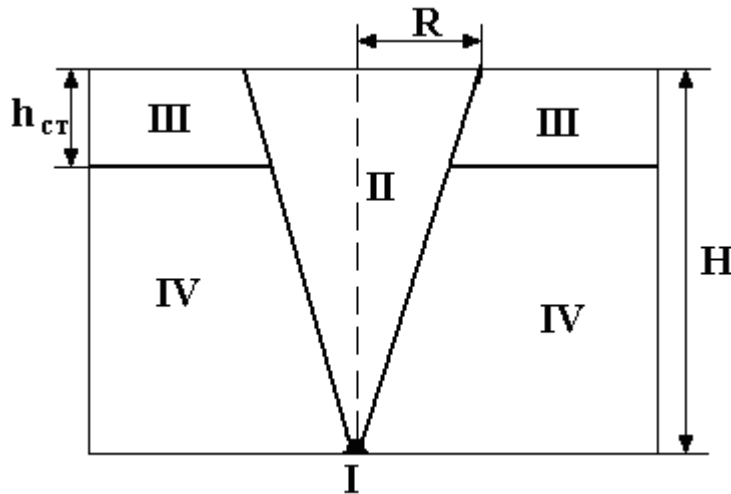
Якщо повітрообмін у приміщення не обмежений, то інтенсивність горіння збільшується, зростає температура в зоні реакції горіння. З іншого боку, це повітря має достатньо низьку температуру, тому температура пожежі буде падати. Який саме з цих двох факторів буде найбільше суттєвим, залежить від конкретної ситуації.

У загальному випадку температура пожежі в огороженні є функцією:

· об'єму приміщення ($V_{\text{прим}} \uparrow$ $T_{\text{пож}} \downarrow$);
 · кількості пожежного навантаження ($P_{\text{пож}} \uparrow$ $T_{\text{пож}} \downarrow$);
 · виду горючої речовини (теплоти згорання речовини Q_n , масової швидкості вигорання речовини v_m , швидкості поширення горіння $v_1 \uparrow$ $T_{\text{пож}} \downarrow$);
 · тепловтрат на нагрівання конструкцій ($Q_{\text{констр}} \uparrow$ $T_{\text{пож}} \downarrow$);
 · часу розвитку горіння,
 · площі пожежі ($S_{\text{пож}} \uparrow$ $T_{\text{пож}} \uparrow$);
 · інтенсивності газообміну;
 · температури повітря, що надходить в приміщення ($T_o \downarrow$ $T_{\text{пож}} \downarrow$).

§ 2. Основні положення зонної моделі температурного режиму.

Зонна модель розрахунку температури припускає, що при горінні матеріалу в приміщенні утворюється кілька зон, в яких протікають фізичні процеси, пов'язані із тепло- і масопереносом. Зонна модель працює до стадії об'ємного розвитку пожежі.



I - зона горіння, в якій протікає безпосередньо згорання матеріалів, виділення енергії у вигляді променистої енергії і нагрітих продуктів горіння. У цій зоні температура весь час розвитку пожежі залишається постійною і дорівнює температурі горіння. Температура всередині факелу залежить від теплотворної здатності горючої речовини і масової швидкості вигорання.

У розрахунках зону горіння приймають як крапкове джерело тепла. У тих випадках, коли площа горіння значна і не може бути прийнята як фізична точка, то зону горіння опускають нижче рівня поверхні і вибирається «уявна» точка горіння.

$$t_{\text{хол}} = t_0 + 16,93 \sqrt[3]{\frac{Q_{\text{пож}}^2}{h_{\text{к}}^5}}$$

Прийнято вважати, що відстань, на яку переноситься уявна точка горіння, – 1,5 діаметра осередку пожежі:

$$h_{\text{уявн.}} = 1,5 d_{\text{пож.}}$$

II - димогазова колонка, яка має форму переверненого конуса, що починається на місці "крапкової" пожежі.

Прийнято вважати, що радіус колонки визначається як 18 відсотків від її висоти:

$$R = 0,18 H$$

У димогазовій колонці протікають основні процеси масопереносу. Розігріті продукти горіння швидко піднімаються під дією гравітаційних сил в верхні прошарки приміщення. При цьому в нижній частині димогазової колонки за рахунок високої швидкості прямування потоку відбувається активне підсмоктування холодного повітря в нагрітий потік, поступово концентрація продуктів горіння і їх температура знижуються. У середній і верхній частині димогазової колонки підсмоктування холодного повітря практично не відбувається.

Температуру безпосередньо в димогазовій колонці можна визначити як:

$$t_{\text{хол}} = t_0 + 16,93 \sqrt[3]{\frac{Q_{\text{пож}}^2}{h_{\text{к}}^5}}$$

де $Q_{\text{пож}} = \eta Q_{\text{н}} v_{\text{н}} S_{\text{пож}}$ – теплота пожежі, кВт;

$h_{\text{к}}$ – висота димогазової колонки, м;

t_0 – початкова температура середовища в приміщенні, °С.

Час досягнення теплового імпульсу із зони горіння до стелі можна визначити як:

$$\tau = \frac{H}{v_{\text{верт}}} = 1,06 \frac{H^{1,33}}{Q_{\text{пож}}^{0,33}}$$

III – прошарок біля стелі. У приміщеннях із обмеженою висотою (менш 6 метрів) димогазова колонка розбивається на поверхні перекриття і продукти горіння рівномірно розтікаються в горизонтальному напрямку. У прошарку біля стелі нагріті продукти горіння практично не перемішуються з холодним повітрям приміщення, але товщина цього прошарку в ході горіння постійно наростає. Товщина шару продуктів горіння під стелею приймається 1 відсоток від висоти колонки:

$$h_{\text{ст}} = 0,01H.$$

Максимальна температура в третій зоні знаходиться безпосередньо на межі з димогазовою колонкою. При віддаленні від неї температура знижується. Поле температур в верхній частині приміщення у стелі описується рівнянням:

$$t_{\text{ст}} = t_0 + 5,38 \sqrt[3]{\frac{Q_{\text{пож}}^2}{R^2 H^3}}$$

IV – зона холодного повітря. У цій зоні на початковому етапі пожежі знаходиться основна маса окислювача, який дифундує в зону горіння і підтримує розвиток пожежі.

Між усіма визначеними зонами протікають процеси тепло і масопереносу. Горючі речовини й окислювач реагують між собою в першій зоні, тут утворюються продукти горіння, відбувається виділення енергії у вигляді теплоти пожежі. У другій зоні відбувається масоперенос і перенос енергії із першої зони в прошарок біля стелі, де продукти горіння й енергія накопичуються. В прошарку біля стелі протікає активний теплообмін між продуктами горіння і поверхнею будівельних конструкцій – перекриттям приміщення. Між зоною холодного повітря і продуктів згорання теж протікає процес тепло і масообміну. Сама холодна зона є резервом окислювача й одночасно піддається нагріванню тепловим випромінюванням від нагрітих продуктів згорання та розжарених будівельних конструкцій. Кінцевим результатом цього тепло- та масообміну є повне заповнення продуктами згорання об'єму приміщення і практично рівномірне нагрівання їх.

Використання зонної моделі допомагає визначити температуру над джерелом пожежі на будь-якій висоті, розрахувати швидкість підйому продуктів згорання і наростання температури. Зонна модель дає гарні результати при розрахунку температури в частині приміщення біля стелі і часу підйому температури в цій частині приміщення до значень, при яких повинні спрацювати системи пожежної автоматики.

Глава 6. Газообмін при пожежі в огороженні.

Газообмін на пожежі вирішальним чином впливає на розвиток пожежі, її тепловий режим, швидкість і напрямок поширення горіння в приміщенні. Але газообмін також грає визначальне значення і в забезпеченні безпеки людей, які знаходяться всередині будинку, їх рятуванні, і забезпеченні умов для організації і проведення бойових дій по гасінню пожеж.

§ 1. Основні закономірності газообміну при пожежі в огороженні.

Газообмін – це рух конвекційних газових потоків, що виникає під дією сил, обумовлених градієнтом тиску.

Градієнт тиску, а, отже, рух газового середовища всередині приміщення, створюється за рахунок:

1. різниці температур газових потоків (нагрітих продуктів згоряння всередині приміщення і холодного повітря назовні);
2. штучного регулювання повітрообміну в помешканні;
3. вітрових навантажень;
4. наявності самої пожежі.

Перші три фактори не залежать від наявності пожежі і існують в будь-якому приміщенні, проте їх наявність сприяє поширенню диму на сусідні приміщення.

Так різниця температур газових потоків всередині і зовні будівлі обумовлює різницю їх тисків і появу ефекту “димової труби”. Завдяки цьому ефекту газові потоки всередині будівлі можуть рухатися вгору чи вниз в залежності від того більша чи менша його температура в порівнянні з температурою навколишнього повітря. Крім того, тиск повітря змінюється з висотою будівлі.

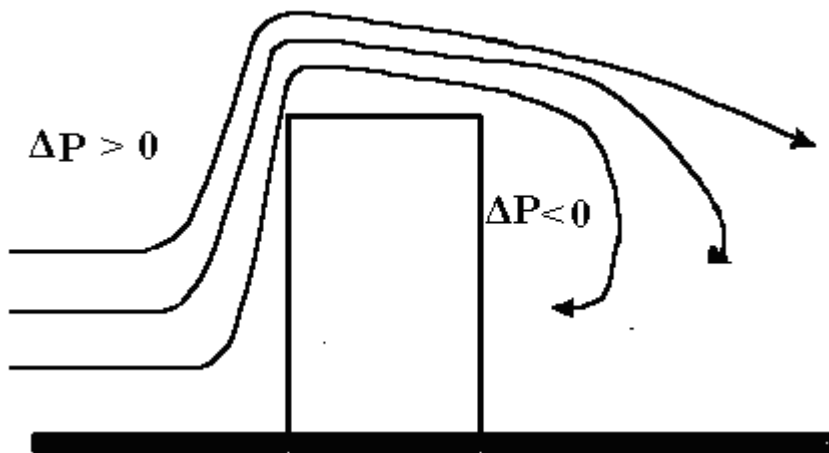
Гідростатичний напір, що призводить до руху повітря в помешканні, навіть при відсутності пожежі визначається рівнянням:

$$\Delta P = g \Delta h \frac{\rho}{\rho_{\text{пов}}} \left(\frac{1}{T_{h_1}} - \frac{1}{T_{h_2}} \right) = 3,46 \Delta h \left(\frac{1}{T_{h_1}} - \frac{1}{T_{h_2}} \right), \text{ кПа.}$$

У помешканні висотою 5 метрів гідростатичний тиск складе $\Delta P = 4,3$ Па, у сходовій клітині висотою 30 метрів $\Delta P = 25,95$ Па.

Вітрові навантаження можуть викликати зміну поля тиску навколо будівлі в цілому. При цьому може змінитися характер розподілу тиску з навітряної і підвітряної сторони будівлі.

Характер прямування повітряних потоків має вид:



Всі будівлі мають достатню кількість щілин, через які проникає вітер і сприяє руху газових потоків всередині приміщення. Із навітряної сторони будівлі утвориться надлишковий тиск, а з підвітряної сторони тиск зменшується. Значення перепаду тиску пропорційно квадрату швидкості вітру.

$$\Delta P = k \frac{\rho_{\text{пов}} v_{\text{віт}}^2}{2} \quad \rho_{\text{пов}} = \frac{\rho_0}{R_{\text{пов}} T_{\text{пов}}}$$

$$\Delta P = k \frac{\rho_0 v_{\text{віт}}^2}{2 R_{\text{пов}} T_{\text{пов}}} = k \frac{101,3 v_{\text{віт}}^2}{2 \cdot 287 \cdot T_{\text{пов}}} = 0,178 k \frac{v_{\text{віт}}^2}{T_{\text{пов}}}$$

де $v_{\text{віт}}$ - швидкість вітру, м/с;

$T_{\text{пов}}$ - температура навколишнього повітря, К.

При швидкості вітру 7 м/с і температурі 20°C надлишковий вітровий тиск складе 29,46 Па.

Сучасні виробничі і адміністративні будівлі обладнані штучними системами припливно-втяжної вентиляції. При роботі систем вентиляції створюються повітряні потоки, що можуть, як

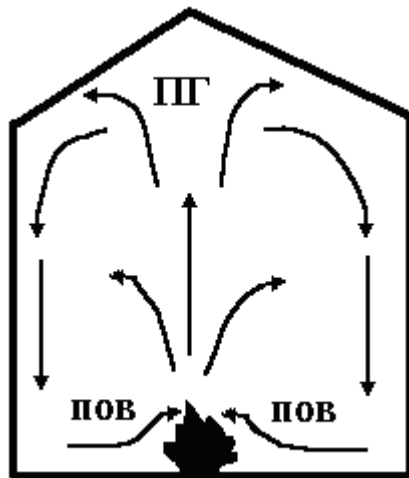
сприяти, так і перешкоджати поширенню пожежі. Для видалення продуктів горіння проектується системи видалення диму.

Найбільш суттєвим фактором є протікання реакції горіння. Пожежа в помешканні призводить до значного підвищення температури повітря, що у свою чергу збільшує рушійну силу газообміну. При пожежі в огороженні газообмін обмежений будівельними конструкціями, за рахунок чого зона задимлення з часом збільшується і за певних умов поширюється на сусідні приміщення, в яких процесу горіння ще немає. Перепад тиску, що виникає, може підсилити прямування диму в інші частини будівлі.

При виникненні горіння в замкнутому об'ємі приміщення пожежа спочатку розвивається за рахунок повітря, яке знаходиться в вільному об'ємі приміщення. Над осередком горіння виникають конвекційні потоки нагрітих продуктів горіння і повітря, які за рахунок підвищеної температури мають низьку густину і під впливом гравітаційних сил піднімаються вгору, створюючи при цьому деяке розрідження поблизу зони горіння. Холодне повітря підсмоктується димогазовим струменем в нижній частині колонки. На початковій стадії, коли осередок горіння має малі розміри, газовий потік не досягає перекриття, бо охолоджується за рахунок теплообміну і змішування з холодним повітрям.

При збільшенні площі горіння потужність теплового потоку збільшується, газове середовище над осередком горіння нагрівається до більшої температури, утворюються потужні конвекційні потоки, які накопичуються в верхній частині приміщення і створюють надлишковий тиск. В нижній частині колонки відбувається підсос повітря, взаємодія його з горючою речовиною, отже тут створюється розрядження.

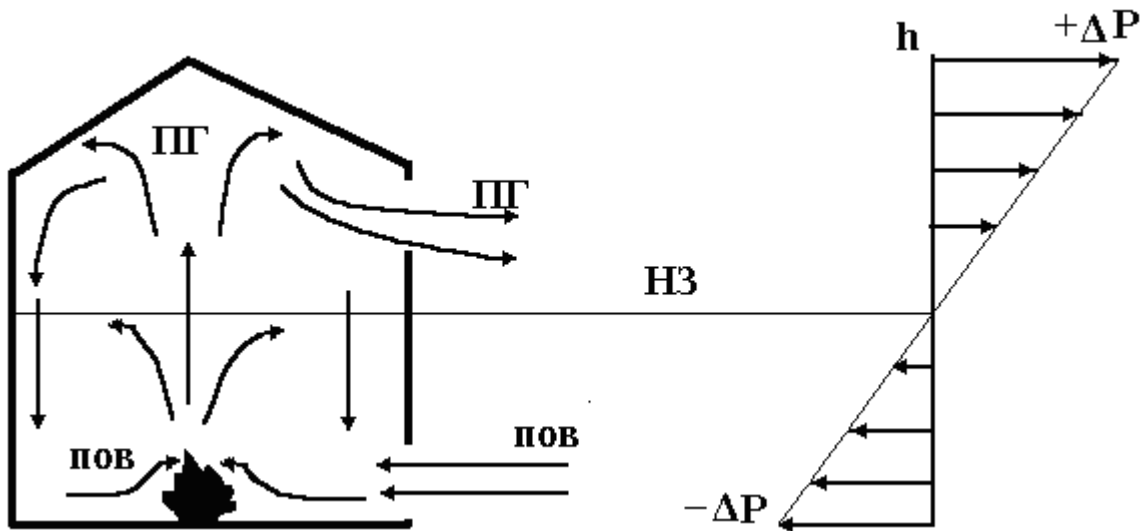
При малій висоті приміщення гарячі потоки можуть досягати перекриття й омивати його. Продукти горіння, які остигають за рахунок теплопередачі в стелю та в стіни приміщення, опускаються униз, що призводить до циркуляції всієї маси газів у помешканні. Безперервна циркуляція газових потоків приводить до підвищення середньооб'ємної температури в приміщенні і поступового заповнення всього приміщення продуктами горіння.



Характер руху повітряних мас залежить від конфігурації приміщення, наявності отворів, а також їх взаємного розташування.

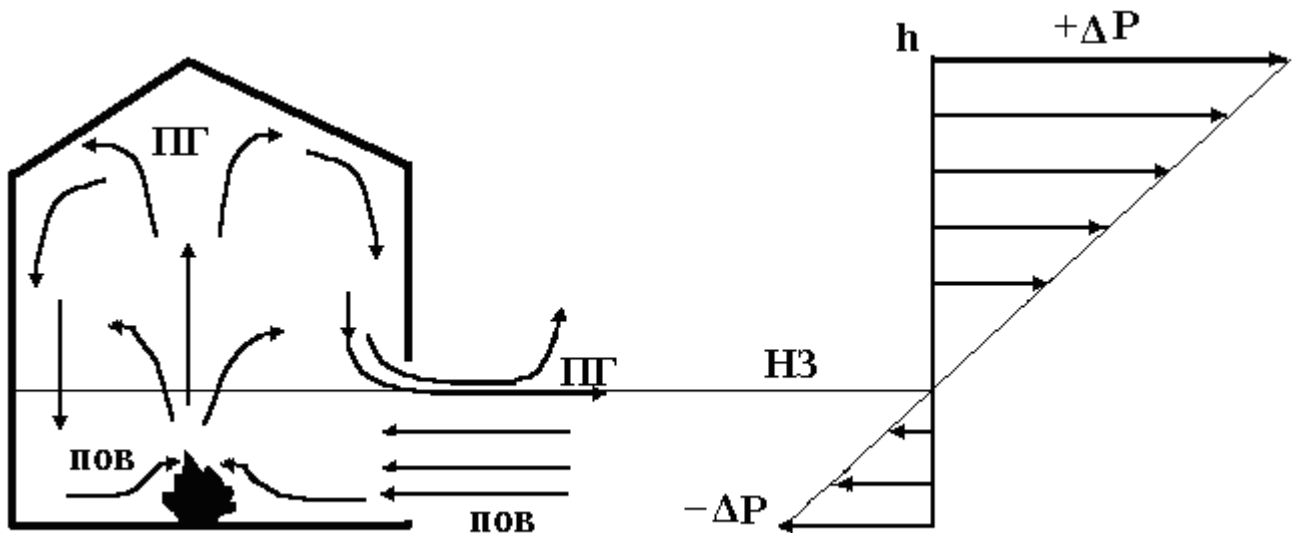
Якщо газообмін здійснюється через декілька отворів, які розташовані на різному рівні, їх можна умовно розділити на усмоктувальні (через які надходить свіже повітря в приміщення) і вихідні (через які розігріті продукти згоряння виходять в атмосферу).

Характер прямування газових потоків при цьому може мати вид:



При газообміні через один отвір, наприклад відкриті двері, вікно або декілька отворів, які знаходяться на одному рівні, процес підсосу повітря і викиду здійснюється безпосередньо в тому самому отворі. На припливу працює тільки нижня частина отвору.

При цьому спостерігається цілком інший характер прямування газових потоків.



Густина продуктів горіння і їх тиск в нижній і верхній частині приміщення відрізняється від густини і тиску навколишнього повітря. Але на деякій висоті від рівня підлоги фізичні параметри газового середовища в приміщенні (густина) відповідають фізичним параметрам повітря поза приміщенням. Відповідно і тиск газового середовища буде таким же, як і тиск повітря поза приміщенням. Цю площину прийнято назвати нейтральною зоною або площиною рівних тисків.

Нейтральною зоною називається уявна площина в приміщенні, рівнобіжна підлозі, у точках якої тиск продуктів горіння дорівнює тиску зовнішнього повітря.

По мірі розвитку пожежі положення нейтральної зони змінюється.

Діапазон зміни тиску при пожежі в помешканні буде визначатися вираженням

$$\Delta p = (0.25 \div 1) \left(\frac{v_m S_{\text{пож}}}{T_0 S_{\text{пр}}} \right)^2 T_{\text{пр}}$$

де $T_{\text{пр}}$ - температура продуктів горіння в помешканні, К;
 T_0 - температура повітря поза приміщенням, К;

$S_{\text{отв}}$ - площа отвору, м²;
 $S_{\text{пож}}$ - площа пожежі, м²;
 v_m - масова швидкість вигорання, кг/(м² хв.).

§ 2. Основні параметри, що характеризують газообмін на пожежі.

Параметрами, що характеризують умови газообміну в приміщенні при пожежі, є інтенсивність газообміну та коефіцієнт надлишку повітря.

$$I_{\Gamma} = \frac{G_{\text{пов}}}{S_{\text{пож}}}$$

Інтенсивність газообміну - це кількість повітря, що надходить до одиниці площі пожежі в одиницю часу:

Розрізняють фактичну і теоретичну інтенсивність газообміну в залежності від витрати повітря, що надходить в приміщення.

Необхідна інтенсивність газообміну може бути, визначена виходячи з масової швидкості вигорання, питомого обсягу повітря, необхідного для повного згорання і площі пожежі.

Теоретично необхідна витрата повітря визначається як

$$G_{\text{пов}}^{\text{теор}} = \eta \cdot S_{\text{пож}} \cdot v_m \cdot v_{\text{п}}^0 \cdot \rho_{\text{п}}$$

де $S_{\text{пож}}$ - площа горіння, м²;

v_m - масова швидкість вигорання, кг/(м² хв.);

$v_{\text{п}}^0$ - питомий об'єм повітря на згорання кг речовини, м³/кг;

$\rho_{\text{пов}}$ - густина повітря, кг/м³.

Тоді теоретична інтенсивності газообміну:

$$I_{\Gamma}^{\text{теор}} = \frac{G_{\text{пов}}^{\text{теор}}}{S_{\text{пож}}} = \frac{\eta S_{\text{пож}} v_m v_{\text{п}}^0 \rho_{\text{п}}}{S_{\text{пож}}} = \eta v_m v_{\text{п}}^0 \rho_{\text{п}}$$

Фактична витрата повітря визначається як:

$$G_{\text{пов}}^{\text{факт}} = \mu v_{\text{пов}} S_{\text{прип}} \rho_{\text{пов}}$$

де μ - коефіцієнт витрати отвору, який враховує втрати кінетичної енергії газового потоку при проході його через отвори за рахунок тертя, завихрення та інше, і залежить від форми отвору і товщини стінок. Для віконних і дверних отворів величина μ приймається рівною 0,6—0,65;

$v_{\text{пов}}$ - швидкість прямування повітряного потоку, м/хв.;

$S_{\text{прип}}$ - площа припливного отвору, м².

Швидкість газу в припливному отворі можна розрахувати, виходячи з рівняння Бернуллі:

$$\Delta P_{\text{прип}} = \frac{v_{\text{пов}}^2 \rho_{\text{пов}}}{2}$$

$$v_{\text{прип}} = \sqrt{\frac{2 \Delta P_{\text{прип}}}{\rho_{\text{пов}}}} = \sqrt{2 g h_{\text{прип}} \frac{\rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{шт}}}{\rho_{\text{пов}}}}$$

$$\rho = \frac{P}{RT}$$

або з урахуванням

$$v_{\text{прип}} = \sqrt{2 g h_{\text{прип}} \frac{T_{\text{шт}} - T_{\text{пов}}}{T_{\text{шт}}}}$$

Підставивши значення витрати повітря в попередню формулу, одержимо вираження для визначення фактичної інтенсивності газообміну:

$$I_{\Gamma}^{\text{факт}} = \mu_{\text{рп}} \frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{пож}}} \sqrt{2gh_{\text{прип}} \frac{T_{\text{шт}} - T_{\text{пов}}}{T_{\text{шт}}}}$$

Найбільший вплив на значенням фактичної інтенсивності газообміну чинить відношення

. Збільшення відношення $\frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{пож}}}$ веде до збільшення інтенсивності газообміну, швидкості росту

температури та її значення. При зменшенні відношення $\frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{пож}}}$ інтенсивності газообміну, а, отже,

і температура пожежі падає, але різко підвищується тривалість пожежі. За відношенням $\frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{пож}}}$

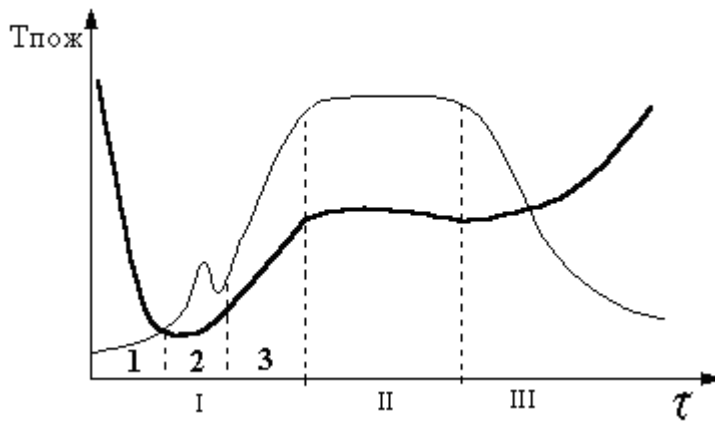
пожежі можна поділити на дві групи. Якщо $\frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{пож}}} < \frac{1}{12}$, пожежі відносять до пожеж з низькотемпературним режимом, тобто розвиток процесу горіння і інтенсивність тепловиділення стримуються припливом повітря та об'ємом самого приміщення (ПРВ). Якщо, пожежі відносять до пожеж з високотемпературним режимом, тобто розвиток процесу горіння і інтенсивність тепловиділення визначається наявністю та видом горючих матеріалів (ПРН).

Наступний параметр, що характеризує умови газообміну, це коефіцієнт надлишку повітря. Так як пожежа розвивається з часом, об'єм повітря, що необхідний для повного згорання пожежного навантаження також змінюється з часом, тому коефіцієнт надлишку повітря при пожежі виражається не через об'єми повітря, а через витрату повітря:

$$\alpha = \frac{G_{\text{факт}}}{G_{\text{теор}}}$$

$$\alpha = \frac{G_{\text{факт}}}{G_{\text{теор}}} = \frac{\mu_{\text{пов}} S_{\text{прип}} \rho_{\text{пов}}}{\eta S_{\text{пож}} v_{\text{т}} v_{\text{пов}}^{\alpha} \rho_{\text{пов}}} = \frac{\mu_{\text{пов}}}{\eta v_{\text{т}} v_{\text{пов}}^{\alpha}} \frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{пож}}}$$

На початковій стадії пожежі горіння протікає за рахунок повітря, що знаходиться в об'ємі приміщення, і газообмін з навколишнім середовищем відсутній. При цьому якийсь час пожежа не обмежується ні по горючому навантаженню, ні по повітрообміну, але коефіцієнт надлишку повітря зменшується. З часом горіння інтенсифікується, енергія, що виділяється, йде на нагрів повітря, конструкцій і горючого матеріалу. На фазі об'ємного розвитку пожежі відбувається руйнування скління і в приміщення поступає свіже повітря. Коефіцієнт надлишку повітря починає збільшуватися. В період розвиненої пожежі витрата повітря в зоні горіння стабілізується, коефіцієнт надлишку повітря залишається практично незмінним.



При вигорянні горючого навантаження кількість повітря, що надходить у зону, залишається незмінною, а маса горючої речовини і площа горіння знижуються. Це призводить до збільшення коефіцієнта надлишку повітря. Температура в приміщенні знижується за рахунок охолодження надлишковим повітрям.

Висновок: Визначення рівня нейтральної зони в огороженні при пожежі необхідно для організації евакуації людей, роботи особового складу в зоні задимлення без використання індивідуальних засобів захисту.

§ 3. Визначення висоти нейтральної зони. Основи регулювання газообміну на пожежі.

Рух холодного повітря, що надходить в приміщення, і диму, що витікає із приміщення, підпорядковуються законам гідродинаміки.

Для виявлення загальних закономірностей газообміну при пожежі в огороженні приймемо деякі припущення:

1. Температура продуктів горіння в приміщенні вище, чим температура навколишнього повітря, і з часом температура продуктів горіння не змінюється.

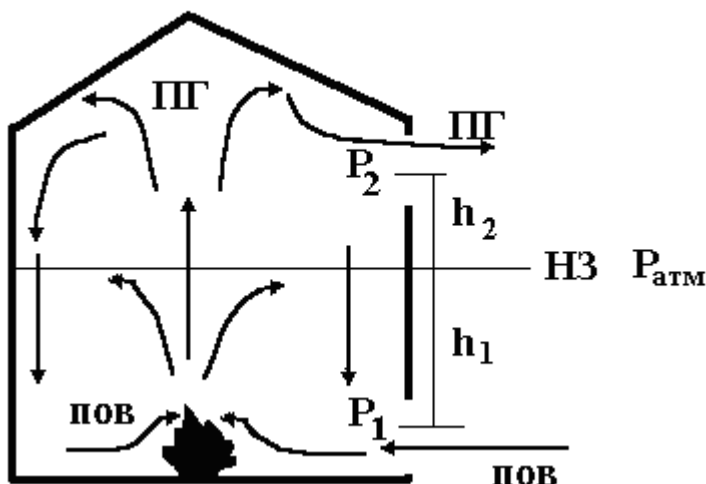
2. Вплив вітру на газообмін не враховуємо, вважаючи, що горіння протікає в безвітряну погоду.

3. Площа і розташування припливного і витяжного отвору не змінюється.

4. При газообміні маса вхідного повітря дорівнює масі вихідних продуктів горіння.

Насправді, процес пожежі практично не можна вважати стаціонарним, тому мова йде про той період розвинутої пожежі, коли її характеристики змінюються мало.

Позначимо через h_1 і h_2 відстані від нейтральної зони до центрів двох вентиляційних отворів.



У цьому випадку абсолютні значення надлишкових тисків у центрі нижнього і верхнього отвору можна визначити як

$$p_1 = p_{\text{атм}} - \rho_{\text{пов}} g h_1$$

$$p_2 = p_{\text{атм}} - \rho_{\text{пг}} g h_2$$

де $\rho_{\text{пов}}$ - густина холодного повітря, кг/м³;

$\rho_{\text{пг}}$ - густина диму, кг/м³;

g - прискорення вільного падіння, м/с²;

h_i - відстань від площини рівних тисків до центру i -го отвору, м;

Температура продуктів горіння завжди вище температури повітря в приміщенні і за його межами. Густина нагрітого газу обернено пропорційн залежить від його температури.

Сила, що призводить до виштовхування диму, може бути визначена із рівняння:

$$\Delta P = (\rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{пг}}) g h$$

Якщо прийняти площину нейтральної зони за точку відліку, то тиск у припливному і витяжному прорізі буде визначатися:

$$\Delta P_1 = (\rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{пг}}) g h_1$$

$$\Delta P_2 = (\rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{пг}}) g h_2$$

При наповненні продуктами горіння приміщення в нижніх і верхніх отворах з'являється гідростатичний тиск, що можна визначити як на рівні землі, так і на рівні верхнього отвору.

При цьому тиск в центрі верхнього отвору більше атмосферного, а тиск у центрі нижнього отвору – менше атмосферного.

Газові потоки створюють у цих отворах швидкісний напір, який визначається за рівнянням Бернуллі:

у припливному отворі:

$$\Delta P_{\text{припл}} = \frac{v_{\text{пов}}^2 \rho_{\text{пов}}}{2}$$

у витяжному отворі:

$$\Delta P_{\text{вит}} = \frac{v_{\text{пг}}^2 \rho_{\text{пг}}}{2}$$

де v - швидкість повітряного і газового потоку в отворах, м/с.

Провівши перетворення і відобразивши тиск в отворах через абсолютне значення тиску і через швидкісний напір:

$$h_i g (\rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{пг}}) = \frac{v_{\text{пг}}^2 \rho_{\text{пг}}}{2}$$

одержимо:

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{v_{\text{припл}}}{v_{\text{вит}}} \right)^2 \frac{\rho_{\text{пов}}}{\rho_{\text{пг}}}$$

Витрата повітря, що надходить через припливні отвори в приміщення дорівнює витраті продуктів горіння, що виходять із витяжних отворів. Фактична витрата газового потоку визначається як

$$G_{\text{г}} = \mu v_{\text{г}} S_{\text{отвору}} \rho_{\text{г}}$$

$$v_{\text{г}} = \frac{G_{\text{г}}}{\mu \rho_{\text{г}} S_{\text{отвор}}}$$

Підставивши у формулу значення швидкості газових потоків і провівши подальші перетворення, отримаємо вираження

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{вит}}} \right)^2 \frac{\rho_{\text{пов}}}{\rho_{\text{шт}}}$$

Таким чином, очевидно, що відстань від площини рівних тисків до центрів припливного і витяжного отвору обернено пропорційні квадратам площі даних отворів, а також густині повітря і продуктів згоряння.

Провівши перетворення цього рівняння можна вивести формулу для визначення відстані від центру приточного (або витяжного отвору) до площини рівних тисків. Тому що $h_1 = H - h_2$ ($H = h_1 + h_2$), можна записати:

$$h_1 = \frac{H}{\left(\frac{S_{\text{прит}}}{S_{\text{вит}}} \right)^2 \frac{\rho_{\text{пов}}}{\rho_{\text{шт}}} + 1}$$

З урахуванням висоти приточного отвору:

$$h_{\text{нз}} = \frac{H}{\left(\frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{вит}}} \right)^2 \frac{\rho_{\text{пов}}}{\rho_{\text{шт}}} + 1} + 0,5h_{\text{прип}}$$

де $S_{\text{прип}}$ - площа приточного отвору, м²;

$S_{\text{вит}}$ - площа витяжного отвору, м²;

$h_{\text{прип}}$ - висота приточного отвору, м.

У більшості випадків горіння в огородженнях тиск змінюється незначно, тому можна

вважати, що густина газу обернено пропорційна його температурі ($\rho = \frac{P}{RT}$), отже можна записати

$$h_{\text{нз}} = \frac{H}{\left(\frac{S_{\text{прип}}}{S_{\text{вит}}} \right)^2 \frac{T_{\text{шт}}}{T_{\text{пов}}} + 1} + 0,5h_{\text{прип}}$$

де $T_{\text{пов}}$; $T_{\text{шт}}$ - абсолютне значення температури повітря, що надходить, і димових газів, К.

Коли газообмін здійснюється через вентиляційні отвори, розташовані на одному рівні, нейтральна зона розташовується безпосередньо в площині двері або вікна, через які відбувається газообмін. При цьому вище нейтральної зони продукти горіння видавлюються назовні, а в нижній частині отвору відбувається підсос повітря в усередину приміщення. Аналогічні висновки в цьому випадку призводять до таких формул для розрахунку положення нейтральної зони:

$$h_{\text{нз}} = \frac{h_{\text{отвор}}}{1 + 3 \sqrt{\frac{T_{\text{шт}}}{T_{\text{пов}}}}}$$

де $h_{\text{отвор}}$ - повна висота отвору, через який здійснюється повітрообмін, м.

Масову витрату продуктів згоряння, що витікають із приміщення, можна визначити як:

- у випадку газообміну через один отвір:

$$G_{\text{шт}} = \frac{2}{3} \mu S_{\text{отв}} \sqrt{\frac{2gh_{\text{отв}}(\rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{шт}})\rho_{\text{в}}\rho_{\text{шт}}}{(\sqrt[3]{\rho_{\text{пов}}} - \sqrt[3]{\rho_{\text{шт}}})^3}}$$

- у випадку газообміну через два отвори:

$$G_{\text{шт}} = \mu S_{\text{припл}} S_{\text{вит}} \sqrt{\frac{2gH(\rho_{\text{пов}} - \rho_{\text{шт}}) \rho_{\text{пов}} \rho_{\text{шт}}}{S_{\text{припл}}^2 \rho_{\text{пов}} - S_{\text{вит}}^2 \rho_{\text{шт}}}}$$

де H – відстань по висоті між серединами отворів, м.

При організації бойових дій, а також для успішної евакуації людей із зони задимлення необхідно проводити заходи щодо регулюванню положення нейтральної зони в приміщенні.

Аналіз отриманих залежностей положення нейтральної зони показує, що положення площини рівних тисків буде тим вище, чим менший тиск продуктів горіння і більший тиск свіжого повітря, що надходить в приміщення. Отже, основними напрямками регулювання газообміну пожежі в огороженні можуть бути:

1. Зниження тиску у верхній частині приміщення, що горить, шляхом відкачки нагрітих продуктів згорання пересувними димососами і використання систем примусового видалення диму і вентиляції приміщень.

2. Підвищення ефективності процесу аерації приміщення за рахунок розкриття витяжних отворів у зоні, де створюється максимальна температура і тиск продуктів горіння. Для цього звичайно розкриваються димові й аераційні люки і ліхтарі у верхній частині приміщення.

У деяких випадках підрозділи роблять розкриття даху і перекриття для випуску диму і зниження температури.

3. Зниження температури й осадження продуктів горіння розпиленими і тонко розпиленими водяними струменями.

4. Регулювання співвідношення площ припливних і витяжних отворів. Нейтральна зона завжди розташовується ближче до тих отворів, площа котрих більше. Отже, при додатковому розкритті отворів у нижній частині приміщення, які працюють на приплив, і значному перевищенні їх над площею витяжних отворів нейтральна зона дещо опускається.

5. Підвищення тиску повітря в нижній частині приміщення, що призводить до підвищення рівня нейтральної зони. Такі дії виконуються шляхом нагнітання чистого повітря в нижню частину приміщення пересувними пожежними димососами.

6. Зміна напрямку прямування конвекційних димогазових потоків шляхом облаштування перемичок, перепон для поширення диму зі повітряно-механічної піни, встановлення протипожежних завіс і інших перепон.

Висновок: знання методів регулювання висоти нейтральної зони допомагає у розробці оперативних планів пожежогасіння, під час проведенні робіт по рятуванню людей із задимлених приміщень.

Розділ 5. Вогнегасні засоби

Загасити пожежу означає припинити процес горіння у всіх його видах, тобто створити в зоні горіння умови, що виключають можливість продовження процесу горіння в будь-якій формі. Існування горіння можливе лише за умов наявності горючого середовища та джерела запалення, яке має достатню енергію для ініціювання хімічної взаємодії. Параметрами, які характеризують наявність цих умов, є концентраційні межі поширення полум'я, температурні межі поширення полум'я, критичні значення енергії запалювання, граничні швидкості поширення процесів горіння, граничні значення температур зони горіння. Нижче граничних значень цих параметрів процес горіння існувати не може. В одному випадку, якщо горіння існувало — воно припиниться, в іншому — горіння просто не виникне.

Найбільше широко визнаною теорією припинення горіння є теплова теорія погасання, яка розроблена Д.А. Франк-Каменецьким і Я.Б. Зельдовичем.

Глава 1. Основи припинення горіння. Параметри пожежогасіння.

§ 1. Фізико-хімічні основи припинення горіння.

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

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

Відповідно до теплової теорії погасання задача припинення горіння зводиться до порушення теплової рівноваги в зоні горіння, тобто зміни співвідношення між тепловиділенням та теплопередачею $q(+) < q(-)$. При цьому відбувається зниження температури в зоні хімічної реакції нижче критичного значення. За більш низьких температур поширення горіння стає неможливим і пожежа припиняється.

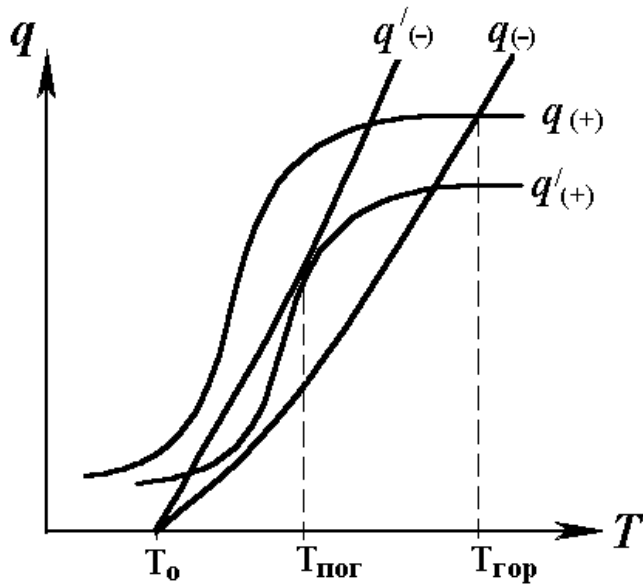
Температура, нижче якої горіння стає неможливим, прийнято називати температурою погасання. При зниженні температури в зоні горіння до температури погасання горіння припиняється навіть за наявності горючої речовини й окислювача, тобто зона реакції перестає бути постійно діючим джерелом запалення для вихідної горючої суміші.

Порушення теплової рівноваги в зоні горіння можна здійснити або зниженням інтенсивності тепловиділення в зоні реакції нижче граничного значення, або підвищенням інтенсивності тепловіддачі, або одночасним зниженням інтенсивності тепловиділення і підвищенням інтенсивності тепловіддачі доки температура в зоні реакції не знизиться до критичного значення — температури погасання.

Аналітично інтенсивність процесу тепловиділення для об'єму $V_{гс}$ у фронті полум'я в залежності від виду горючої речовини, її концентрації та температури полум'я виражається рівнянням:

$$q(+) = Q_H V_{гс} \Phi_{гп}^n \Phi_{ок}^m k_0 \exp\left(-\frac{E_{акт}}{RT_{ад}}\right)$$

За температур вище, ніж температура самоспалахування, поступово відбувається зниження концентрації реагентів внаслідок їхнього вигорання. Зарахунок цього швидкість хімічної реакції, а, отже, і інтенсивність тепловиділення при температурах близьких до температури горіння прагнуть не до нескінченності, як випливає з рівняння, а асимптотично наближаються до деякого максимального значення. Тому функція $q(+) = f(T)$ має точку перегинання.



Інтенсивність сумарного процесу тепловіддачі від поверхні фронту полум'я $S_{ТВ}$ буде визначатися променистою теплопередачею і передачею тепла конвекцією й описується рівнянням:

$$q(-) = \alpha S_{ТВ} (T_{гор} - T_0) + \sigma \epsilon S_{ТВ} (T_{гор}^4 - T_0^4)$$

При зовнішньому впливі на зону горіння можна змінити співвідношення між інтенсивністю тепловиділення і тепловіддачі так, що система перейде в положення, коли криві будуть мати дві спільні точки: точку торкання в області високих температур і точку перетинання в області низьких температур. В точці дотику (при $T = T_{пог}$) виконуються умови:

$$q(+)=q(-); \quad \left. \frac{dq(+)}{dT} \right|_{T_{пог}} = \left. \frac{dq(-)}{dT} \right|_{T_{пог}}; \quad \left. \frac{d^2 q(+)}{dT^2} \right|_{T_{пог}} < 0$$

Аналізуючи стан системи в точці торкання методом малих збурювань, переконуємося, що система знаходиться в хиткій рівновазі і незначне зниження температури на величину ΔT приводить до порушення теплового балансу і переходу системи в точку стійкої рівноваги в області низьких температур, тобто в області нескінченно повільного безполум'яного окислювання.

Точка дотику відповідає критичним умовам погасання за температури $T_{пог}$. Горіння припиняється за температур, які перевищують температуру самоспалахування горючої системи, тобто температура погасання вище, ніж температура самоспалахування. Це явище називається в теорії горіння гістерезисом температурної кривої погасання полум'я. Розходження між $T_{сс}$ і $T_{пог}$ пояснюється тим, що інтенсивність тепловіддачі $q(-)$ пропорційна градієнту температур (за умови виникнення горіння при самоспалахуванні $\Delta T = T_{сс} - T_0$, за умови припинення горіння $\Delta T = T_{гор} - T_{пог}$). При зниженні температури уздовж кривої інтенсивності тепловиділення від $T_{гор}$ рівність швидкостей тепловиділення і тепловіддачі буде досягатися при більш високому значенні $q(+)$ а, отже, при більш високій температурі (через залежність $q(+)\sim \exp(-E_{акт}/RT_{гор})$) у порівнянні з $q(-)$, при якому досягається рівність тепловіддачі і тепловиділення при виникненні горіння.

Порушення термодинамічної рівноваги системи відбувається при зниженні температури у зоні реакції горіння на деяку критичну величину ΔT .

У роботах Я.Б. Зельдовича отримано максимально можливий розмір зниження температури в залежності від режиму горіння:

для дифузійного полум'я:

$$\Delta T = \frac{3RT_{ад}^2}{E_{акт}}$$

для кінетичного полум'я:

$$\Delta T = \frac{RT_{ад}^2}{E_{акт}}$$

де $T_{ад}$ - адіабатична температура полум'я; $E_{акт}$ - енергія активації.

Середнє значення теоретичної температури полум'я складає близько 2000-2500 К в залежності від складу горючої речовини і режиму горіння, середнє значення енергії активації органічних речовин 125 000 Дж/ моль.

Отже можна визначити температуру, при якій відбувається порушення балансу і припинення дифузійного горіння, як:

$$T_{пог} = T_{ад} - \Delta T = 2400 - \frac{3 \cdot 8,314 \cdot 2400^2}{125000} \approx 1250\text{К}$$

Слід пам'ятати, що в реальних умовах пожежі через втрати тепла на випромінювання і з урахуванням недопалу горючої речовини, температура горіння може бути значно нижче. Так при горінні газів температура полум'я складає 1600-1800К, для горючих рідин 1500-1600К і для більшості твердих матеріалів 1400-1500К. Звідси очевидно, що реальна температура горіння на 40–45% нижче адіабатичної температур горіння і для досягнення температур погасання потрібно знизити температуру на

$$\Delta T(\%) = \frac{1550 - 1250}{1550} 100\% = 20\%$$

Висновок: Для припинення горіння на пожежі необхідно створити умови, при яких горіння стає неможливим - припинити контакт горючої речовини з окислювачем, а коли це неможливо, застосувавши засоби, що припиняють горіння, домогтися, зниження інтенсивності тепловиділення або збільшення тепловіддачі з зони протікання реакції горіння.

§ 2. Методи та способи припинення горіння.

Для гасіння пожежі необхідно на практиці реалізувати умови порушення енергетичного балансу в зоні горіння. При цьому можна використовувати різні методи, способи, та прийоми, що дозволяють знизити інтенсивність тепловиділення в зоні реакції, або збільшити інтенсивність тепловіддачі із зони реакції горіння, або і те й інше одночасно.

Розглянемо процеси, що призводять до припинення горіння. Отже, для припинення горіння існує два основних методи: перший – це зменшення тепловиділення в горючій системі $q(+)\downarrow$, другий – збільшення тепловіддачі від системи в навколишнє середовище $q(-)\uparrow$.

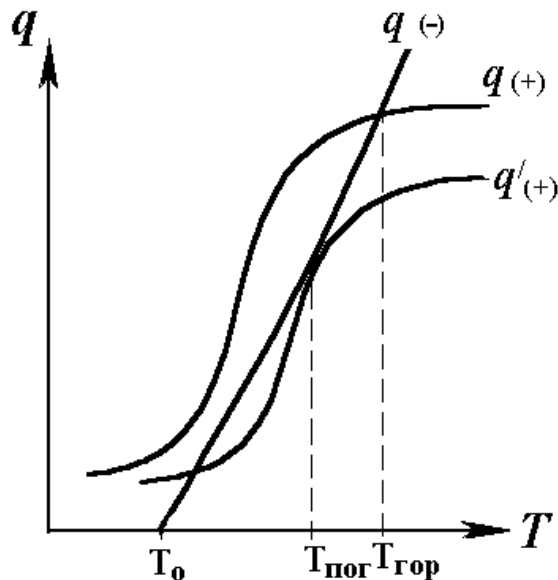
Аналізуючи складові рівняння тепловиділення реакції горіння, можна виділити кілька способів зменшення тепловиділення в горючій системі $q(+)\downarrow$.

По-перше, це зменшення концентрацій компонентів, що реагують, внаслідок зменшення швидкості надходження або повного припинення доступу окислювача чи горючої речовини в зону горіння.

На практиці цього можна досягти шляхом охолодження поверхні конденсованої горючої речовини нижче критичної температури, за якої відбувається газифікація рідких і твердих речовин через випаровування або розкладання, а також шляхом ізоляції одного із компонентів горючої суміші від зони горіння.

Для зменшення концентрацій реагуючих компонентів можна також використовувати спосіб розведення горючої суміші інертною речовиною. Це призведе до зменшення швидкості хімічної реакції і, отже, зменшення інтенсивності тепловиділення. Такий спосіб запобігання виникнення горіння називається флегматизацією.

Інший спосіб, що призводить до зниження швидкості хімічної реакції, це збільшення енергії активації горючої системи $E_{\text{акт}}$, що призведе до підвищення витрат енергії на підготовку та запалення горючої системи, і до повного припинення реакції. Речовини, які знижують реакційну спроможність компонентів суміші, називаються інгібіторами, і їхнє застосування дає високий ефект гасіння.

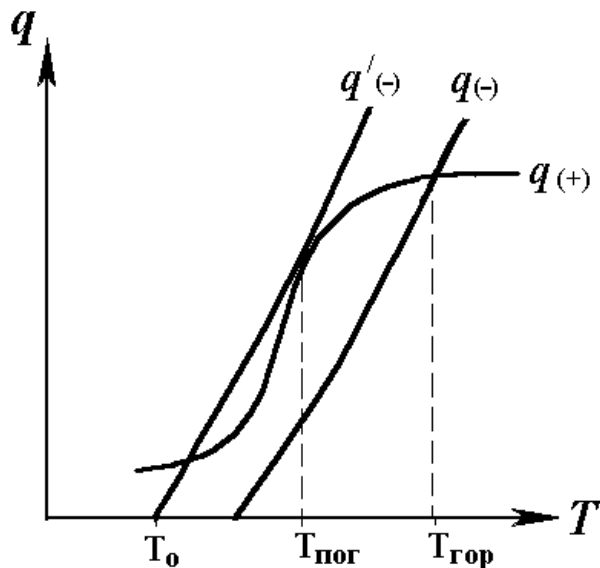


Виходячи з рівняння тепловіддачі, можна визначити наступні способи збільшення інтенсивності тепловіддачі $q(-)$, що призводять до припинення горіння:

- зниження температури середовища в зоні горіння;

На практиці цього можна домогтися шляхом охолодження зони горіння за допомогою речовин, які мають низьку початкову температуру (наприклад, рідкий азот або твердий вуглекислий газ, які застосовуються в криогенній техніці) або велику теплоту фазового переходу (наприклад, вода).

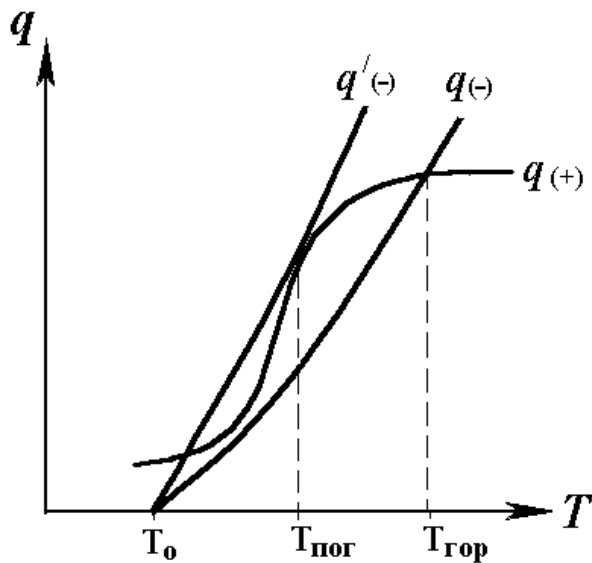
Зміна умов теплового балансу при застосуванні охолоджуючих вогнегасних засобів на графіку буде виглядати як рівномірний зсув лінії ліворуч.



- збільшення коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією і випромінюванням;

На практиці цього можна домогтися шляхом різкого збільшення швидкості надходження газової суміші в зону горіння (зрив полум'я) або підвищенням ступеня чорноти полум'я (введення в зону горіння спеціальних домішок, які мають велику випромінювальну здатність).

При цьому буде збільшуватися кут нахилу кривої тепловіддачі і наступить момент, коли з'являться дві точки теплового балансу зі стійким балансом в області низьких температур.



- збільшення площі тепловіддачі.

На практиці цього можна досягти шляхом застосування спеціальних пристроїв – вогнеперешкоджувачів, які розбивають горючу систему на сукупність малих об'ємів і при цьому різко збільшують площу тепловіддачі в стінки пристрою, або за рахунок внесення в зону горіння вогнегасних речовини з розвинутою поверхнею. Графічно збільшення $S_{ТВ}$ впливає також на кут нахилу кривої інтенсивності тепловіддачі.

Припинення горіння шляхом зміни теплового балансу в зоні горіння, що приводить до зниження температури в цій зоні до температури погасання, можна представити у виді схеми:

ПРИПИНЕННЯ ГОРІННЯ

зниження $q(+)$		підвищення $q(-)$		
зміна концентрації	хімічне гальмування	зниження температури в зоні	збільшення площі	підвищення коефіцієнтів

реагентів у зоні реакції	швидкості реакції (підвищення $E_{\text{акт}}$)	горіння	тепловіддачі	теплопередачі
розведення системи одним з компонентів чи припинення доступу іншого компонента	введення в зону реакції хімічно активних інгібіторів	введення в зону реакції речовин з високою теплоємністю та теплою фазового переходу	введення в зону горіння речовин із розвиненою поверхнею	збільшення випромінювальної здатності
введення інертних речовин				збільшення потужності конвекційних потоків (зрив полум'я)
зниження тиску				

При гасінні пожеж використовується відразу декілька механізмів одночасно, які приводять до зниження тепловиділення і до підвищення тепловіддачі. При цьому використовують наступні основні прийоми припинення горіння:

- охолодження зони горіння до температури погасання (за допомогою охолоджуючих вогнегасних засобів чи збільшення швидкості надходження компонентів газової суміші) чи охолодження поверхні горючих речовин і наступне охолодження будівельних конструкцій до безпечних температур;
- ізоляція реагуючих речовин (горючої речовини чи окислювача) від зони горіння;
- розведення горючої суміші негорючими компонентами до безпечних концентрацій (флегматизація);
- інгібування реакції горіння.

§ 3. Запобігання запалення речовин і матеріалів

Відповідно до закону "Про правові засади цивільного захисту" діяльність служби цивільного захисту "спрямовано на забезпечення безпеки та захист населення і територій, матеріальних і культурних цінностей та доквілля від негативних наслідків надзвичайних ситуацій" (Р.1., ст.3).

Пожежна безпека об'єктів забезпечується виконанням комплексу заходів щодо забезпечення:

1. запобігання виникнення пожежі;
2. протипожежний захист;
3. організаційно-технічні заходи.

Запобігання пожежі досягається запобіганням утворення горючого середовища і запобіганням утворення в горючому середовищі джерела запалювання. Це, в свою чергу, досягається підтримкою безпечних параметрів експлуатації речовин і матеріалів і технологічного процесу.

3.1. Запобігання виникнення горючого середовища

Відповідно до стандарту ГОСТ 12.1.044-89 "ССБТ Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов" запобігання утворення горючого середовища у виробничих приміщеннях, у технологічних апаратах при зберіганні, переробці і транспортуванні речовин необхідно підтримувати концентрацію горючої речовини, кисню або флегматизатора в повітряному просторі апаратів у безпечних межах.

Для парів і газів вибухобезпечними, з урахуванням коефіцієнтів безпеки є концентрації нижче нижньої безпечної і вище верхньої безпечної концентраційної межі поширення полум'я. Безпечні концентраційні межі розраховуються за формулами:

$$\varphi_{\text{н. без}} = 0,9(\varphi_{\text{н}} - 0,7R),$$

$$\varphi_{\text{в. без}} = 1,1(\varphi_{\text{в}} + 0,7R),$$

де R – значення показника (для нижньої межі дорівнює 0,3 %, а для верхньої – 0,6 %).

Отже, можна записати:

$$\varphi_{н. без} = 0,9(\varphi_{н} - 0,21)$$

$$\varphi_{в. без} = 1,1(\varphi_{в} + 0,42),$$

Забезпечення пожежовибухонебезпеки при використанні горючого пилю обумовлюється підтримкою робочої концентрації нижче:

$$\varphi_{н. без} = 0,9(\varphi'_{н} - 0,41\varphi'_{н}) = 0,54\varphi'_{н}$$

Для горючих і легко займистих рідин при їхньому використанні у відкритих технологічних апаратах пожежобезпечною є температура експлуатації нижче на 35°C температури спалаху рідини (в закритому тиглі):

$$t_{без} = t_{сп} - 35, \text{ } ^\circ\text{C}$$

Безпечною температурою, щодо можливості утворення вибухонебезпечної пароповітряної суміші, можна вважати температуру, при якій утвориться відповідна концентрація. Тоді безпечну температуру за рівнянням Антуана можна визначити як:

$$t_{н без} = \frac{B}{A - \lg(0,01\varphi_{н без} P_{заг})} - C_a$$

$$t_{в без} = \frac{B}{A - \lg(0,01\varphi_{в без} P_{заг})} - C_a$$

Розрахунок по даній методиці більш вірний, ніж за спрощених формул, але достатньо громіздкий, тому для полегшення роботи можна користуватися раніше запропонованою методикою визначення безпечних температурних меж поширення полум'я при експлуатації закритого технологічного устаткування з рідинами.

$$t_{н без} = 0,9(t_{н} - K),$$

$$t_{в без} = 1,1(t_{в} + K),$$

де K - коефіцієнт безпеки рівний для чистих речовин і нафтопродуктів 10,5°C, а для реакційних сумішей 14°C.

Для забезпечення пожежної безпеки технологічного устаткування пароповітряний простір можна заповнювати інертними газами - флегматизаторами.

Мінімальна флегматизуюча концентрація - найменша концентрація негорючого газу в суміші з горючим і окислювачем, при якій суміш стає нездатною до поширення полум'я при будь-якому співвідношенні горючого й окислювача.

$$\varphi_{фл}^0 = 100 \frac{h'_f H_f + h'_\phi + \sum h'_j m_j}{h''_\phi - 1 + \sum h''_j m_j}, [3].$$

Мінімальний вибухобезпечний вміст кисню, нижче за який вже не можливо запалення парів або газів, визначається за формулою:

$$\varphi_{мвкк}^0 = \frac{100 - \varphi_{фл}^0}{4,84}, \%$$

де $\varphi_{фл}$ - концентрація газу-розріджувача, що флегматизує, %.

Умова безпеки процесу буде дотримуватися при утриманні кисню в пароповітряному просторі не більше, ніж:

$$\varphi_{O_2 безп} \leq 0,9(\varphi_{O_2 мвкк} - 0,7R),$$

або флегматизатора не менше, ніж:

$$\varphi_{min фл} \geq 1,1(\varphi_{фл} + 0,7R),$$

3.2. Запобігання виникнення джерел запалювання в горючому середовищі

Запобігання запалення горючого середовища джерелами запалювання всіх груп виконується дотриманням пожежно-профілактичних заходів.

Виходячи із визначення джерела запалювання, можна сказати, що не всякий тепловий імпульс може вважатися джерелом запалювання, а тільки той, що має достатню температуру і запас енергії не менше мінімальної енергії запалювання.

Можливість запалення відсутня, якщо:

· температура теплового імпульсу (поверхні нагрітого тіла) менше ніж

$$t_{без} \leq 0,8 t_{сс},$$

· запас енергії електричного розряду менше ніж

$$E_{без} \leq 0,4 E_{min}$$

· температура середовища менша, ніж температура самонагрівання, а час нагріву менше, ніж період індукції:

$$\lg t_{сн} = A_p + n_p \lg S_{пит},$$

$$\lg t_{сн} = A_b - n_b \lg t_{инд}.$$

§ 4. Поняття і загальні вимоги до вогнегасних засобів.

Загасити пожежу з фізичної точки зору означає припинити процес горіння у всіх його видах, тобто створити в зоні горіння умови, що виключають можливість продовження процесу горіння в будь-якій формі. На практиці для припинення горіння використовують різні способи і засоби пожежегасіння.

Спосіб пожежегасіння – це тактичний прийом, що використовується для припинення горіння.

Засіб пожежегасіння – це речовини або пристрої, які використовуються для припинення горіння на пожежі.

По домінуючому механізму припинення горіння (зовнішньому впливу на горючу систему) можна виділити наступні прийоми гасіння:

1. охолодження

1.1. охолодження зони горіння до температури менше, ніж температура погасання;

1.2. охолодження поверхні горючої речовини, що знаходиться в конденсованому стані, до температури менше за критичну (для рідини - температура спалаху, для ТГМ – температура піролізу).

2. розбавлення

2.1. розбавлення зони горіння інертними розріджувачами;

2.2. розбавлення горючих речовин рідин негорючими (горючі рідини розбавляють водою або CCl_4).

3. ізоляція

3.1. ізоляція горючої речовини від зони горіння;

3.2. ізоляція окислювача від зони горіння;

3.3. ізоляція зони горіння як джерела запалювання від горючої суміші (зрив полум'я).

4. хімічне гальмування реакції горіння

Поняття способу пожежегасіння включає в себе не тільки механізм припинення горіння, але і тактичні особливості подачі вогнегасного складу в зону горіння. Розрізняють об'ємний і поверхневий спосіб гасіння.

При виникненні горіння в умовах обмеженого повітрообміну можна використати спосіб об'ємного гасіння, при якому вогнегасні засоби подаються всередину захищеного об'єму і при цьому розбавляють горюче середовище або витісняють повітря із приміщення або апарату.

При гасінні пожежі на відкритому просторі застосування вогнегасних засобів об'ємного гасіння малоефективне, тому в даному випадку використовують переважно поверхневий спосіб гасіння, коли вогнегасна речовина подається на поверхню горючої речовини. Це можливе лише в тому випадку, коли горюча речовина знаходиться в конденсованому стані.

Основними засобами гасіння пожеж є вогнегасні речовини.

Під вогнегасними речовинами розуміють такі речовини, які можуть безпосередньо впливати на процес горіння і створюють умови для його припинення, або попередження процесу виникнення горіння.

Речовин, які здатні впливати на процес горіння багато, але не кожна з них використовується для гасіння пожеж. Вогнегасні речовини повинні відповідати певним вимогам, до яких можна віднести:

- висока вогнегасна ефективність;
- екологічна безпека речовини і відсутність шкідливих побічних впливів при застосуванні як для людей, так і для технологічного обладнання;
- простота і зручність транспортування і подачі в осередок пожежі;
- можливість тривалого зберігання без зміни властивостей;
- доступність і відносна необмеженість запасів речовини;
- економічність (дешевизна).

Іноді вогнегасні речовини не відповідають всім вимогам, але великі переваги в деяких інших пунктах обумовлюють застосування цих речовин в практиці пожежегасіння. Наприклад, хладони, що інгібують процес горіння, достатньо екологічно небезпечні (негативно впливають на озоновий шар Землі), але їх висока вогнегасна ефективність обумовлює їх подальше використання в системах пожежегасіння літаків, атомних станцій, ракетної техніки, об'єктів військової промисловості.

В пінному пожежегасінні досить широко використовують високоефективні плівкоутворюючі піноутворювачі, незважаючи на їх високу вартість.

В нашій країні найчастіше використовують для гасіння пожежі воду та різноманітні водні розчини завдяки тому, що ці засоби достатньо дешеві, мається необмежений запас і вони екологічно безпечні, незважаючи на їх невисоку ефективність гасіння.

Так протягом 2002 року на Україні основною вогнегасною речовиною залишалася вода, яка для гасіння пожеж використовувалася 47153 рази, що складає 97,5% від загальної кількості використання вогнегасних речовин. Піна використовувалася 758 раз, що складає 1,6%. Найменше використовується через дороговизну та вузьке застосування газові та газоаерозольні засоби гасіння (0,05%). Серед первинних засобів пожежегасіння безперечним лідером є вода, що подавалася на гасіння підручними засобами – 14357 разів (83,1% від загальної кількості пожеж, які гасилися первинними засобами пожежегасіння), далі йдуть порошкові вогнегасники – 660 разів (3,8%), вуглекислотні вогнегасники – 353 разів (2,0%), пінні вогнегасники – 92 разів (0,5%), вогнегасники газоаерозольні – 23 разів (0,1%), вогнегасники хладонові – 7 разів (0,04%).

В основу класифікації вогнегасних засобів покладено декілька ознак.

За агрегатним станом всі вогнегасні засоби поділяють на

- газові (інертні газові розріджувачі, продукти вибуху, деякі хладони),
- рідкі (вода, водні розчини, водо-пінні засоби),
- тверді (вогнегасні порошки);
- газоаерозольні (аерозолеутворюючі склади).

За домінуючим впливом, який чинить вогнегасна речовина на горючу систему в процесі припинення горіння, всі вогнегасні речовини можна розділити на чотири класи: вогнегасні речовини, що розбавляють, ізолюють, охолоджують і інгібують.

Ізолюючі вогнегасні речовини у разі конденсованих горючих речовин ізолюють їх поверхню і запобігають утворенню небезпечних концентрацій горючої речовини в газовій фазі (знижують інтенсивність процесу переходу речовини в газову фазу).

Розбавляючі вогнегасні речовини при введенні в газову систему знижують концентрації компонентів горючої суміші, або при введенні в горючу рідину зменшують концентрацію горючої пари в зоні горіння.

Вогнегасні речовини, що інгібують, різко підвищують енергію активації реакції окислення між компонентами горючої суміші.

Вогнегасні речовини, що охолоджують, знижують температуру зони горіння або охолоджують поверхню конденсованої речовини, при цьому знижують швидкість його випаровування або розкладання і тим самим запобігають утворенню горючої суміші.

При подачі практично будь яких вогнегасних засобів в зону горіння вони спричиняють комбіновану дію: охолоджують зону реакції горіння, розбавляють горючу суміш (зменшують концентрації горючої речовини і окислювача), частково проводять ізоляцію і в деяких випадках навіть безпосередньо впливають на швидкість хімічної реакції між компонентами, але при цьому одна з дій переважає над усіма іншими. Віднесення речовини до тих або інших вогнегасних засобів залежить від прийомів і способів його використання. Наприклад, діоксид вуглецю при подачі в твердому вигляді може охолоджувати, а при подачі у вигляді газу той же діоксид вуглецю виступає розріджувачем. Така речовина як вода при її подачі компактними струменями впливає на зону горіння як охолоджуючий вогнегасний засіб, при її подачі у вигляді пари або дрібно розпилених струменів виступає як розріджувач, а при створенні на поверхні горючого матеріалу водяної плівки і як ізолюючий вогнегасний засіб.

§ 5. Вибір засобів і способів гасіння пожежі.

Вибір способу гасіння пожежі і вогнегасного засобу залежить від фізико-хімічних властивостей речовини, що горить, умов і особливостей розвитку горіння на пожежі при обов'язковому врахуванні ефективності використання вогнегасного засобу.

Передусім, потрібно врахувати, що забороняється застосовувати вогнегасні речовини, які можуть:

1. Реагувати з горючими речовинами і підтримувати процес горіння. Наприклад, діоксид вуглецю підтримує процес горіння металів і тому не може бути використанні як вогнегасний засіб для даного класу пожеж.

2. Реагувати з іншими речовинами із виділенням горючих продуктів реакції. Наприклад, вода при взаємодії з карбідами може реагувати із виділенням ацетилену C_2H_2 , який в свою чергу є пожежо- та вибухонебезпечним газом. При попаданні води на азид свинцю відбувається його вибух.

Вибір засобів гасіння залежить від фізико-хімічних властивостей речовини, що горить, та режиму горіння.

При гомогенному горінні можна використовувати всі типи вогнегасних речовин, і в цьому випадку потрібно орієнтуватися лише на вид самої горючої речовини. А при гетерогенному горінні, яке протікає на поверхні горючої речовини, потрібно застосовувати вогнегасні речовини, що ізолюють або охолоджують.

Визначальною умовою вибору вогнегасного засобу є клас пожежі.

При гасінні пожеж класу А прийнятні всі види вогнегасних речовин і всі способи припинення горіння, але найбільший ефект дає застосування методу охолодження зони горіння із використанням води та водних розчинів.

На пожежах класу В, коли горять горючі рідини, застосування компактних струменів води малоефективне через те, що вогнегасна речовина практично відразу занурюється під шар горючої рідини. Охолоджувати зону горіння іншими речовинами даного типу вогнегасних засобів при великих площах горіння важко із чисто технічних причин. Тому найбільш поширеним способом припинення горіння є ізоляція із застосуванням всіх видів піни. Далі, виходячи із частоти застосування у практиці гасіння, стоять хімічне гальмування реакції горіння і розбавлення концентрації компонентів в зоні реакції горіння.

Пожежі класу С гасити способом ізоляції практично неможливо. Подача охолоджуючих засобів - води або діоксиду вуглецю дає ефект тільки при великих витратах вогнегасного засобу, що пояснюється малим часом контакту речовини із зоною горіння і складністю подачі. З цієї причини найбільш ефективними способами припинення горіння є розбавлення реагуючих

компонентів струменями негорючих газових сумішей і інгібування хімічної реакції різними складами.

При гасінні пожеж класу D виходячи із особливостей горіння металів і металоорганічних сполук застосування вогнегасних засобів на основі води неприпустиме. Метали горять в атмосфері діоксид вуглецю і утворюють із азотом вибухонебезпечні нітросполуки, тому найбільш прийнятний спосіб припинення горіння – це ізоляція за допомогою вогнегасних порошків спеціального призначення.

Для гасіння пожежі класу E (електроустановок під напругою) вода та водо-пінні засоби гасіння також непридатні, але з іншої причини – електропровідність розчинів. Знизити концентрацію горючих речовин також важко. Отже, виходячи з цього, застосовується спосіб охолодження але твердою вуглекислою, або хімічне гальмування горіння інгібіторами, або зниження концентрації окислювача в закритому об'ємі за рахунок введення негорючих газів.

Клас пожежі	режим горіння	Вогнегасний засіб, що рекомендується
A	Гомогенне, гетерогенне	Всі види вогнегасних засобів, (найбільш ефективно використання охолоджуючих засобів)
B	Гомогенне	Всі види вогнегасних засобів, (найбільш ефективно використання вогнегасних пін)
C	Гомогенне	Всі види вогнегасних засобів, крім ізолюючих пін та порошків спеціального призначення (найбільш ефективно використання інгібіруючих вогнегасних речовин та компактні струмені води для відриву зони горіння)
D	Гомогенне, гетерогенне	Вогнегасні порошки спеціального призначення
E	Гомогенне, гетерогенне	Розбавлюючі і інгібіруючі вогнегасні засоби

Висновок: успіх гасіння пожежі залежить від правильного вибору вогнегасного засобу і способу припинення горіння.

§ 6. Загальні закономірності пожежегасіння

Для визначення показників роботи підрозділів при гасінні пожежі, правильності вибору вирішального напрямку, вибору вогнегасного засобу, прийомів і способів його подачі використовують основні параметри процесу гасіння пожежі. Такими показниками є час гасіння, вогнегасна ефективність та інтенсивність подачі вогнегасної речовини, питома витрата та загальна витрата вогнегасної речовини. Всі параметри пожежегасіння взаємопов'язані між собою.

Час гасіння $t_{гас}$ – час від початку подачі вогнегасної речовини до припинення горіння.

Вогнегасна ефективність E – величина обернена до вогнегасної концентрації, найменшої концентрації вогнегасної речовини, за якої досягається процес припинення горіння.

$$E = \frac{1}{\Phi_{вогн}}$$

Чим менша вогнегасна концентрації речовини, тим більша її ефективність. Чим менша вогнегасна ефективність засобу, тим більший час гасіння та загальна витрата речовини.

Загальна кількість вогнегасної речовини m – кількість вогнегасного засобу, що подається за час гасіння пожежі на загальну площу пожежі або в об'єм приміщення.

Інтенсивність подачі I – кількість вогнегасного засобу, що подається в одиницю часу на одиницю розрахункового параметра пожежі (фронт, площі пожежі або об'єму приміщення, в

якому відбувається пожежа). Виходячи з цього, розрізняють лінійну інтенсивність подачі [$\text{л} \times \text{м}^{-1} \times \text{с}^{-1}$], поверхневу [$\text{л} \times \text{м}^{-2} \times \text{с}^{-1}$] і об'ємну [$\text{л} \times \text{м}^{-3} \times \text{с}^{-1}$].

$$I = \frac{m}{\Pi_{\text{пож}} \tau_{\text{гас}}}$$

де m – загальна кількість вогнегасної речовини, л, кг, м^3 ;

$\Pi_{\text{пож}}$ – величина параметра пожежі, (периметр Π , [м], площа $S_{\text{пож}}$, [м^2], об'єм приміщення $V_{\text{прим}}$, [м^3]);

t – час проведення гасіння пожежі, хв., с.

Загальна витрата G – кількість вогнегасної речовини, що було витрачено під час гасіння пожежі на одиницю розрахункового параметра пожежі.

$$G = \frac{m}{\Pi_{\text{пож}}}, \text{ (л, кг, м}^3\text{)/(м}^2\text{, м}^3\text{)}.$$

Питома витрата – кількість вогнегасного засобу, що витрачається в одиницю часу на гасіння розрахункового параметра пожежі.

$$g = \frac{m}{\tau_{\text{гас}}}, \text{ (л, кг, м}^3\text{)/с}$$

З цих формул можна отримати наступні співвідношення:

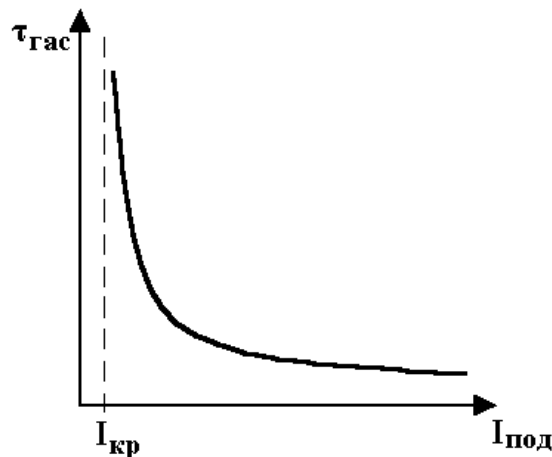
$$I = \frac{G}{\tau_{\text{гас}}} \text{ або}$$

$$G = I \cdot \tau_{\text{гас}} \text{ або}$$

$$I = \frac{g}{\Pi_{\text{пож}}}$$

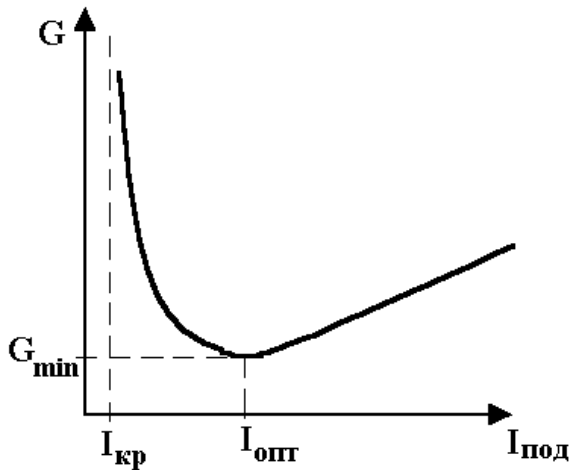
$$g = I \cdot \Pi_{\text{пож}}$$

Витрата вогнегасного засобу залежить від часу гасіння і інтенсивності його подачі. При малій інтенсивності подачі час гасіння збільшується, при зростанні інтенсивності подачі – час гасіння зменшується. Існує критична інтенсивність подачі, при якій гасіння не буде досягнуто ніколи (час гасіння наближається до нескінченності).



Чим більше розрахунковий час гасіння, тим менше інтенсивність подачі вогнегасного засобу.

Залежність загальної витрати від інтенсивності подачі вогнегасної речовини має більш складний характер, який можна зобразити на графіку:



Для різних видів вогнегасних засобів характер зміни питомої витрати від інтенсивності подачі зберігає подібну залежність. Це дозволяє говорити про існування оптимального часу і оптимальної інтенсивності подачі вогнегасного засобу для гасіння пожежі, при яких витрати вогнегасної речовини будуть мінімальними.

Інтенсивність подачі вогнегасного засобу може визначатися або при теоретичному аналізі умов припинення горіння, або дослідним шляхом і розрахунком або при аналізі загашених пожеж. Інтенсивність подачі вогнегасного засобу, яка отримана при аналізі теоретичних умов припинення горіння, називається теоретичною. На основі вивчення загашених пожеж отримані узагальнені значення інтенсивності подачі вогнегасної речовини, які зведені в таблиці нормативних документів і довідників (довідник КГП). Такі інтенсивності прийнято називати нормативною інтенсивністю подачі вогнегасної речовини.

Відношення теоретичної інтенсивності подачі вогнегасної речовини до фактичної називається коефіцієнтом використання $K_{\text{вик}}$.

$$K_{\text{вик}} = \frac{I_{\text{теорет}}}{I_{\text{факт}}}$$

Фактична витрата вогнегасної речовини складається з необхідної витрати для гасіння і втрат.

$$g_{\text{факт}} = g_{\text{необх}} + g_{\text{втрат}}$$

У тому випадку, коли втрати відсутні, і всю вогнегасну речовину затрачено на припинення горіння, фактична інтенсивність подачі повинна дорівнювати теоретичній. Але на практиці цього досягти неможливо, оскільки неможливо реалізувати всі вогнегасні дії речовини.

Фактична інтенсивність подачі і загальна витрата вогнегасного засобу може в деякій мірі служити оцінкою роботи КГП і пожежних підрозділів в порівнянні з гасінням подібних на вид і клас пожеж.

Відношення фактичної витрати вогнегасного засобу до нормативної, називається коефіцієнтом втрат $K_{\text{втр}}$.

$$K_{\text{втр}} = \frac{I_{\text{факт}}}{I_{\text{норм}}}$$

Таким чином, можна сказати, що при хорошому гасінні пожежі фактична витрата вогнегасного засобу повинна дорівнювати нормативній.

При поверхневому гасінні пожеж як критерій ефективності можна прийняти відношення інтенсивності подачі вогнегасного засобу до масової швидкості вигорання речовини

Висновок. Визначення класу пожежі та вибір вогнегасних засобів, що найбільш влаштовує, може стати вирішальним при гасінні пожежі. Тому рекомендації щодо вибору вогнегасної речовини враховуються при розробці оперативних планів пожежегасіння, та при проведенні пожежно-профілактичної роботи на об'єктах.

Глава 2. Припинення горіння охолодженням

У практиці пожежогасіння найчастіше застосовують припинення горіння із використанням охолоджуючих вогнегасних засобів. За статистичними даними майже 90% всіх пожеж гаситься за допомогою води або вогнегасних складів на основі води. Вода надійна і ефективна при гасінні пожеж, пов'язаних із горінням речовин в усіх агрегатних станах.

Теоретичне обґрунтування вогнегасної дії води дає можливість правильно використовувати її на пожежі, визначати шляхи підвищення ефективності використання води як вогнегасного засобу.

§ 1. Механізм припинення горіння охолодженням

Припинення горіння охолодженням ґрунтується на зниженні температури в зоні реакції горіння до температури погасання за рахунок:

- охолодження зони горіння;
- охолодження поверхні конденсованої горючої речовини.

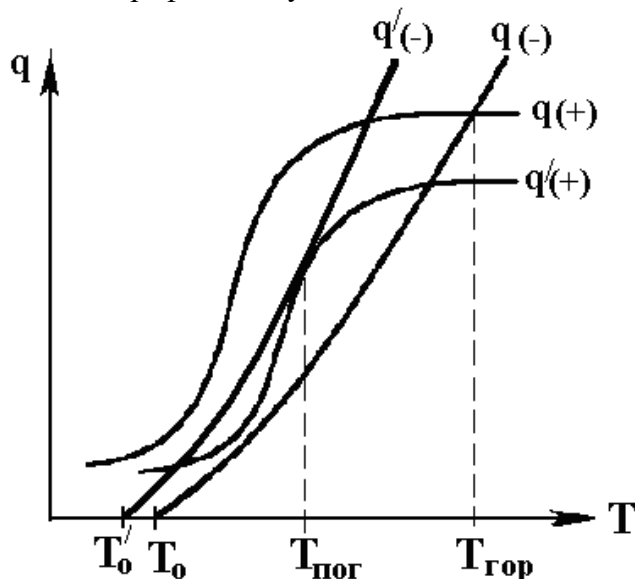
Як було доведено в роботах Я.Б. Зельдовича, критична температура в зоні реакції при гомогенному дифузійному горінні настає при зниженні температури на величину $\Delta T = 3RT_{ад}^2/E_{акт}$.

$$T_{пог} = T_{ад} - 3 \frac{RT_{ад}^2}{E_{акт}}$$

де $T_{ад}$ - адиабатична температура горіння;

$E_{акт}$ - енергія активації горючої системи.

При цьому швидкість реакції знижується, стає менше граничного значення, за яким процес горіння припиняється. Отже, при температурах нижче за температуру погасання горіння стає неможливим. Графічно ця умова визначається таким чином:



При зниженні температури середовища навколо зони горіння крива залежності тепловіддачі від температури зміщується до початку координат, або при підвищенні площі та коефіцієнту тепловіддачі від реакційної системи збільшується кут нахилу тепловіддачі. При цьому в системі виникає нестійка тепла рівновага, при якій найменше зниження температури приводить до порушення теплового балансу. Система переходить в область низьких температур, реакція горіння припиняється.

Отже, якщо охолоджується зона горіння, наприклад, при горінні газів або пароповітряних сумішей умовою припинення горіння є співвідношення:

$$T_{зг} < T_{пог},$$

де $T_{зг}$ – температура в зоні горіння, К;

$T_{пог}$ – температура погасання, К.

Виконати цю умову можна, якщо забезпечити певну інтенсивність тепловідведення із зони реакції горіння. Необхідну інтенсивність тепловідведення із зони горіння можна оцінити вираженням:

$$q_{відв.зг} > \sum c_{р_{пгi}} g_{пгi} (T_{гор} - T_{пог})$$

де $q_{відв.зг}$ – інтенсивність тепловідведення від зони горіння, кДж×с⁻¹;

$c_{р_{пгi}}$ – питома теплоємність компонентів продуктів згоряння, кДж м⁻³ К⁻¹;

$g_{пгi}$ – об'ємна витрата кожного з компонентів продуктів згоряння, що утворюються, м³×с⁻¹;

$$g_{пгi} = V_{пгi} g_{гi}.$$

Для більшості вуглеводнів дійсна температура горіння становить 1300-1500 К. Якщо вважати, що початкова температура горючої системи складала 300 К, то можна вважати, що температура системи підвищилась на 1200 К. На це підвищення температури витрачається приблизно 60% загального тепла Q_H , яке виділяється при горінні даної горючої речовини (із урахуванням тепловтрат у навколишнє середовище за рахунок променистої теплопередачі). Температура погасання більшості вуглеводнів складає приблизно 1000°C (або 1200-1300 К), отже для припинення горіння методом охолодження зони горіння потрібно знизити температуру полум'я приблизно на 200°C, або на $(200/1200) \times 100\% = 17\%$. Таким чином, для того щоб припинити горіння від зони реакції потрібно відвести

$$0,17 \times 0,6 Q_H = 0,1 Q_H.$$

$$T_{гор} = 1500\text{К}$$

$$T_0 = 300\text{К}$$

$$\Delta T = 1200\text{К} - 60\%Q_H$$

$$T_{гор} = 1500\text{К}$$

$$T_{пог} = 1300\text{К}$$

$$\Delta T = 200\text{К} - x\%Q_H$$

$$x = \frac{200 - 60\%Q_H}{1200} = 10\%Q_H$$

Оскільки для більшості вуглеводнів теплота згоряння приблизно становить $(40-50) \times 10^3$ кДж×кг⁻¹, то питома кількість відведеної енергії становить:

$$q_{відвед} \approx 0,1Q'_H = 0,1(40000 \div 50000) = 4000 \div 5000, \text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}.$$

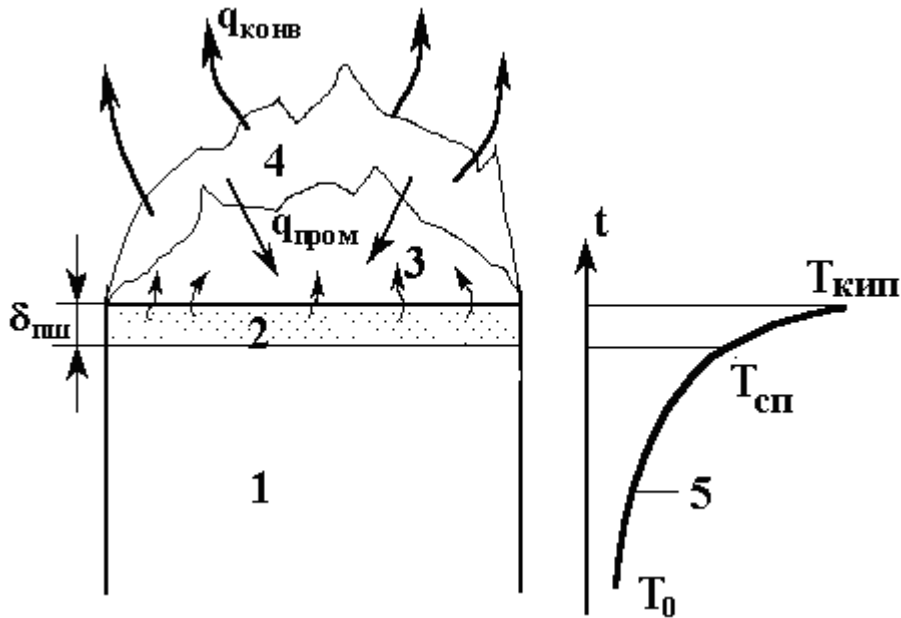
Однак потрібно зазначити, що при полум'яному горінні охолодити безпосередньо зону горіння, яка являє собою тонкий рухливий шар газу, практично неможливо. Тому на пожежі використовують інший метод гасіння – охолодження поверхні конденсованої речовини, що горить, нижче критичної температури.

Розглянемо механізм припинення процесів горіння за допомогою охолодження поверхні горючих речовин і матеріалів.

При дифузійному горінні горючої рідини надійного ефекту гасіння можна досягти тільки після того, як температура поверхневого шару стане меншою, ніж температура спалаху горючої рідини:

$$t_{пш ГР} < t_{сп}.$$

При цьому інтенсивність надходження парів в зону горіння знизиться, концентрація зменшиться менше, ніж ϕ_H .



- 1 – горюча рідина;
- 2 – поверхневий шар, прогрітий вище за температуру спалаху, товщиною $\delta_{пш}$;
- 3 – суміш горючих газів, які утворюються в процесі випаровування;
- 4 – факел полум'я;
- 5 – еюра полю температур в рідині при сталому горінні.

Однак, для припинення горіння рідин необхідно не тільки охолодити її поверхневий шар до температури менше $t_{сп}$, але також і компенсувати тепло, що весь час підводиться до поверхні рідини випромінюванням із зони горіння під час гасіння. Ця умова реалізовується, якщо буде відведено:

$$Q_{відв. рід} \geq q_{пром} \tau_{гас} + Q_{зап. рід}$$

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

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

$\tau_{гас}$ – час гасіння, с;

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

Кількість тепла, що запасена шаром рідини, можна визначити як:

$$Q_{зап} = c_{р гр} \rho_{гр} \delta_{пш гр} (t_{кип} - t_{сп})$$

де $c_{р гр}$ – теплоємність рідини, $\text{кДж} \times \text{кг}^{-1} \times \text{К}^{-1}$;

$\rho_{гр}$ – густина рідини, $\text{кг} \times \text{м}^{-3}$;

$\delta_{пш гр}$ – товщина прогрітого шару рідини, біля 0,005 м;

$t_{сп}$ – температура спалаху рідини, $^{\circ}\text{C}$

$t_{кип}$ – температура кипіння рідини, $^{\circ}\text{C}$.

Для припинення гомогенного дифузійного горіння ТГМ можна зробити подібний аналіз умов припинення горіння. Враховуючи, що основна маса газоподібних продуктів попадає в зону реакції горіння при термічному піролізі матеріалу, умову припинення їх виходу можна записати як:

$$t_{пш ТГМ} < t_{пір}$$

де $t_{ТГМ}$ – температура поверхневого шару матеріалу, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{пір}$ – температура початку піролізу матеріалу, $^{\circ}\text{C}$.

Враховуючи, що нагрів твердого горючого матеріалу відбувається як за рахунок променистого, так і за рахунок конвекційного теплообміну, умову охолодження поверхневого шару можна записати як

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

де $q_{\text{кон}}$ - інтенсивність конвекційного теплового потоку до поверхні горючої речовини, кДж/(м² с).

$$Q_{\text{зап}} = c_{p \text{ тв}} \rho_{\text{тв}} \delta_{\text{шл тв}} (t_s - t_{\text{гпр}})$$

де t_s - температура поверхневого шару матеріалу, °С

Крім того, при охолодженні речовин, що горять деяка кількість вогнегасних засобів випаровується і переходить в пару, завдяки чому відбувається розбавлення зони горіння негорючими компонентами і підвищується швидкість гасіння.

Вогнегасною речовиною охолоджуючої дії може бути будь-яка речовина, що відповідає загальним вимогам і що має високу теплоємність в первинному стані, низьку температуру випаровування або сублімації, велику теплоту фазових переходів і термічну стійкість в діапазоні температур горіння речовин.

Найбільш відповідає цим вимогам вода, твердий діоксид вуглецю і зріджений азот.

Вода, як охолоджуючий ВЗ.

Потрапляючи в зону горіння або на поверхню палаючої речовини, вода віднімає велику кількість теплоти. При цьому вона частково випаровується, завдяки чому відбувається розбавлення реагуючих речовин і витіснення повітря із осередку пожежі. Крім того, розтікаючись по поверхні матеріалу, вода ізолює поверхню від дії променистого тепла, перешкоджає виходу горючих пар і газів.

Факторами, що зумовлюють переваги води як вогнегасного засобу, є:

- абсолютна екологічна чистота вогнегасної речовини;
- відсутність шкідливого впливу на людей, що перебувають в приміщенні, яке захищається;
- доступність і дешевизна,
- простота зберігання і застосування,
- легкість транспортування води і доставки її в зону горіння (у вигляді компактних струменів) завдяки високій рухливості і малому стисненню;
- термічна стійкість, що набагато перевищує термічну стійкість інших негорючих рідин,
- поглинання теплового випромінювання (захисні екрани);
- адсорбційна здатність води при димоосажденні, що має першорядне значення для забезпечення безпечної евакуації людей з приміщень.
- деякі горючі рідини, змішуючись із водою, утворюють негорючі або менш горючі розчини.

Вода є надійним вогнегасним засобом, але у неї є недоліки, через які її застосування для гасіння іноді є малоефективним або неможливим. До негативних можна віднести такі властивості як:

- порівняно висока реакційна здатність води, що обумовлює неможливість її використання для гасіння речовин, із якими вода здатна реагувати, зокрема для гасіння металів, температура горіння яких вище за температуру дисоціації води;
- електропровідність води, особливо водних розчинів, що обумовлює неможливість використання води для гасіння електроустановок під напругою.
- порівняно мала в'язкість води через що вода швидко стікає з поверхонь, що горять.
- високий коефіцієнт поверхневого натягнення, що ускладнює проникнення води углиб матеріалу, погано змочує ТГМ і особливо волокнисті матеріали.
- мала питома площа контакту компактних струменів із факелом полум'я, що знижує ефективність охолодження зони горіння.
- висока температура замерзання води, що ускладнює використання води завід'ємних температур.

· вода має більшу густину, ніж більшість горючих рідин (нафтопродуктів), що обумовлює занурення води при подачі її на поверхню горючої рідини.

Вогнегасна ефективність води залежить від способу подачі її в осередок пожежі (суцільним або розпилим струменем).

Твердий діоксид вуглецю.

Твердий діоксид вуглецю частіше використовується в тих випадках, коли застосування води неможливе або малоефективне. Твердий діоксид вуглецю має ряд переваг перед водою:

- не проводить електричний струм;
- має низьку початкову температуру в рідкій фазі - 78.4°C;
- густина менше густини основних рідин;
- на відміну від води він повністю переходить в газову фазу;
- при фазовому переході минає рідку фазу і не змочує матеріал (сублімація);
- газова фаза, що утворюється, має густину вище за густину повітря і активно флегматизує процес горіння.

Діоксид вуглецю застосовують не тільки для гасіння малих осередків пожежі, але і при гасінні пожеж в силосах елеваторів. У Харківській філії УкрНДПБ МНС України розроблені методи подачі зрідженого діоксиду вуглецю в середину залізобетонних силосів за допомогою пневматичного пробійника. При такому методі гасіння одночасно відбувається і охолодження зони горіння і флегматизація продуктів термічного розкладання, що забезпечує запобігання їх запаленню, при вивантаженні продукту, який горить.

§ 2. Теоретична інтенсивність подачі води на гасіння пожежі

Тепло, яке потрібно відвести від зони горіння, може поглинатися вогнегасник засобом на проходження ендотермічних процесів. Це тепло затрачується на нагрів і фазовий перехід вогнегасного засобу. Тому кількість поглиненої енергії складається з:

$$Q_{\text{погл}} = Q_{\text{нагр.1}} + Q_{\text{ф.п.}} + Q_{\text{нагр.2}}, \text{ кДж/кг}$$

$Q_{\text{нагр.1}}$ – теплота нагріву ВЗ від початкової температури до температури фазового переходу

$Q_{\text{ф.п.}}$ – теплота фазового переходу (сублімації або випаровування)

$Q_{\text{нагр.2}}$ – теплота нагріву пари, що утворилася при фазовому переході ВЗ, від температури фазового переходу до температури зони горіння.

Так, питому кількість енергії, що поглинається 1 кг води, можна оцінити як:

$$q_{\text{погл}} = q_{\text{нагр}}^{\text{рід}} + \Delta H_{\text{вип.}} + q_{\text{нагр}}^{\text{пар}} = c_p^{\text{рід}} (t_{\text{кип}} - t_0) + \Delta H_{\text{вип.}} + c_p^{\text{пар}} (t_{\text{гор}} - t_{\text{кип}})$$

де $c_p^{\text{рід}}$ - теплоємність води 4,19 кДж×кг⁻¹ К⁻¹;

$\Delta H_{\text{ф.п.}}$ - теплота пароутворення 2260 кДж×кг⁻¹;

$c_p^{\text{пар}}$ - теплоємність водяної пари 1,9 кДж×кг⁻¹ К⁻¹.

Якщо прийняти початкову температуру води 20°C, а температуру полум'я 1200°C, то кількість тепла, що поглинається 1 кг або 1 літром води, дорівнює:

$$q_{\text{погл}} = 4,2 \times (100 - 20) + 2260 + 1,9 \times (1200 - 100) = 4465 \text{ кДж/кг}$$

Отже, теоретично один літр води, який введено в зону горіння, при повному її випаровуванні і нагріванні пари води до температури полум'я, здатний відняти від полум'я 4500 кДж тепла.

Гасіння відбувається за умови:

$$q_{\text{погл}} \geq q_{\text{відв}}$$

Питома теоретична витрата вогнегасного засобу для припинення горіння складає:

$$V_{\text{теор}} = \frac{q_{\text{відв}}}{q_{\text{погл}}}$$

Якщо охолоджується зона горіння, питома витрата води дорівнює:

$$g_{\text{теор}} = \frac{0,1Q_{\text{н}}'}{q_{\text{погл}}}$$

Якщо вважати, що теплота згоряння більшості вуглеводнів приблизно дорівнює $Q_{\text{н}}' = 45000$ кДж/кг, можна передбачити, що питома теоретична витрата води повинна становити:

$$g_{\text{теор}} = \frac{0,1 \cdot 45000}{4500} = 1 \text{ кг води / кг ГР}$$

У цьому випадку передбачається, що вся вода попадає в зону горіння, переходить в пару і нагрівається до температури погасання. На практиці в зону реакції 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 біля 75% пари. Тоді питома кількість енергії, що поглинається водою, оцінюється як

$$q_{\text{погл}} = 0,7c_{\text{р}}^{\text{рід}}(t_{\text{кип}} - t_0) + 0,55\Delta H_{\text{вып.}} + 0,4c_{\text{р}}^{\text{пар}}(t_{\text{гор}} - t_{\text{кип}})$$

Після підстановки числових значень вхідних величин питома кількість тепла, що відводиться від факелу полум'я, становитиме $q_{\text{погл}} = 2100$ [кДж×кг⁻¹], тобто приблизно вдвічі менше отриманого раніше значення. Відповідно і питома витрата води, необхідна для припинення полум'яного горіння, буде в два рази більше.

$$g_{\text{теор}} = \frac{0,1 \cdot 45000}{2100} \approx 2 \text{ кг води / кг ГР}$$

З урахуванням масової швидкості вигорання горючої речовини теоретично необхідну інтенсивність подачі охолоджуючого вогнегасного засобу на гасіння можна розрахувати як:

$$I_{\text{теор}} = \frac{v_{\text{м}} K_{\text{п}} g_{\text{теор}}}{60}$$

де $v_{\text{м}}$ - масова швидкість вигорання речовини, кг/(м² хв);

$g_{\text{теор}}$ - питома теоретична витрата води на гасіння, л/кг;

$K_{\text{п}}$ - коефіцієнт поверхні горіння, $K_{\text{п}} = 2-2,5$;

Але такою малою кількістю води припинити горіння на практиці ніколи не вдавалося. Фактично на пожежі для гасіння подається на багато більше води. Статистика гасіння пожеж показує, що питома витрата води на гасіння пожеж в приміщенні становить біля 200 – 400 л/м².

Відношення теоретичної інтенсивності подачі вогнегасного засобу до фактичної інтенсивності називається коефіцієнтом використання вогнегасного засобу:

$$K_{\text{вик}} = \frac{I_{\text{теорет}}}{I_{\text{факт}}}$$

Коефіцієнт використання води на пожежі при подачі її в осередок горіння компактними струменями не перевищує 10%, а в деяких випадках становить 2%. Таким чином, підвищення ефективності використання води на пожежі є однією з головних задач, яку необхідно вирішувати, використовуючи науковий потенціал.

§ 3. Методи підвищення вогнегасної ефективності води

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

Найбільший ефект гасіння при подачі води спостерігається в тому випадку, коли її охолоджуючий ефект буде максимальним, тобто коли вся подана на гасіння вода випарується за

рахунок відведення тепла від факелу полум'я. Тому при такому механізмі припинення горіння потрібно прагнути того, щоб максимально можлива кількість води випаровувалася в об'ємі факелу полум'я, а не за його межами. Недосконалість техніки подачі і розпилення води багато в чому знижує її ефективність.

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

Для підвищення вогнегасної ефективності води використовують два основні методи:

- зміна фізичних характеристик водяних струменів, що подаються на гасіння;
- хімічна модифікація фізичних і хімічних властивостей водних розчинів.

При гасінні пожеж можна запропонувати наступні способи підвищення вогнегасної ефективності води:

1. Для гасіння використати розпилені і дрібно розпилені струмені. При цьому збільшення дисперсності потоку приведе до збільшення поверхні контакту води з нагрітими газами і різкого збільшення інтенсивності випаровування. Для того щоб дрібно дисперсні краплі води не уносилися конвекційними газовими потоками із зони реакції горіння, маса краплі повинна бути такою, при якій швидкість польоту краплі близька до швидкості її вітання. Тоді сила тяжіння буде компенсуватися силами аеродинамічної взаємодії з потоком газу.

2. Для зниження сил поверхневого натягу і підвищення здатності води проникати в шари матеріалу, що горить, необхідно використовувати поверхово активні речовини (ПАР) - змочувачі.

Добавка 0,5-2% змочувача дозволяє значно знизити поверхневий натяг води (з $72,8 \times 10^{-5}$ до $36,4 \times 10^{-5}$ Дж/м²). У такому вигляді вода добре проникає у пори, за рахунок чого досягається більший ефект в гасінні пожежі, особливо волокнистих матеріалів, деревини, торфу, бавовни,

Застосування змочувачів при гасінні волокнистих матеріалів дозволяє в двічі підвищити ефективність використання води, знизити інтенсивність подачі. Витрата води на гасіння меншає на 30-50% і знижується тривалість гасіння пожежі.

3. Для запобігання стіканню води і збільшенню дальності польоту струменів води можна додавати згущувачі із органічних сполук типу карбоксиметилцелюлоза, поліакрилова кислота, поліоксиетилен, полівініловий спирт, метилцелюлоза, (сульфований поліфенілтолуол), і інші.

Були проведені досліді по гасінню лісових пожеж водою із добавками таких згущувачів як діамонійфосфат і амоній фосфат. Завдяки цим добавкам вода прилипає до рослин і віднімає більше тепла, ніж звичайна вода. У ВНИИПО була розроблена композиція на основі сополімеру акрилової кислоти і гексаалілсахарози, що отримало назву САКАС.

При зниженні в'язкості води значно знижується час гасіння і коефіцієнт її використання підвищується.

4. Для пониження температури замерзання у воду додають антифриз (деякі мінеральні солі, гліколі).

5. Для досягнення ефекту хімічного гальмування реакції горіння можна використати добавки галоїдвмісних солей, наприклад NaCl. У розпиленому стані краплі води випаровуються, і кристали солі переходять у дрібно дисперсний вогнегасний порошок.

Піна

З точки зору теплової теорії погасання для того, щоб припинити горіння на пожежі необхідно змінити співвідношення тепловиділення і тепловіддачі від зони горіння таким чином, щоб система перейшла в нестійку теплову рівновагу при температурі погасання. Найменша зміна умов у бік зниження температури приводить до переходу системи в область теплового балансу при низьких температурах, а на практиці до припинення полум'яного горіння.

Одним з можливих способів гасіння полум'я може бути зменшення швидкості хімічної реакції в зоні горіння за рахунок зниження концентрації компонентів горючої суміші. Знизити кількість

горючої речовини, що поступає в зону горіння, можна за рахунок охолодження поверхневого шару речовини до температури нижче критичного значення або за рахунок механічної ізоляції горючої речовини або окислювача від зони реакції. Розглянемо докладніше механізм припинення горіння за допомогою ізолюючих вогнегасних речовин.

Глава 3. припинення горіння ізоляцією

§ 1. Основи припинення горіння ізоляцією.

Зниження тепловиділення можна добитися за рахунок зменшення концентрацій компонентів горючої суміші в зоні горіння. Одним із способів досягнення цього є ізоляція горючої речовини або окислювача від зони реакції. Повного припинення надходження компонентів в зону горіння досягати не потрібно, достатньо знизити швидкість надходження одного із компонентів до такого рівня, при якому тепловиділення стане менше тепловіддачі в навколишнє середовище. Іншими словами, необхідно щоб концентрація продуктів випаровування, сублімації або розкладання в зоні горіння знизилася нижче нижньої концентраційної межі поширення полум'я. Найчастіше це досягається ізоляцією поверхні горючої речовини при утворенні твердої корки ізолюючого матеріалу або поглинанням продуктів газифікації (термічної підготовки пального) в шарі ізолюючої вогнегасної речовини.

У практиці пожежегасіння для припинення горіння використовуються наступні види ізолюючих вогнегасних речовин:

- рідкі (піна, в деяких випадках вода);
- газоподібні (продукти вибуху при гасінні газонафтових фонтанів);
- тверді листові матеріали (азбоцементні листи, пожежні покривала із негорючих тканин);
- тверді сипучі матеріали (пісок, вогнегасні порошки спеціального призначення).

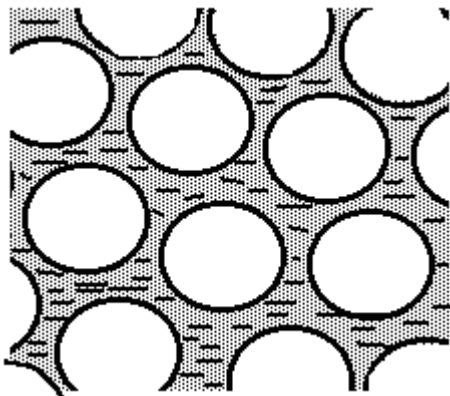
Вогнегасні порошки спеціального призначення широко застосовуються для ізоляції осередків гетерогенного горіння (тління), а також при гасінні матеріалів, які бурхливо реагують з водою, таких як горючі метали, металоорганічні, кремнійорганічні і інші елементорганічні речовини. При цьому порошок плавиться і покриває поверхню горючої речовини плівкою розплаву, яка не пропускає (ізолює) горючу речовину в зону горіння або у випадку гетерогенного горіння ізолює окислювач від зони горіння.

Найбільш широко при пожежегасінні на підприємствах хімічної, нафтохімічної і нафтопереробної промисловості застосовуються вогнегасні піни.

Піна являє собою грубодисперсну колоїдну систему, що містить в якості дисперсної фази газ, а в якості дисперсійного середовища - рідку фазу (пухирці газу, оточені плівками рідини).

Піною є не всяка система типу "газ – рідина", а тільки така ячеїсто-плівкова система, окремі пухирці якої пов'язані один з одним розділяючими їх плівками у загальний каркас. У протилежність цьому, пухирці газу, вільно розподілені в рідині, є емульсією газу в рідині. Щоб піна була суцільною ячеїсто-плівковою системою, необхідно ввести в рідину не менше за 74% по об'єму газу. При цьому загальний об'єм системи зростає в 3,8 рази.

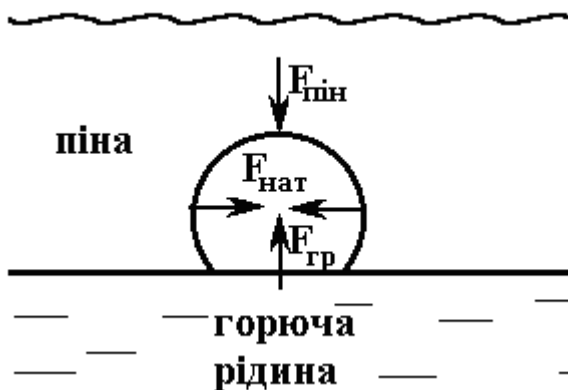
Вогнегасна здатність піни обумовлена, передусім, її здатністю перешкоджати проходженню в зону полум'я горючої пари. Плівки рідини між бульбашками піни гальмують надходження горючої пари від поверхні конденсованої речовини в зону горіння за рахунок того, що коефіцієнт дифузії пари через плівки піни значно менший, ніж у повітрі.



Наприклад, швидкість випаровування бензину під шаром піни товщиною 5 см меншає в 30-40 разів.

Ізолююча здатність піни залежить від її структури (розміру бульбашки та товщини рідинної плівки), фізико-хімічних властивостей водного розчину, товщини шару піни, а також від природи горючої рідини і від температури її поверхневого шару. Надійне гасіння може бути досягнуте при подачі на поверхню горючої рідини такого шару піни, через який пара горючої рідини не зможе прорватися в зону горіння в кількості, яка перевищує НКМПП.

Для того щоб визначити яку мінімальну висоту повинен мати шар піни, необхідно визначити які сили діють на бульбашку піни.



На шар піни діє сила тиску парів горючої рідини $F_{гр}$, їй протистоять сила внутрішнього напруження пінного шару (сила поверхневого натягу) $F_{нат}$ і сила, що зумовлена масою піни, $F_{пін}$. Так в порожнину бульбашки проникає пара горючої рідини, при цьому об'єм бульбашки збільшується доки всередині тиск пари не стане рівним тиску насиченої пари. Розмір бульбашки залежить від початкового розміру бульбашки, фізико-хімічних властивостей піни, тиску насиченої пари горючої рідини при даній температурі. При деяких умовах кінцевий розмір бульбашки стає дуже великим і пінний шар проривається. Чим дрібніше бульбашки піни і більше поверхневий натяг розчину піноутворювача, тим вище ізолююча здатність піни. Якщо температура рідини низька, то прорив пінного шару малоімовірний. Таким чином, вогнегасна ефективність піни може бути оцінена по величині H_{min} , яка є функцією в основному чотирьох параметрів: кратності, дисперсність, в'язкості і стійкості піни.

Бульбашка, наповнена парами горючої рідини, не спливе, якщо будуть додержані умови:

$$H_{шар} > d_б; \quad F_{гр} < F_{нат} + F_{пін}.$$

Мінімальну ізолюючу товщину шару можна виразити формулою:

$$H_{min} = \frac{P_{нп.} - \rho d_б^3/3}{\rho + 4\sigma/d_б} \quad H_{min} = \frac{P_{нп.} - \rho d_б^3/3}{\rho + 4\sigma/d_б}$$

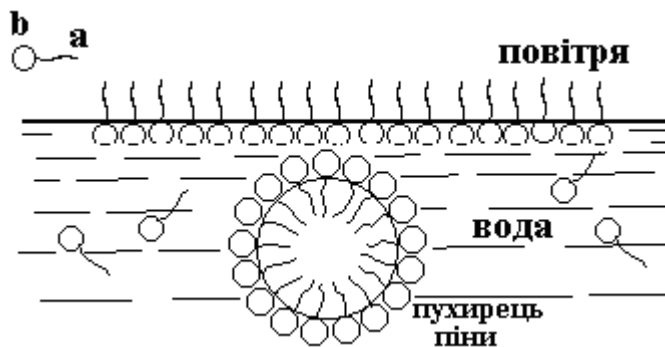
§ 2. Основи утворення стійких пін

Пінам властива агрегативна і термодинамічна нестійкість, яка веде до руйнування піни. Це пов'язано із руйнівною дією поверхневого натягу. Тому однією з умов піноутворення є пониження поверхневого натягу рідкої фази.

Плівки індивідуальних речовин, які мають постійний коефіцієнт поверхневого натягу, не здатні локально змінювати поверхневий натяг при розтягненні або стисненні. У зв'язку із цим індивідуальні речовини не піняться. Найбільш стійкі піни утворюються при додаванні в систему "вода-газ" речовин, які мають низький поверхневий натяг і, найголовніше, здатних різко змінювати його залежно від концентрації. Такі речовини називаються поверхнево-активними (ПАР).

Поверхнево-активними називаються речовини, які здатні при розчиненні у воді накопичуватися на поверхні, зменшуючи поверхневий натяг на кордоні із повітрям або іншим середовищем.

Молекули ПАР складаються із короткої полярної і довгої неполярної частин. Полярна частина обумовлює розчинність ПАР у воді, неполярна частина - розташовується в повітрі або в іншій неполярній речовині, що межує зі розчином ПАР. Таким чином, розчинені у воді молекули ПАР адсорбуються на поверхні води із утворенням мономолекулярного шару, при цьому розташовуючись на кордоні розділу фаз вода-повітря певним чином - частина молекули, яка відштовхується водою, розташовується над поверхнею води, інша - притягується водою і забезпечує зниження її поверхневого натягу. Концентрація ПАР у поверхневому шарі значно більше, ніж в об'ємі.



На поверхні бульбашки повітря, що знаходиться в розчині, також утворюється адсорбційний шар: вуглеводнева частина молекули ПАР направлена всередину повітряного пухирця, а гідрофільна група - у бік водної фази. Повітряний пухирець, що підіймається на поверхню, проходячи через поверхню розчину, оточується подвійним шаром. Таким чином, плівка пухирця являє собою два адсорбційних шари, між якими знаходиться водний розчин ПАР.

Поверхнево-активні речовини хоч і утворюють сильні піни, але стійкість їх не відповідає вимогам пожежної охорони. З метою підвищення стійкості пін в них вводять невеликі кількості стабілізуючих добавок, які самі не утворюють піни (солі полівалентних металів, глинозем, добавки вищих жирних спиртів і інші). Складні розчини, які містять крім ПАР стабілізатори, згущувачі і інші спеціальні добавки називаються піноутворювачами (ПУ).

Піноутворювачі класифікують по кількох ознаках.

Залежно від умов застосування ПУ поділяються на піноутворювачі загального і спеціального призначення. ПУ загального призначення найбільш масові при використанні, прості по складу і відносно дешеві. До ПУ спеціального призначення відносяться піноутворювачі, стійкі до дії спиртів і інших полярних рідин.

Залежно від схильності до біологічного розкладання всі ПУ поділяють на біологічно м'які (ступінь розкладання перевищує 85%), середні (ступінь розкладання від 85% до 75%) і біологічно жорсткі (ступінь розкладання менше 75%).

Залежності від вихідної сировини, відповідно до міжнародного стандарту ISO 7203, ПУ поділяють на наступні групи:

- синтетичні (S);
- протеїнові (P) або білкові;
- плівкоутворюючі (AFFF);
- піноутворювачі, стійкі до дії спиртів і інших полярних рідин (AR).

До синтетичних ПУ віднесені ПУ, що вмістять вуглеводневі поверхво-активні речовини, які отримані внаслідок синтезу.

До протеїнових ПУ віднесені піноутворювачі, що містять в якості ПАР продукти гідролізу білкових речовин.

Плівкоутворюючі ПУ - піноутворювачі, що містять в своєму складі полімерні речовини, які розчинні в піноутворювачі, але не розчинні в полярних рідинах. При контакті з органічними розчинниками водорозчинні полімерні добавки коагулюють (випадають з розчину) і утворюють плівку, що оберігає піну від подальшого руйнування.

Такі ПУ використовують для отримання пін, стійких на поверхні водорозчинних полярних рідин (спирти, ефір і т.д.). Вони мають підвищену стабільність до повторного запалення через утворення плівки на поверхні вуглеводневого пального.

Особливий інтерес викликають фторвмісні піноутворювачі, такі як "легка вода". Наявність в молекулі ПУ атомів фтору додає піні, що утворюється, високу термічну міцність і ізолюючу здатність. Піна, що утворюється, забезпечує надійне гасіння при її товщині 1,5-2,5 мм, добре розтікається, що значно полегшує покриття поверхні, що горить. За допомогою цих ПУ можна створити на поверхні горючої рідини тонку плівку, яка не тільки ефективно подавляє горіння, але і попереджає повторне запалення, оскільки поверхневий натяг цього піноутворювача майже в 10 раз нижче, ніж у звичайних ПУ, і відновлення порушеного шару відбувається дуже швидко. До переваг цих піноутворювачів відносять також можливість їх застосування для гасіння полярних горючих рідин і використання спільно із порошковими вогнегасними засобами.

Асортимент ПУ, що випускаються в кожній країні, пов'язаний із рівнем технології отримання ПАР. Так англійські фірми продовжують випускати протеїнові ПУ, головним компонентом яких є продукти гідролізу білку, а фірми США повністю орієнтовані на виробництво фторвмісних синтетичних ПУ. У Росії створені піноутворювачі, які мають унікальні властивості ("Пленкообразующий", "Універсальный", ФОРЭТОЛ). На Україні розроблено вітчизняний піноутворювач "Пегас", "Сніжок".

Самим масовим ПУ (більше за 90%) є ПО-6К (ПО - пенообразователь, 6 - робоча концентрація 6%, К - основа - кислий гудрон). Цей піноутворювач містить "жорсткі" ПАР, що суперечить основній тенденції розвитку виробництва ПУ у світовій практиці. Тому з 1998 року його випуск припинено і до використання рекомендовані "м'які" ПУ загального призначення, такі як ПО-6ФП, ПО-3АИ, САМПО, "Морпен", ТЕАС.

Залежно від способу отримання вогнегасні піни поділяють на хімічні; повітряно-механічні; піни, що швидко тверднуть, та піни, що піняться під дією нагріву.

Хімічна піна

Отримують внаслідок хімічної реакції «мокрим» або «сухим» способом.

При "мокрому" способі лужний і кислотний розчини змішують перед подачею у осередок пожежі. Лужний розчин містить солі бікарбонату і добавки піноутворювача. Кислотний розчин містить сульфат алюмінію і сірчану кислоту. Внаслідок взаємодії цих розчинів виділяється газ CO₂, пухирці якого обгортаються плівкою ПУ, і таким чином отримують піну.



При "сухому" способі піноутворюючий порошок, що складається із лужних і кислих солей, змішують в піногенераторі із потоком води. При розчиненні солей під час руху суміші по водонапірному рукаву відбувається така ж хімічна реакція, як і при "мокрому" способі.

У наш час хімічна піна практично не використовується через ряд істотних недоліків:

- низька вогнегасна здатність піни, що утворюється;
- велика витрата піногенераторного порошку для отримання піни;

- необхідність герметичної упаковки порошку;
- зниження піноутворюючих властивостей при зменшенні температури води.

Піни, що піняться під дією нагріву.

Останнім часом нарівні з традиційними способами отримання протипожежних пін велика увага приділяється отриманню піни за рахунок самовільного спінювання композицій в факелі полум'я або на нагрітій поверхні. Спінювання розчинів відбувається при підвищеній температурі за рахунок виділення газоподібних продуктів, яке відбувається внаслідок хімічної реакції, або при випаровуванні одного з компонентів складу. Вміст таких компонентів (речовин – пропелентів) складає 3-7% маси. При нагріві в осередку пожежі такого складу утворюється достатня кількість пари для спінювання водного розчину.

Піни, що швидко тверднуть

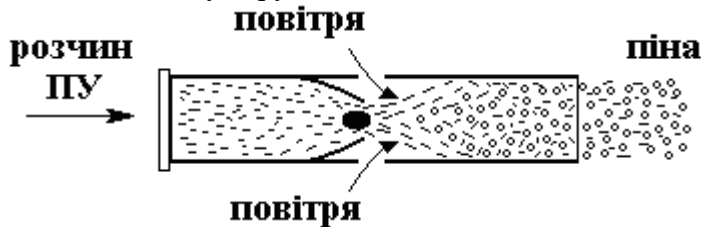
Отримання пін, що швидко тверднуть, здійснюється шляхом спінювання робочого розчину ПУ і одночасного додавання органічних смол в кількості 20-50% (в основному формальдегідні смоли) і 3-5% отверджувача (сульфо кислоти). Такі піни надійно ізолюють поверхню, на яку нанесені, протягом тривалого часу, оскільки внаслідок хімічної взаємодії між смолою і отверджувачем у півці бульбашок піни утворюється полімерна речовина, яка з часом швидко твердне, утворюючи кірку. Їх використовують для запобігання виникненню горіння.

Повітряно-механічна піна

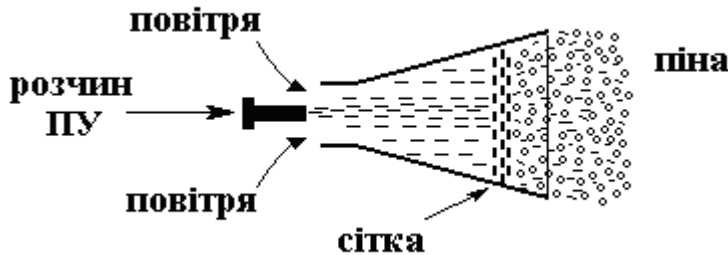
Найчастіше застосовуються повітряно-механічні піни, що отримують при змішуванні розчинів піноутворювача із повітрям.

Властивості піни залежать не тільки від якості піноутворювача, але і від піноутворюючої апаратури. За способом утворення піни вони діляться на дві групи - повітряно-пінні стволи і піногенератори.

Повітряно-пінні стволи працюють за принципом зіткнення струменів. Струмені розчину піноутворювача, що подаються під тиском, витікають із отворів під кутом один до одного, стикаються і дробляться. При цьому вони захоплюють повітря, яке поступає через отвори у корпусі ствола. У результаті утворюється неоднорідна по розмірах пухирців піна низької кратності із великою дальністю польоту струменя.



Найбільш поширеним є спосіб спінювання на сітках в піногенераторах. Розчин піноутворювача надходить в генератор, в якому, перемішуючись із повітрям, перетворюється у повітряно-механічну піну.



Краплі розчину піноутворювача попадають на вічка сітки і змочують їх. Потік повітря, що набігає на сітку, деформує шар рідини, виникає порожнина, заповнена повітрям. Збільшення порожнини продовжується доти, поки наступна крапля не закрий вічко. Так виникає пухирець піни. Процес повторюється багато разів одночасно на всіх вічках сітки.

При спінюванні на сітках піна виходить більш однорідною по структурі. Характеристика піни, що отримано в піногенераторах, залежить від розмірів вічок сітки, дисперсності розпиленого струменя розчину, від швидкості і тиску повітря перед сіткою.

§ 3. Властивості вогнегасних пін

Вогнегасні властивості піни визначаються:

- кратністю,
- дисперсністю,
- стійкістю,
- ізолюючою здатністю,
- здатністю розтікатися по поверхні.

На ці параметри піни впливають природа горючого матеріалу і піноутворювача, властивості води, умови протікання пожежі, способи отримання і подачі піни.

Кратність - відношення об'єму піни до об'єму рідини, з якої вона отримана.

$$K_p = V_p / V_{\text{рід}}$$

Залежно від способу отримання значення кратності піни, для одного і того ж розчину, можуть сильно відрізнятись. Розрізняють піни низької кратності ($K_p < 20$), середньої кратності ($K_p = 20-200$) або високократні ($K_p > 200$).

Піна при одній і тій же кратності може мати різну структуру, яку в свою чергу можна охарактеризувати дисперсністю і товщиною рідинних оболонок.

Дисперсність піни обернено пропорційна розмірам пухирців і багато в чому визначає її якість.

$$D_p = 1/d_{\text{сер}}$$

Чим вище дисперсність, тим краще піна, тим більше її стійкість, тим вище її вогнегасна ефективність. Ступінь дисперсності піни багато в чому залежить від умов її отримання.

Стійкість – здатність піни зберігати первинні властивості, і характеризує опір піни руйнуванню. Стійкість характеризується часом напіврозпаду піни, тобто часом, протягом якого із піни виділиться половина рідини. Це величина, обернена до інтенсивності руйнування.

$$S_p = 1/L_{\text{руйн.}}$$

S_p - початковий об'єм піни; V_p - об'єм піни, що руйнується за встановлений проміжок часу Δt .

Стійкість піни залежить від її кратності (стійкість піни максимальна при кратності 80-150), виду піноутворювача, його концентрації в розчині і структури піни. Фторовані ПУ утворюють піну, яка майже не руйнується на поверхні вуглеводнів і погано руйнується на поверхні водорозчинних рідин.

Ізолююча здатність – здатність піни перешкоджати випаровуванню горючої рідини. Ізолююча здатність виражається часом, протягом якого пара рідини проходить через певний шар піни і утворює над цим шаром пароповітряну суміш, що запалюється від джерела запалювання.

В'язкість піни – здатність піни розтікатися по поверхні речовини. В'язкість піни залежить від стійкості піни і її структури.

Вогнегасна здатність піни зростає із збільшенням вмісту згущувача, однак, різке збільшення в'язкості піноутворюючих розчинів приводить до погіршення гідравлічних параметрів розпилюючої форсунки, параметрів піноутворення і загалом до зростання енерговитрат. Тому існує оптимальна концентрація згущувача в розчині (0,1-0,5%).

§ 4. Механізм припинення горіння піною.

4.1. Етапи гасіння піною.

Вогнегасні піни найбільш широко використовують при гасінні пожеж класу В. При цьому піни здійснюють комплексну дію: одночасно відбувається ізоляція горючої пари і охолодження поверхні рідини. Крім того, піна перешкоджає передачі тепла від факелу полум'я до частини поверхні горючої речовини, яка покрита піною. Однак численними дослідженнями доведено, що

вирішальним (домінуючим) чинником є ізолююча дія тому, що в більшості випадків гасіння полум'я настає при температурі горючої рідини більш високій, ніж температура спалаху. Разом з тим, особливо при гасінні висококиплячих нафтопродуктів, при горінні яких утворюється гомотермічний прогрітий шар, істотне значення має охолодження поверхні горючої рідини водою, яка міститься в піні. При цьому меншає швидкість випаровування рідини, отже, меншає концентрація горючого в зоні горіння, швидкість хімічної реакції, швидкість тепловиділення і, як кінцевий результат, - температура горіння. Найбільшу охолоджуючу дію має низьократна піна із високим вмістом води, найменшу - легка високократна піна, що характеризується малим вмістом води.

Процес гасіння пожежі рідини піною можна умовно поділити на кілька основних етапів:

1. Перші порції піни руйнуються у полум'ї і на поверхні нафтопродукту, що горить. Відбувається розбавлення горючої суміші парами води, які поступають в зону горіння за рахунок випаровування розчину піноутворювача. Це приводить до зниження концентрації горючого і окислювача в зоні горіння і охолодження цієї зони. Холодний розчин ПУ, який виділився при руйнуванні піни, охолоджує поверхневий шар горючого безпосередньо у місця її подачі.

2. Після попереднього охолодження утворюється локальний шар піни на поверхні рідини. При цьому:

2.1. піна частково ізолює пару горючої речовини у своїх бульбашках, концентрація горючої речовини в зоні горіння зменшується, що обумовлює зменшення швидкості хімічної реакції і інтенсивності тепловиділення;

2.2. піна екранує частину горючої рідини від променистого теплового потоку полум'я. Завдяки цьому меншає швидкість випаровування і, концентрація горючої пари в зоні горіння. Це приводить до зменшення тепловиділення в зоні горіння і зниження температури горіння.

2.3. Холодна у порівнянні із горючим піна охолоджує його поверхневий шар по всій площі зіткнення. Внаслідок руйнування піни виділяється відносно холодний розчин піноутворювача. Два ці явища приводять до того, що у поверхневому шарі горючого виникає потік нагрітої рідини, направлений під шар піни з поверхні, ще не зайнятої нею. Цей потік перешкоджає розтіканню піни по поверхні горючого, а додаткове тепло, що привноситься з ним під піну сприяє більш інтенсивному її руйнуванню. Разом з тим конвекційні потоки, що виникають в рідині, перемішують холодний і прогрітий шар горючої рідини і охолоджують прогрітий поверхневий шар і стінки резервуара шляхом відведення тепла до холодного нижнього шару і розчину піноутворювача.

Отже, для підвищення ефективності пінного гасіння необхідно організувати додаткове перемішування холодного і гарячого шарів горючого, причому так, щоб у поверхневому шарі потік горючої рідини сприяв поширенню піни по поверхні, що горить.

2.4. піна поступово розтікається по всій поверхні горючої рідини.

3. Подальші порції піни накопичуються на поверхні горючої речовини шаром певної товщини і припиняють випаровування останньої. Таким чином піна ізолює пари горючої рідини від зони горіння, і горіння припиняється.

Таким чином, з точки зору теплової теорії погасання, вогнегасну дію піни можна пояснити одночасним зниженням інтенсивності процесу тепловиділення і збільшенням інтенсивності процесу тепловіддачі. Це спричиняє зниження температури в зоні реакцій горіння до температури погасання.

Описаний вище механізм не зовсім відповідає застосуванню пін з фторованих, а тим більше плівкоутворюючих піноутворювачів. Піна на основі таких ПУ відрізняється більшою стійкістю по відношенню до впливу горючого і теплового випромінювання полум'я. При цьому виділення з піни водного розчину піноутворювача не тільки не знижує ефективність гасіння, але і приводить до швидкого утворення ізолюючої водної плівки на поверхні горючого, яка не тоне, а продовжує знаходитися на поверхні горючої рідини у вигляді тонкого прошарку, який в свою чергу є підкладкою під шар наступної порції піни. Відновлення порушеного шару відбувається дуже швидко, так що паливо практично неможливо оголити, звільнити від пінного покривала. У результаті цього

при дуже маленькій товщині пінного шару забезпечується дуже ефективна ізолююча дія пін, отриманих із даних ПУ.

Піноутворювачі, що додають піні вказані властивості, все більше використовуються для захисту об'єктів із високою концентрацією пожежонебезпечних речовин і матеріалів. Нажаль на сьогоднішній день такі піноутворювачі майже не виробляються на Україні і можуть закуповуватися тільки по імпорту. Однак, оцінюючи економічну ефективність застосування вказаних ПУ для гасіння пожеж, можна сказати, що незважаючи на те, що сам ПУ в 20 раз дорожче за інші піноутворювачі, застосування його економічно доцільно. Це пояснюється тим, що необхідна витрата ПУ в 2-3 рази менше, необхідна кількість сил і засобів для гасіння пожежі менше, час гасіння пожежі менше, а ефективність гасіння значно вище. Термін зберігання таких ПУ становить до 25 років.

4.2. Область застосування вогнегасних пін.

Піни застосовуються для гасіння пожеж класу В і для запобігання виникнення горіння твердих і рідких речовин, які не вступають у взаємодію із водою.

В якості профілактичного засобу піни застосовують для заповнення порожнин при веденні буро-підричних робіт. Цей спосіб попередження вибухів газу показав високу ефективність. Переверене застосування пін для запобігання загазованості навколишнього середовища або приміщень при розливах нафтопродуктів. Запобігання випаровуванню горючої рідини забезпечується великим часом життя піни за рахунок використання полімерних компонентів, здатних згодом стверджуватися і створювати жорсткий каркас, який здатний запобігати або різко знижувати швидкість випаровування протягом тривалого часу (від 20 до 50 хв.).

Піну заборонено застосовувати для гасіння пожеж в електричних установках через хорошу електропровідність водного розчину, для гасіння металів через хімічну взаємодію їх із водою, що міститься в піні.

Застосування пін дає переваги:

- значне скорочення води,
- здатність розтікатися по поверхні, що горить і, отже, можливість подачі піни в одному місці (у разі гасіння водою необхідно зрошувати всю поверхню, що горить),
- підвищена у порівнянні із водою змочувальна здатність.

Піни високої кратності мають переваги:

- мають меншу густину і внаслідок цього меншу імовірність занурення всередину пального, тому не зазнають швидкого руйнування при взаємодії із горючою рідиною;
- можна здійснювати не тільки поверхневе, але і об'ємне гасіння; такий спосіб широко застосовується при гасінні пожеж у підвалах, кабельних каналах і т.п.;
- мінімальні побічні збитки від води, через високу кратність піни;
- шар високократної піни має більш високу ізолюючу здатність.

Однак дуже велике підвищення кратності піни (більше за 500) призводить до погіршення її вогнегасної здатності, так як зменшуються її стійкість, піна легко здувається вітром і висхідними потоками продуктів згорання.

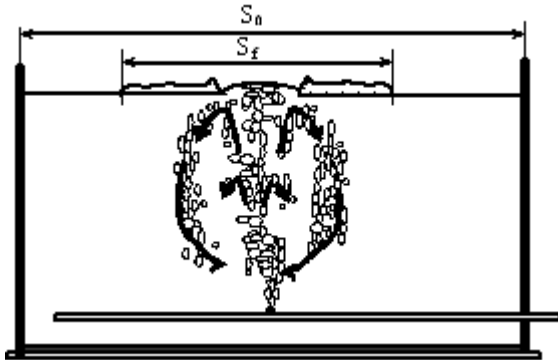
Найбільш широке застосування піни знайшли при гасінні пожеж в резервуарах із нафтопродуктами. При цьому ПМП подається через стаціонарні пінокамери, які встановлюють поблизу верхньої кромки резервуара, або через борт резервуара за допомогою пересувних піно-підйомників.

Аналіз ситуації, що складається при гасінні пожеж в резервуарах штатними засобами, показує, що даний спосіб має ряд істотних недоліків:

- стаціонарні пінозливні камери часто виходять з ладу при вибуху або деформації верхнього поясу резервуара ще до початку гасіння і не дають необхідного ефекту при роботі;
- вогнегасна здатність піни втрачається внаслідок термічного руйнування при проходженні її через зону високих температур, яку створює полум'я поблизу пінозливую;
- ускладнена доставка піни підвищеної кратності в зону горіння;

- частковий підрив даху з подальшим обваленням його в резервуар, що горить, робить неможливим застосування способу подачі піни "зверху";
- утворення "кишень" - зон, де пальне має підвищену температуру через те, що воно не бере участі в теплообміні (така ситуація виникає при наявності механічних перешкод для попадання в "кишень" піни при деформації стінок резервуара, його стаціонарного або плаваючого даху, понтона).

Альтернативним рішенням є застосування "підшарового" способу гасіння пожежі, при якому низькократна піна нагнітається по трубопроводу в нижню частину резервуару безпосередньо в шар пального через пінопроводи або технологічні комунікації, розташовані в нижній частині резервуара.



Використання "підшарового" способу дає ряд переваг перед традиційною системою гасіння полум'я нафти і нафтопродуктів:

- незначне термічне руйнування піни, так як вона не проходить через зону полум'я;
- спливаюча піна створює примусову циркуляцію рідини, яка горить, і це сприяє охолодженню верхніх нагрітих шарів;
- охолодження стінок резервуара циркулюючою рідиною.

На етапі підйому піни відбувається тривалий і всебічний контакт з нафтопродуктом. Для реалізації підшарового способу звичайні ПУ не придатні, оскільки вони добре змішуються з нафтопродуктом і піни на їх основі практично повністю руйнуються у товщі пального, а на поверхню рідини спливають тільки бульбашки повітря. Необхідне застосування фторвмісних ПУ, які запобігають "забрудненню" піни нафтопродуктом в процесі її підйому через шар пального. Такі піни не змочуються вуглеводнями, тому при подачі в товщу нафтопродукту спливають на поверхню і формують суцільний ізолюючий шар, який припиняє доступ парів пального в зону горіння.

Глава 4. Припинення горіння інгібуванням

§ 1. Основи припинення горіння інгібуванням.

При вивченні процесів, що протікають в полум'ї, ми говорили, що взаємодія між горючою речовиною і окислювачем відбувається по ланцюговому механізму через стадію утворення активних центрів полум'я (АЦП). АЦП – атоми, молекули чи радикали, які мають енергію більшу, ніж енергія активації системи. Як відомо, реакції горіння вуглеводнів носять розгалужений ланцюговий характер. Розгалуженими є такі реакції, у яких при взаємодії одного активного центра виходило два і більше. Внаслідок протікання таких реакцій концентрація АЦП різко збільшується, швидкість реакції зростає, відбувається дифузія таких АЦП в свіжу горючу суміш, що сприяє поширенню горіння.

Активні центри в ході процесу дифузії можуть гинути при взаємодії один з одним або із нейтральною часткою, тобто гублять свою енергію і стають не активними. У цьому випадку відбудеться обрив ланцюга і зниження швидкості ланцюгової реакції.

Швидкість ланцюгової реакції можна представити у вигляді виразу:

Шл.р. = W ініц. + W розгалуження – W обриву ланц. (загибелі АЦП)

Якщо швидкість обриву ланцюга за рахунок загибелі активних центрів стане більше за швидкість утворення АЦП, сумарна швидкість ланцюгової реакції почне зменшуватися. При

зменшенні швидкості реакції знижується інтенсивність тепловиділення, і за певних умов температура в зоні горіння стане менше температури погасання.

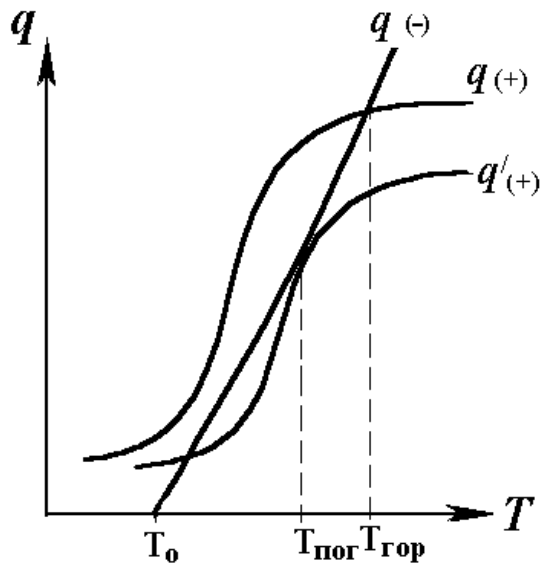
Цього можна досягти, якщо в зону реакції ввести інгібітори – речовини, які взаємодіють з активними центрами, утворюючи при цьому неактивні (малоактивні) продукти із високим значенням енергії активації, при цьому через декілька актів хімічного перетворення інгібітори повністю чи частково відновлюються і вступають у повторну взаємодію з АЦП.

Інгібувати можна лише такі процеси горіння, у яких протікають розгалужені ланцюгові реакції із концентраціями АЦ, що значно перевищують рівноважні. Ті процеси горіння, які протікають не по радикальному механізму, а по механізму прямого окислення (гетерогенне горіння вуглецю або горіння металів) не інгібується.

Кількість інгібіторів, яку необхідно ввести в зону реакції для припинення горіння, дуже мала (біля 2-3%). Отже концентрації компонентів горючої суміші при цьому практично не змінюються, теплофізичні параметри суміші (теплоємність і теплопровідність) також змінюються слабо, тому можна вважати, що інтенсивність тепловіддачі залишається незмінною.

Іншими словами хімічне інгібування відбувається лише за рахунок збільшення енергії активації системи, що приводить до різкого зменшення швидкості реакції горіння і, як наслідок, до зменшення інтенсивності тепловиділення в зоні горіння. Зниження тепловиділення, в свою чергу, приводить до зменшення теплового потоку від зони горіння до поверхні горючої речовини і, отже, до зниження швидкості пароутворення, тобто зменшенню кількості горючої речовини, що поступає в зону горіння.

З точки зору теплової теорії погасання припинення горіння при впливі інгібуруючих ВЗ відбудеться за рахунок різкого зниження швидкості тепловиділення. При цьому $q(+)' < q(-)$.



Інгібуючі вогнегасні засоби можуть знаходитися в газоподібному або рідкому агрегатному стані (наприклад хладони) або в твердому дисперсному стані (вогнегасні порошки, аерозолеутворюючі вогнегасні склади). Всі вони використовуються для об'ємного пожежогасіння.

§ 2. Гасіння хладонами.

2.1. Загальні відомості об хладонах

Хладони (галони) - склади на основі галоїдпохідних насичених вуглеводнів, у яких атоми водню заміщені повністю або частково атомами галоїдів.

Вогнегасна ефективність галоїдвуглеводнів підвищується при заміщенні в них атома водню на атом галоїду у наступній послідовності:



Враховуючи дефіцитність і високу вартість похідних йоду, за основу практичних інгібіторів вибрані бромвмісні вуглеводні. При введенні фтору в молекулу інгібітору підвищується його

стабільність, зменшуються горючість, токсичність і корозійна активність хладонів. Найбільш ефективними і зручними для застосування є бром-, фтор- похідні метану і етану. Із подібних сполук найбільш широко застосовують трифторбромметан, дифторхлорбромметан, дибромтетрафторетан, дибромдифторметан.

Кожний хладон характеризується набором цифр. За прийнятою у нас номенклатурою номер хладона складається таким чином:

- перша цифра – число атомів вуглецю мінус 1,
- друга – число атомів водню плюс 1,
- третя – число атомів фтору,
- бром характеризується буквою В і цифрою по числу атомів.
- число атомів хлору визначається по вільних зв'язках.

Наприклад трифторбромметан CF_3Br : перша цифра – число атомів вуглецю мінус 1: $1 - 1 = 0$, друга – число атомів водню плюс 1: $0 + 1 = 1$, третя – число атомів фтору 3, бром характеризується буквою В і цифрою по числу атомів – В1, атомів хлору немає. Отже трифторбромметан можна охарактеризувати номером 13В1.

По набору цифр можна визначити будову хладона, наприклад хладон 114В2: перша цифра 1 (число атомів вуглецю мінус 1), отже, число атомів вуглецю 2; друга цифра 1 (число атомів водню плюс 1), отже число атомів водню 0; третя цифра 4 (число атомів фтору); В2 показує наявність двох атомів бромю. Оскільки у атомів вуглеводу всього шість зв'язків, які повністю зайнятими 4 атомами фтору і 2 атомами бромю, отже хлору в складі даного хладона немає. Таким набором цифр характеризується дибромтетрафторетан $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$.

По зарубіжній номенклатурі номер галона складається таким чином: перша цифра - число атомів вуглецю, друга - атомів фтору, третя атомів хлору, четверта атомів бромю і п'ята атомів йоду. Число атомів водню визначається по вільних зв'язках.

Хладони є летючими сполуками, погано розчинними у воді, але добре розчинними в органічних розчинниках. Хладони 114В2 і 12В2 - важкі рідини, інші - гази, які легко скраплюються при невеликому тиску. Хладони мають високу густину, що забезпечує можливість створення струменя і проникнення крапель у полум'я, а також утримання пари біля осередку горіння. Низькі температури замерзання дозволяють застосовувати їх при від'ємних температурах. Хладони мають хороші діелектричні властивості, тому їх можна застосовувати для гасіння пожеж електрообладнання, що знаходиться під напругою.

Показники хладонів	F_3Br	$\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$	F_2ClBr
Номер хладону	3В1	14В2	В1
Номер галона	301	402	11
Молекулярна маса	48,93	59,89	5,4
Температура замерзання, К	05	62,5	2,5
Вогнегасна концентрація, %	,9	22	2

2.2. Механізм вогнегасної дії хладонів

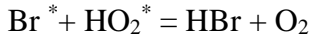
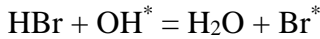
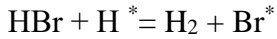
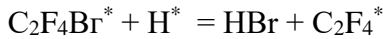
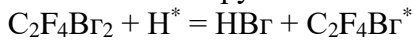
Існують дві основні теорії інгібування горіння радикальна і іонна.

Іонна теорія заснована на тому, що процес горіння включає стадію попередньої активації насамперед молекули кисню за рахунок захоплення електронів киснем з утворенням іона O_2^- . Оскільки атоми галогену, що легко відриваються від молекули галоїдвуглеводню є більшими акцепторами електронів чим кисень, атом галогену гальмує процес горіння, захоплюючи електрони, які необхідні для активації кисню.

Більший розвиток набула радикальна теорія інгібування, заснована на вилученні із зони реакції активних центрів полум'я за рахунок зв'язування їх із молекулами галоїдвуглеводнів або із радикалами, які утворюються при розкладанні хладонів в зоні горіння.

Деякі дослідники вважають, що інгібуюча дія галоїдвуглеводнів пов'язана із їх попереднім термічним розкладанням. Інші вважають, що інгібування починається з реакції взаємодії молекули хладона із активним центром. Високий вогнегасний ефект хладонам надають атоми брому.

Механізм інгібування визначається наступними реакціями:



Таким чином, інгібування пов'язане із загибеллю легких і високоактивних радикалів H^* , OH^* і HO_2^* . При цьому виникають негорючі продукти, а також відбувається заміна первинних АЦП більш важкими і менш активними атомами галоїдів або їх похідними. Одна молекула хладона приводить до утворення множини проміжних продуктів, які, в свою чергу, інтенсивно взаємодіють з АЦП, приводячи до їх загибелі.

При подаванні в горючу систему невеликої кількості хладону область запалення вуглеводнів різко звужується. Пікові значення флегматизуючих концентрацій для більшості хладонів значно нижче (приблизно на порядок), ніж при використанні інертних розріджувачів, таких як азот, вуглекислий газ, аргон.

Потрібно указати на різний характер впливу хладонів на бідні і багаті суміші, що містять в надлишку окислювач або пальне. Найбільш ефективно хладони впливають на багаті суміші, а у разі бідних сумішей помітного впливу добавок не спостерігалось. Так при доданні в суміш, що містить 60% водню, усього біля 0,85% $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$ вона стає негорючою. У разі ж бідних сумішей полум'я продовжувало розповсюджуватися по суміші навіть після внесення в неї понад 5% добавки. Таким чином, зниження швидкості горіння в бідних сумішах досягається внаслідок розбавлення і збільшення втрат тепла на випромінювання, а в багатих сумішах за рахунок хімічної взаємодії молекул інгібіторів з АЦП.

Із підвищенням вмісту кисню витрата хладонів різко зростає. Для підвищення вогнегасної ефективності галоїдвуглеводнів необхідно перевести горючу суміш в область багатих сумішей. Знизити концентрацію окислювача можна розбавленням горючої системи інертним газом, тобто в зону горіння подається одночасно з хладоном азот (азотно-хладоновий склад) або діоксид вуглецю (вуглекислотно-хладоновий склад). Посилити інгібуючу дію хладонів можна також шляхом додання речовин, здатних ефективно взаємодіяти з АЦП, які вмістять в собі кисень.

2.3. Область застосування хладонів

Склади на основі галоїдвуглеводнів ефективно гасять полум'яне горіння різних вуглеводнів. Їх можна застосовувати як засіб об'ємного, так і локального гасіння. Найбільше застосування хладони знайшли в автоматичних стаціонарних установках пожежогасіння, що забезпечують об'ємне гасіння в приміщеннях, що захищаються, об'єм яких не перевищує 6000 м³.

Вони широко використовуються для пожежного захисту обчислювальних центрів, особливо-небезпечних цехів хімічних підприємств, важливих військових об'єктів, атомних електростанцій, архівів, музейних залів і інших цінних об'єктів. Виправдане застосування хладонів для захисту машинних відділень суден, моторних відсіків літаків і ін.

Але використання хладонів не ефективне при гасінні глибинних пожеж (що виникли, наприклад, внаслідок самозаймання), для гасіння матеріалів, що містять в своєму складі кисень, а також металів, гідридів металів і багатьох металоорганічних сполук, горіння яких не носить характер ланцюгової розгалуженої реакції. Хладони не здатні інгібувати гетерогенне горіння, а також горіння, коли в якості окислювача не кисень, а інші речовини (наприклад, оксиди азоту).

Хладонами можна не тільки швидко гасити пожежу, але і ефективно попереджати можливість вибуху, тобто вони також використовуються для цілей флегматизації. В установках об'ємного гасіння передбачено застосування хладонів 114B2 і 13B1, а також комбінованого складу із вмістом CO_2 - 85%, $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$ - 15%.

Ці речовини на перший погляд здаються нешкідливими для людини і навколишнього середовища і є дуже ефективним засобом об'ємного пожежогасіння. Але, нарівні з позитивними якостями склади на основі хладонів мають і ряд недоліків. При високих температурах можливе розкладання хладона і виділення галогенів і галогеноводнів, що мають токсичні властивості. Однак, токсичність середовища, що утворюється при гасінні пожежі хладонами, є меншою, ніж при застосуванні діоксиду вуглецю.

Чисті хладони мають низьку корозійну активність, однак в присутності вологи корозійний вплив помітно збільшується. Крім того, на деякі органічні матеріали хладони можуть діяти як розчинники (гума набухає).

Незважаючи на очевидні переваги вогнегасних складів на основі хладонів, останнім часом їх застосування значно обмежене, так як більшість галоїдвуглеводнів, руйнують озоновий шар Землі (приблизно в 10 раз сильніше руйнують озоновий шар, чим інші газоподібні вогнегасні засоби). У нормальних умовах видалення хладонів з водного середовища і з атмосфери відбувається протягом 70-200 років за рахунок гідролізу і мікробіологічного руйнування, а з ґрунтів - більш, ніж за 1000 років в основному за рахунок життєдіяльності мікроорганізмів. При попаданні в тропосферу фторхлорметани не руйнуються, а при попаданні в стратосферу зазнають фотохімічного розкладання. У свою чергу хлор і бром є сильними каталізаторами розпаду озону.

Тому в 1988 р в Монреалі всі розвинені країни світу, підписали угоду про поступове скорочення виробництва і застосування хладонів. У зв'язку з цим гостро встало питання пошуку альтернативних вогнегасних речовин, які, не поступаючись хладонам по вогнегасній ефективності, були б екологічно безпечними. До альтернативних засобів висувують конкретні вимоги: відсутність або мінімальний негативний вплив на навколишнє середовище, близькість до хладону по ефективності, прийнятна вартість, безпека для людини. Альтернативою хладонів можуть виступати вогнегасні засоби, які мають низьку озоноруйнуючу здатність, не впливають негативно на людину і навколишнє середовище і мають високі вогнегасні властивості. До таких засобів відносять фторпохідні алканів (метану і етану): бромдифторметан FM-100, трифторметан FE-13, гептафторпропан FM-200, пентафторетан FE-25.

Глава 5. припинення горіння флегматизацією

§ 1. Механізм припинення горіння інертними розріджувачами

Якщо при фіксованому співвідношенні вмісту горючої речовини і окислювача до їх суміші додавати інертні компоненти, то концентрації компонентів горючої суміші зменшаться. Це призведе до зниження швидкості реакції окислення в зоні горіння:

$$\omega_{\text{хр}} = k_{\text{ФГр}}^n \Phi_{\text{ок}}^m \exp\left(-\frac{E_{\text{акт}}}{RT}\right),$$

Зниження швидкості хімічної реакції викликає, в свою чергу, зменшення інтенсивності тепловиділення, і зниження температури в зоні реакції.

$$q(+)=V_{\text{см}} Q_{\text{н}} \omega_{\text{хр}}$$

При деякій критичній концентрації розріджувача температура в зоні горіння може зменшитися до температури погасання, що призведе до припинення горіння. Ця суміш не займається навіть від потужного джерела запалювання. Так, наприклад, при гасінні водорозчинних рідин - кетонів, спиртів і ефірів - часто використовується метод їх розведення водою до негорючих концентрацій.

Однак, для пожежегасіння найчастіше використовуються газові інертні розріджувачі - діоксид вуглецю, азот, аргон, водяна пара, а також димові і вихлопні гази.

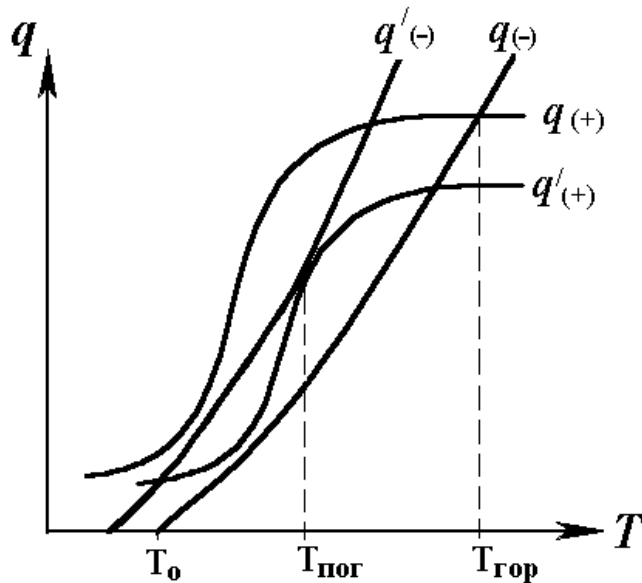
Якщо розріджувач знаходиться в газоподібному стані, то на протікання реакції горіння крім концентрації інертного газу великий вплив мають теплофізичні параметри газової суміші, такі як теплоємність і теплопровідність.

При введенні інертних газів крім зниження концентрації компонентів горючої суміші, відбуваються також втрата частини тепла, що виділяється, на нагрівання цих розріджувачів від початкової температури до температури зони горіння. Кількість енергії, витрачена на нагрів нейтральних газів, можна визначити як

$$Q_{\text{нагр}} = V_{\text{нг}} \rho_{\text{нг}} c_{p \text{ нг}} (T_{\text{гор}} - T_0)$$

Чим вище теплоємність c_p газів, що вводяться, тим більшу кількість тепла вони можуть "поглинути", а, отже, тим вище буде їх вогнегасна дія і меншу кількість негорючих газів необхідно вводити для гасіння.

Отже, при введенні негорючих газів в зону горіння відбувається одночасно зменшення інтенсивності тепловиділення за рахунок зменшення швидкості хімічної реакції та збільшення інтенсивності тепловіддачі за рахунок нагріву введених газів. При певному розбавленні температура стає меншою $T_{\text{пог}}$, а суміш стає негорючою.



Крім відбору тепла за рахунок теплоємності газу, температура може істотно змінюватися за рахунок різкого підвищення коефіцієнта теплопровідності суміші λ . Кількість тепла, що відводиться із зони горіння в зону з меншою температурою за рахунок теплопровідності, може бути визначене за рівняння Фур'є:

$$q_{\text{вп}} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$$

Підвищення коефіцієнта теплопровідності призводить до підвищення швидкості тепловідведення із зони реакції горіння. По такому механізму припинення горіння діє, наприклад, гелій.

Однак, збільшення коефіцієнта теплопередачі інтенсифікує і тепловідведення у підготовчу зону фронту полум'я до свіжої горючої суміші. Це сприяє більш швидкому прогріванню горючої суміші, і зростанню швидкості поширення горіння і температури зони горіння. З цієї причини вогнегасна дія газу флегматизатора дещо знижується.

У зв'язку із цим, комплексним параметром, що характеризує вогнегасну ефективність нейтральних газів, може служити показник ефективності N_{ef} :

$$N_{ef} = \frac{c_p}{\lambda}$$

Для якісної оцінки вогнегасної спроможності нейтральних газів, зробимо порівняння їх термодинамічних параметрів.

Теплопровідність діоксиду вуглецю і аргону майже однакова $\lambda_{CO_2} = 13,6$ Вт/м К, $\lambda_{Ar} = 16,6$ Вт/м К, а теплоємність цих газів різна, діоксид вуглецю трьохатомний газ і його теплоємність більше $c_p CO_2 = 0,91$ кДж/кг К, $c_p Ar = 0,53$ кДж/кг К. Відповідно комплексний показник буде дорівнювати:

$$N_{ef} = \frac{c_p}{\lambda_t} = \frac{0,91}{13,6} = 0,0669$$

для діоксиду вуглецю

$$N_{ef} = \frac{c_p}{\lambda_t} = \frac{0,53}{16,6} = 0,0319$$

для аргону

Таким чином, можна зробити припущення, що ефективність застосування діоксиду вуглецю повинна бути вдвічі вище, ніж аргону. Це підтверджується експериментальними даними. Так, при гасінні метану розведенням вогнегасна концентрація CO_2 - 27%, а аргону Ar – 53%.

З огляду на те, що різні гази розріджувачі мають різну вогнегасну ефективність, потрібно вибирати найбільш ефективний і водночас дешевий склад. “Ідеальний” газ - флегматизатор повинний мати такі властивості:

1. максимально можливу теплоємність C_p ;
2. мінімальний коефіцієнт теплопровідності λ_t ;
3. густину у газоподібному стані близьку до густині повітря.

Ефективними і екологічно безпечними засобами є багатоатомні гази, такі як C_2F_6 , C_3F_8 , оскільки багатоатомні гази мають високу теплоємність. Але вони є дорогими хімічними продуктами, крім того ці гази мають високу густину і при подачі в помешкання опускаються униз і погано підсмоктуються в зону горіння, що призводить до зростання часу гасіння. А такі достатньо ефективні речовини як водяна пара і діоксид вуглецю можуть завдавати шкоди матеріалам і устаткуванню, що захищається.

Тому для цілей пожежогасіння використовують не індивідуальний розріджувач, а суміш інертних газів. Так для гасіння цінних архівів, музейних художніх експонатів використання водопінних або порошкових вогнегасних засобів не допустимо, а найбільш ефективний газоподібний діоксид вуглецю викликає незворотні зміни властивостей експонатів, тому для гасіння подібних пожеж пропонується використання суміші газів CO_2 10%, N_2 50%, Ar 40% (склад Inergen) або розроблений в УЦЗУ склад Conar (CO_2 50%, N_2 40%, Ar 10%).

При гасінні пожеж методом розбавлення гази-розріджувачі можуть подаватися кількома способами. Можна виділити три способи подачі газів:

1. У повітряну зону - застосовується для припинення горіння в закритих технологічних апаратах і закритих приміщеннях малих і середніх об'ємів. Газ розріджувач змішується з повітрям і конвекційними потоками доставляється в зону реакції горіння. Крім того, цей метод може використовуватися для запобігання вибухів в якості флегматизаторів.

2. У зону горіння - застосовується для гасіння речовин і матеріалів, що горять на відкритому просторі.

3. У горючу речовину - для зниження інтенсивності горіння речовини і зниження температури його горіння при підготованні гасіння іншим методом або для запобігання заpalення продукту, що надходить із технологічної установки.

До переваг газового пожежегасіння можна віднести:

- .. мінімальні збитки від впливу на матеріали, що захищаються, і обладнання,
- .. оперативність при використанні,
- .. можливість тривалої експлуатації в автоматичному режимі,
- .. знижені вимоги до профілактики при обслуговуванні.
- .. можливість використання при гасінні пожеж класу В, С, Е, А2 і А1 у початковій стадії розвитку.

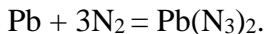
Особливо ефективне застосування інертних газів при захисті музейних цінностей, архівів, бібліотек, обчислювальних центрів і інших особливо важливих об'єктів, де найбільш пріоритетною задачею є максимально можливе збереження матеріальних цінностей.

Недоліки об'ємного гасіння інертними вогнегасними засобами:

- .. сумарна витрата газу становить приблизно двократний об'єм приміщення, тому використовується для приміщень із обмеженим об'ємом;
- .. для гасіння потрібна велика кількість балонів, отже, великі витрати на їх обслуговування (можуть застосовуватися скраплені гази);
- .. вогнегасна концентрація в 3-5 раз більша за небезпечну для людини концентрації, тому необхідна сигналізація і витяжна вентиляція у приміщеннях.

Не рекомендується застосовувати установки газового пожежегасіння при гасінні волокнистих, сипучих і пористих матеріалів, у яких можливе горіння всередині шару у вигляді тління; хімічних речовин, здатних окислюватися без доступу повітря; пірофорних матеріалів. Існують обмеження на застосування інертних розріджувачів при гасінні пожеж класу D. Це пов'язано із температурним режимом горіння металів. Двоокис вуглецю не може бути використаний при гасінні металів, тому за температури горіння металу дисоціює на карбон і оксисен які взаємодіючи з металом підтримують горіння. Застосування азоту також обмежене, тому що він також взаємодіє з металами, що горять із утворенням нітридів і азидів.

Так азот, що за нормальних умов поводить себе як інертний, за підвищеної температури вступає в реакцію з металом, створюючи нестійкі сполуки, які можуть розкладаються з вибухом – азиди, наприклад:



ВИСНОВОК: Припинення горіння при розбавленні середовища інертними розріджувачами, які самі не беруть участь у протіканні екзотермічних процесів, пов'язане з дією кількох механізмів – втратами тепла із зони реакції на нагрівання цих розріджувачів і зниженням швидкості реакції і теплового ефекту за рахунок розбавлення. Вогнегасна здатність НГ визначається комплексним параметром c_p/λ .

§ 2. Флегматизація горючих сумішей газами-розріджувачами.

Негорючі гази можуть використовуватися не тільки для припинення горіння, але і для запобігання виникнення горіння в замкнених об'ємах.

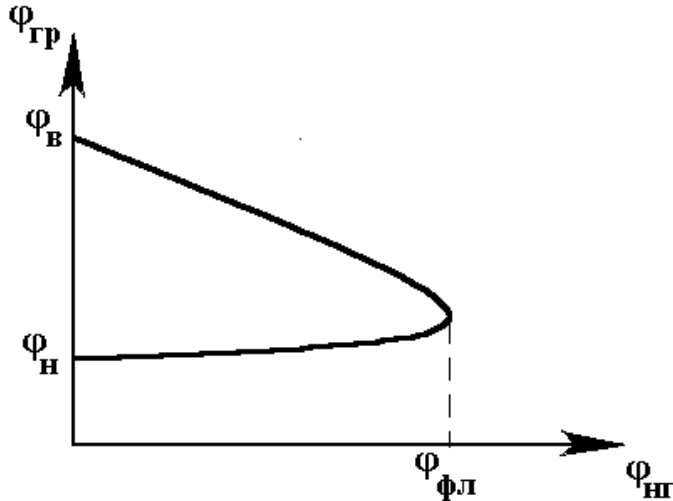
Запобігання утворення горючого середовища в газовому просторі за допомогою газів-розріджувачів називається флегматизацією.

Флегматизація широко використовується для забезпечення безаварійної роботи технологічного устаткування, а також при пуску та зупиненні апаратів, в яких можуть виникнути вибухонебезпечні концентрації горючих речовин.

Запобігання заpalення і вибухів у виробничому устаткуванні з горючими газами, пилом і горючими рідинами засновано на створенні усередині апаратів або приміщень середовища, що не підтримує горіння.

Так у процесі підготовки до запуску каталітичного комплексу синтезу каучуку, захист апаратів проводиться заповненням пароповітряного простору азотом.

Вводячи інертні гази, можна горючі суміші переводити в негорючий стан. При введенні в газоповітряну суміш інертних газів-флегматизаторів концентраційна область запалення звужується - нижня межа зростає, а верхня знижується. За деякої критичної кількості флегматизатора верхня і нижня межі сходяться, створюючи точку флегматизації, яка відповідає мінімальній флегматизуючій концентрації.



Мінімальна флегматизуюча концентрація - найменша концентрація негорючого газу в суміші горючої речовини і окислювача, при якій суміш стає нездатною до горіння при будь-якому співвідношенні горючої речовини й окислювача.

Для отримання значення флегматизуючої концентрацій було використане рівняння балансу тепла в зоні реакції:

$$\eta Q_H = \sum v_{\text{пг}i} c_{\text{пг}i} T_{\text{гор}} + v_{\text{нг}} c_{\text{нг}} (T_{\text{гор}} - T_0)$$

З рівняння випливає:

$$v_{\text{нг}} = \frac{\eta Q_H - \sum v_{\text{пг}i} c_{\text{пг}i} T_{\text{гор}}}{c_{\text{нг}} (T_{\text{гор}} - T_0)}$$

Флегматизуюча концентрація негорючого газу відповідає стехіометричній горючій суміші. При введенні надлишкового компоненту (негорючого газу) температура полум'я поступово знижується і на межі горіння приблизно дорівнює 1300 К. Знаючи склад 4-х компонентної суміші (окислювач V_o , горюча речовина в стехіометричному співвідношенні - V_r , азот повітря - $3,76 V_o$, флегматизатор - $V_{\text{фл}}$), можна оцінити мінімальну флегматизуючу концентрацію негорючого газу із пропорції:

$$\frac{V_r + 4,76V_o + V_{\text{нг}}}{V_{\text{нг}}} = \frac{100\%}{\Phi_{\text{фл}}}$$

$$\Phi_{\text{фл}} = \frac{100V_{\text{фл}}}{V_r + 4,76V_o + V_{\text{фл}}}$$

Числові значення V_r і V_o встановлюються із рівняння хімічної реакції горіння, а $V_{\text{фл}}$ - із попереднього рівняння для $v_{\text{нг}}$.

Флегматизуючу концентрацію азоту, водяної пари або діоксиду вуглецю в критичній точці можна розрахувати за формулою [3]:

$$\Phi_{\text{фл}}^0 = 100 \frac{h'_f H_f + h'_\phi + \sum h'_j m_j}{h''_\phi - 1 + \sum h''_j m_j}$$

де h' ; h'' - коефіцієнти, що характеризують вид негорючого газу;
 h_f ; H_f – теплофізичні показники горючої речовини;
 m_j - число атомів j -го типу в горючій речовині.

При цьому концентрація окислювача також стане менше, ніж критичне значення – мінімальна вибухонебезпечна концентрація кисню:

$$\Phi_{\text{МВКК}}^0 = \frac{100 - \Phi_{\text{фл}}^0}{4,84}, \%$$

Проте, при зміні зовнішніх умов (збільшенні потужності джерела запалення, підвищенні температури чи тиску в системі) мінімальна вибухонебезпечна концентрація кисню може зменшуватися, тому для забезпечення гарантованих умов пожежовибухобезпеки розраховують безпечну концентрацію кисню за формулою:

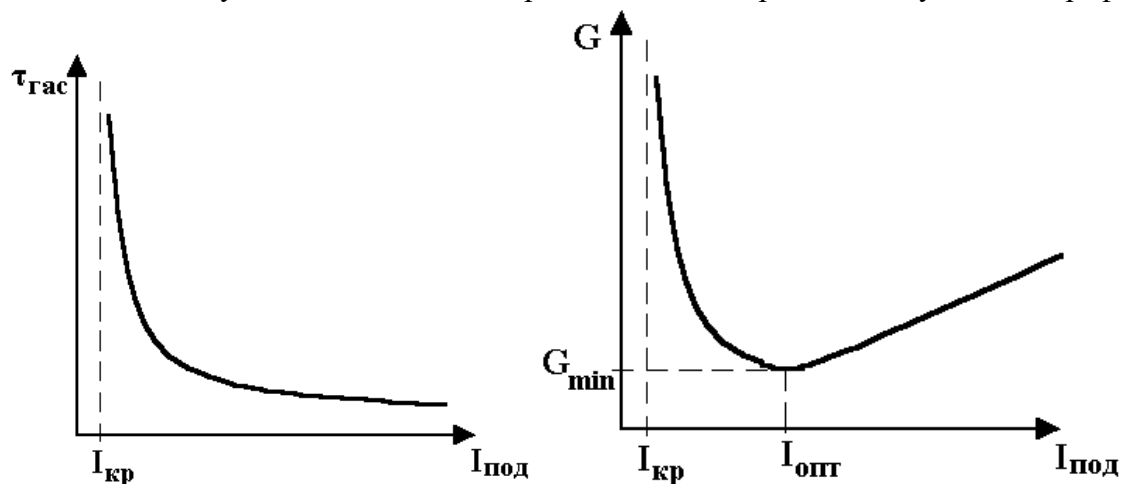
$$\Phi_{\text{без}}^0 = 1,2 \Phi_{\text{МВКК}}^0 - 4,2, \%$$

Чим більш ефективним є вогнегасний засіб, тим менше значення мінімальної флегматизуючої концентрації, а отже при більш високому значенні безпечної концентрації кисню не може виникнути горіння.

Флегматизація один із широко застосованих методів запобігання виникнення процесу горіння. Достовірне значення вогнегасних концентрацій важливе для протипожежного захисту об'єктів, так як є основою розрахунку гарантованого запасу вогнегасної речовини.

§ 3. Розрахунок основних параметрів пожежегасіння

Для гасіння пожеж необхідно правильно розрахувати загальну кількість вогнегасного засобу, при цьому витрата вогнегасного засобу G повинна бути мінімальною, час гасіння τ - не більш допустимого, а інтенсивність подачі I - оптимальною. Типова залежність між даними параметрами пожежегасіння для будь-яких вогнегасних речовин можна представити у вигляді графіків:



Негорючі гази знаходять широке застосування при гасінні пожеж в приміщеннях. При розрахунку параметрів гасіння пожежі з допомогою НГ вирішують дві задачі:

- за відомим допустимим часом гасіння визначають необхідну витрату вогнегасного засобу;
- по відомій витраті НГ визначають час гасіння пожежі, тобто час створення вогнегасної концентрації в об'ємі, що захищається.

Визначимо необхідну інтенсивність подачі НГ, при якій станеться гасіння пожежі в заданий час τ .

Якщо припустити, що при подачі втрати газу відсутні, то об'єм негорючого газу, необхідний для створення вогнегасної концентрації, дорівнює:

$$V_{\text{НГ}} = V_{\text{прим}} \Gamma_{\text{НГ}} = \frac{V_{\text{прим}} \Phi_{\text{вогн}}^0}{100}; \text{м}^3$$

де $V_{\text{НГ}}$ - об'єм НГ;

$V_{\text{прим}}$ - об'єм приміщення;

$\Phi_{\text{вогн}}^0$ - вогнегасна концентрація НГ, %.

Вогнегасна концентрація – найменша об'ємна концентрація газового вогнегасного засобу в суміші горючої речовини з окислювачем, достатня для припинення горіння в умовах стандартного експерименту.

Необхідна питома витрата НГ при заданому часі гасіння дорівнює:

$$\text{об'ємна: } g_{\text{НГ}}^v = \frac{V_{\text{НГ}}}{\tau_{\text{гас}}} = \frac{V_{\text{прим}} \Phi_{\text{вогн}}^0}{100 \tau_{\text{гас}}} \quad [\text{м}^3/\text{с}];$$

$$\text{масова: } g_{\text{НГ}}^m = \frac{V_{\text{НГ}} \rho_{\text{НГ}}}{\tau_{\text{гас}}} = \frac{V_{\text{прим}} \Phi_{\text{вогн}}^0 \rho_{\text{НГ}}}{100 \tau_{\text{гас}}} \quad [\text{кг}/\text{с}]$$

Загальна кількість негорючого газу для припинення горіння:

$$m_{\text{НГ}} = V_{\text{НГ}} \rho_{\text{НГ}} = \frac{V_{\text{прим}} \Phi_{\text{вогн}}^0 \rho_{\text{НГ}}}{100};$$

При вирішенні оберненої задачі по заданій витраті вогнегасного засобу час гасіння пожежі в приміщенні можна визначити по формулі:

$$\tau_{\text{гас}} = \frac{V_{\text{НГ}} \rho_{\text{НГ}}}{g_{\text{НГ}}} = \frac{V_{\text{прим}} \Phi_{\text{вогн}}^0 \rho_{\text{НГ}}}{100 g_{\text{НГ}}}, \text{ с.}$$

Таким чином, для успішного рішення поставлених задач необхідно уміти розраховувати вогнегасну концентрацію НГ для конкретної горючої речовини. Для більшості речовин вогнегасна концентрація НГ близька до флегматизуючої концентрації, тому в розрахунках можна використати її.

Однак такий спрощений підхід не враховує втрат газу, що подається. Уточнимо розрахунок із урахуванням втрат НГ з об'єму приміщення через отвори або нещільності. Для того щоб уникнути громіздких співвідношень, обчислення яких можливе лише з використанням ЕОМ, для аналітичного опису процесу гасіння НГ було введено ряд спрощень.

В процесі пожежі в приміщенні встановлюється визначений режим газообміну — потік продуктів горіння піднімається вгору і залишає приміщення через верхній отвір (чи верхню частину отвору), а через нижній отвір (чи нижню частину отвору) у приміщення надходить повітря. Нехай при подачі НГ в приміщення тиск в ньому практично не підвищується, а з приміщення витісняється суміш повітря із НГ.

Тоді витрата газової суміші, що витісняється з приміщення, буде рівна витраті НГ, що подається в приміщення, тобто при сталому режимі горіння маса газу, що входить в приміщення приблизно дорівнює масі продуктів горіння, що виходять із приміщення:

$$g_{\text{сум}}^{\text{вит}} = g_{\text{нг}}^{\text{под.}}$$

Частина негорючого газу, що подається на гасіння, буде уноситися з продуктами горіння. Витрата НГ, що витікає із приміщення разом з продуктами горіння, пропорційна поточному значенню концентрації НГ в суміші $\phi_{\text{нг}}^0$ на момент часу τ_i , яка знаходиться в приміщенні і витісняється з нього з витратою $g_{\text{сум}}^{\text{вит}}$.

$$g_{\text{нг}}^{\text{вит}} = \frac{\phi_{\text{нг}}^0(\tau_i) g_{\text{сум}}^{\text{вит}}}{100} = g_{\text{сум}}^{\text{вит}} \cdot \phi_{\text{нг}}^0(\tau_i)$$

Кількість втраченого газу буде зростати по мірі підвищення його концентрації у приміщенні. Тоді кількість НГ, що подається в приміщення в будь-який момент часу при гасінні пожежі з урахуванням рівності потоків, що подається і що витісняється, рівна:

$$\Delta g_{\text{нг}} = g_{\text{нг}}^{\text{под.}} - g_{\text{нг}}^{\text{вит}} = g_{\text{нг}}^{\text{под.}} - g_{\text{сум}}^{\text{вит}} \phi_{\text{нг}}^0(\tau_i)$$

$$\Delta g_{\text{нг}} = g_{\text{нг}}^{\text{под.}} [1 - \phi_{\text{вогн}}(\tau_i)]$$

Кількість негорючого газу $\Delta g_{\text{нг}}$ веде до підвищення концентрації НГ в приміщенні аж до вогнегасних концентрацій $\phi_{\text{вогн}}$. Тоді зміна концентрацій НГ в приміщенні за часом можна записати у вигляді диференціального рівняння:

$$\frac{d\phi_{\text{нг}}^0}{d\tau} = \frac{\Delta g_{\text{нг}}}{V_{\text{прим}}} = \frac{g_{\text{нг}}^{\text{под.}} (1 - \phi_{\text{вогн}})}{V_{\text{прим}}}$$

Зробивши розділення перемінних, підстановку отриманих раніше виразів і виразивши концентрацію НГ в процентах, отримаємо вираз:

$$d\phi_{\text{нг}}^0 / [(100 - \phi_{\text{нг}}^0)/100] = g_{\text{нг}}^{\text{под.}} d\tau / V_{\text{прим}}$$

Інтегруємо даний вираз в межах $\tau = 0$, $\phi_{\text{нг}} = 0$ і $\tau = \tau_{\text{гас}}$, $\phi_{\text{нг}} = \phi_{\text{вогн}}$ і отримаємо рівняння, яке зв'язує час гасіння пожежі в приміщенні і витрату вогнегасного газу з урахуванням витікання НГ із приміщення в процесі його подачі.

$$\tau_{\text{гас}} = \frac{V_{\text{прим}}}{g_{\text{нг}}^{\text{под.}}} \ln \frac{100}{100 - \phi_{\text{вогн}}^0}$$

Визначивши час гасіння, можна розрахувати об'ємний запас НГ, необхідний для гасіння пожежі в даному приміщенні:

$$V_{\text{нг}} = g_{\text{нг}}^{\text{под.}} \tau_{\text{гас}} = V_{\text{прим}} \ln \frac{100}{100 - \phi_{\text{вогн}}^0}$$

або масовий:

$$m_{\text{нг}} = V_{\text{прим}} \rho_{\text{нг}} \ln \frac{100}{100 - \phi_{\text{вогн}}^0}$$

З урахуванням коефіцієнта нерівномірності розподілу концентрації флегматизатора ($k_1 > 1$), коефіцієнта запасу ($k_3 \geq 3$) необхідну кількість інертного газу можна визначити як:

$$m_{\text{НГ}} = k_1 k_2 V_{\text{прим}} \rho_{\text{НГ}} \ln \frac{100}{100 - \varphi_{\text{вогН}}^0}$$

Вогнегасна концентрація залежить від природи негорючого газу, виду горючої речовини, умов гасіння, часу розвитку пожежі. Так як вогнегасна концентрація завжди менша, ніж флегматизуюча концентрація цього негорючого газу, то в розрахунках зручно використовувати не вогнегасну концентрацію, а флегматизуючу, яку можна розрахувати за наведеною у попередньому розділі формулою.

Висновок: Використання даної методики дозволяє розрахувати необхідний запас інертного газу, часу і необхідної витрати вогнегасної речовини.

Тоді рівняння матеріального балансу газової суміші, поданої в приміщення, можна виразити диференціальним рівнянням:

$$V_{\text{пом}} d\varphi_{\text{НГ}} = g_{\text{НГ}}^{\text{под}} dt - g_{\text{НГ}}^{\text{вит}} \varphi_{\text{НГ}} dt$$

$\varphi_{\text{НГ}}$ – середня концентрація НГ у приміщенні на момент часу t , виражена в об'ємних частках.

Інтегруючи дане вираження в межах при $\tau = 0$ $\varphi_{\text{НГ}} = 0$, при $\tau = \tau_{\text{гас}}$ $\varphi_{\text{НГ}} = \varphi_{\text{фл}}$, одержуємо:

$$\tau_{\text{гас}} = \frac{V_{\text{прим}}}{g_{\text{НГ}}^{\text{вит}}} \cdot \ln \frac{g_{\text{НГ}}^{\text{под}}}{g_{\text{НГ}}^{\text{под}} - g_{\text{НГ}}^{\text{вит}} \varphi_{\text{фл}}}$$

Якщо логарифм представити у виді ступеневого ряду, скориставшись наближеним співвідношенням $\ln x = 2(x-1)/(x+1)$, то отриманий вираз можна спростити:

$$\tau_{\text{гас}} = \frac{2V_{\text{прим}} \varphi_{\text{фл}}}{2g_{\text{НГ}}^{\text{под}} - g_{\text{НГ}}^{\text{вит}} \varphi_{\text{фл}}}$$

Аналіз отриманого співвідношення показує, що при гасінні пожежі негорючими газами їхня витрата повинна перевищувати деяку критичну величину. Якщо знаменник дроби дорівнює нулю, то час гасіння прагне до нескінченності, отже, припинення горіння не відбудеться. Критична витрата вогнегасної речовини буде дорівнює:

$$g_{\text{НГ}}^{\text{кр}} = 0,5 g_{\text{НГ}}^{\text{вит}} \varphi_{\text{фл}}$$

Критична витрата НГ у процесі гасіння залежить від параметрів пожежі і, зокрема, від часу його вільного розвитку й умов газообміну, що впливають на витрату продуктів горіння, що витікають.

Величину масової витрати продуктів горіння через отвір при природному газообміні можна знайти як:

$$g_{\text{НГ}}^{\text{вит}} = \mu S w \rho, \text{ кг/с}$$

де μ – коефіцієнт опору, що враховує втрати кінетичної енергії газового потоку при проході через проріз за рахунок тертя, завихрення і т.п. і залежить форми прорізу і товщини стінок. Для віконних і дверних прорізів величина μ приймається рівної 0,6—0,65;

S – площа отвору, м^2 ;

w – швидкість руху газового потоку в отворі, м/с ;

ρ – густина газового потоку, кг/м^3 .

Швидкість руху газового потоку в отворі залежить від різниці тисків газового середовища в середині приміщення і зовні, які в свою чергу визначаються температурами. Тоді секундна витрата продуктів горіння можна знайти по формулах:

- у випадку газообміну через один отвір:

$$g_{\text{ПГ}}^{\text{ВИТ}} = 0,67 \cdot \mu \cdot S \sqrt{\frac{2gH_{\text{ПГ}}(\rho_{\text{В}} - \rho_{\text{ПГ}})\rho_{\text{В}}\rho_{\text{ПГ}}}{(\sqrt[3]{\rho_{\text{В}}} - \sqrt[3]{\rho_{\text{ПГ}}})^3}}$$

- у випадку газообміну через два отвори:

$$g_{\text{ПГ}}^{\text{ВИТ}} = \mu S_{\text{ПГ}} S_{\text{ВИТ}} \sqrt{\frac{2gh(\rho_{\text{В}} - \rho_{\text{ПГ}})\rho_{\text{В}}\rho_{\text{ПГ}}}{S_{\text{ПРИТ}}^2 \rho_{\text{В}} - S_{\text{ВИТ}}^2 \rho_{\text{ПГ}}}}$$

h – відстань по висоті між серединами прорізів, м.

Визначимо інтенсивність подач НГ на процес гасіння, тобто секундну витрату вогнегасної речовини на одиницю об'єму палаючого приміщення:

$$I_{\text{НГ}} = g_{\text{НГ}}^{\text{ПОД}} / V_{\text{ПРИМ}}$$

Якщо інтенсивність подачі помножити на час гасіння, то можна одержати загальну витрату НГ на процес гасіння $G_{\text{НГ}}$.

$$G_{\text{НГ}} = \frac{2g_{\text{НГ}} \Phi_{\text{ФЛ}}}{2g_{\text{НГ}} - g_{\text{ПГ}} \Phi_{\text{ФЛ}}}$$

Диференціюючи дану вираз по секундній витраті НГ і дорівнюючи похідну $dG_{\text{НГ}}/dg_{\text{НГ}}$ нулю, можна після ряду спрощень одержати оптимальну інтенсивність подачі вогнегасної речовини, при якій загальні витрати НГ будуть мінімальними:

$$g_{\text{НГ}}^{\text{ОПТ}} = 2,4 g_{\text{НГ}}^{\text{КР}}$$

Таким чином, для проведення розрахунків параметрів гасіння пожежі в приміщенні негорючими газами необхідно знати середню температуру вихідних продуктів горіння, схему газообміну і розміри самого приміщення.

При виведенні формул передбачалося, що НГ рівномірно перемішано в продуктах горіння, а також не враховувалося розширення газів при їхньому нагріванні, нерівномірність розподілу НГ по всьому об'єму приміщення і т.п. Тому для розрахунку фактичної величини питомої витрати НГ вводять поправочні коефіцієнти:

$$G_{\text{НГ}}^{\text{Ф}} = k_1 k_2 k_3 G_{\text{НГ}}$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу НГ по об'єму приміщення (1,2 - 1,5);

k_2 – коефіцієнт запасу (1 - 1,5);

k_3 – коефіцієнт неповноти випаровування (1 - 1,4).

ЛІТЕРАТУРА :

Основна:

1. Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е.В. Процессы горения. М. ВИПТШ МВД СССР, 1984.
2. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. - М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980,-255 с.
3. Баратов А.Н., Иванов Е.Н., Корольченко А.Я и др. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. Справочник., М.: Химия 1987.
4. Демидов П.Г., Саушев В.С. Горение и свойства горючих веществ. М., ВИПТШ МВД СССР, 1975.
5. Демидов П.Г., Шандыба В.А., Щеглов П.П. Горение и свойства горючих веществ. М., Химия 1981.
6. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. М; Стройиздат, 1987. – 288 с.
7. Лабораторний практикум з курсу «Теорія розвитку та припинення горіння» Тарахно О.В., Жернокльов К.В., Баланюк В.М., Харків, 2004.
8. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. М.: Химия, 1979.
9. Повзик Я.С., Ключ П.П., Матвейкин А.М., Пожарная тактика. М.: Стройиздат, 1990.
10. Романенко И.М., Кошмаров Ю.А, Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. - М.: ВИПТШ МВД СССР, 1977-415 с,
11. Справочник “Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения”. Под редакцией Баратова А.Н. и Корольченко А.Я., ч. I и II. - М.: Химия, 1990.

Додаткова:

12. Асеева Р.М., Зайков Г.Е. Горение полимерных материалов. – М.: Наука, 1981.
13. Астапенко В.М., Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С. и др. Термогазодинамика пожаров в помещениях. - М.: Стройиздат, 1988.
14. Баратов А.Н., Иванов Е.Н. Пожаротушение на предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности. М.: Наука, 1979.
15. Бахман Н.А., Беляев А.Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем. – М.: Наука, 1967.
16. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. - М.: РИСО АН СССР, 1961. - 210 с.
17. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. Пер. с англ. М.: Стройиздат, 1990.
18. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. - М.: Наука, 1980.
19. Иванов Е.Н. Противопожарная защита открытых технологических установок. М.: Химия 1986.
20. Исаев С.И. Курс химической термодинамики. М.: Высшая школа, 1986.
21. Корольченко А.Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли. – М.: Химия, 1986.
22. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. Пер. с англ. М.: Мир, 1968.
23. Мальцев В.М., Мальцев М.И., Кошпоров Л.Я. Основные характеристики горения. – М.: Химия, 1979.
24. Михеев В.П. Газовое топливо и его сжигание. – М.: Недра, 1966.
25. Померанцев В.В. Основы практической теории горения. Л.: Энергоатомиздат, 1986.- 312 с.
26. Розловский А.Н. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. М.: Химия, 1980. -376 с.

27. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. – М.: Изд-во АН СССР, 1960.
28. Таубкин С.И. Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. - М., 1999.
29. Таубкин С.И., Таубкин И.С. Пожаро- и взрывоопасность пылевидных материалов и технологических процессов их переработки. – М.: Химия, 1976.
30. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1967.
31. Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. – М.: МГУ, 1957.
32. Шрайбер Г., Порст П. Огнетушащие средства. Пер. с нем. М.: Стройиздат, 1975.
33. Юбилейный сборник трудов Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны. – М.: ВНИИПО МВД России, 1997.