

662.611

Р 939

**Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія**



**В. Г. Рижков
Ю. В. Куріс
І. О. Кутузова**

ТЕОРІЯ ГОРІННЯ ТА ВИБУХУ

Навчально-методичний посібник

*для студентів ЗДІА
напряму підготовки 6.170202 «Охорона праці»*

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

*Затверджено до друку
рішенням науково-методичної ради ЗДІА
протокол № 2 від 10.03.2016р.*

ТЕОРІЯ ГОРІННЯ ТА ВИБУХУ

Навчально-методичний посібник

*для студентів ЗДІА
напряму підготовки 6.170202 «Охорона праці»*

*Рекомендовано до видання
на засіданні кафедри ПЕОП,
протокол № 4 від 27.11.2015р.*

Запоріжжя
ЗДІА
2016

ББК 662.611
Р 939

В. Г. Рижков, к.т.н., доцент, доцент каф. ПЕОП
Ю. В. Куріс, д.т.н., професор, декан металургійного факультету
І. О. Кутузова, асистент каф. ПЕОП

Відповідальний за випуск: *зав. кафедри ПЕОП,*
к.т.н., доцент Г. Б. Кожемякін

Рецензенти:

В. В. Луньов, д.т.н., професор, директор фізико-технічного інституту
Запорізького національного технічного університету;

В. І. Сокольник, к.т.н., професор, завідувач кафедри ВВ Запорізької державної
інженерної академії.

Рижков В. Г.

Р 939 Теорія горіння та вибуху: навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА
напряму підготовки 6.170202 «Охорона праці» / Рижков В. Г., Куріс Ю. В.,
Кутузова І. О.; Запоріз. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2016. – 108 с.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	3
Розділ 1 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	4
1.1 Загальні відомості про горіння й вибух	4
1.2 Ланцюгова теорія горіння	6
1.3 Горіння твердих речовин	10
1.4 Горіння рідин	14
1.5 Горіння газів	21
1.6 Пожежо- і вибухонебезпечний пил	29
1.7 Визначення витрат повітря та кількості продуктів згорання	38
1.7.1 Витрати повітря.	38
1.7.2 Склад і кількість продуктів згорання.	39
1.8 Вибух, його види.	41
1.9 Вибух і детонація.	43
1.10 Ударна хвиля.	48
1.11 Вибухові речовини.	50
1.12 Умови, необхідні для припинення горіння.	66
1.12.1 Гасіння водою	69
1.12.2 Гасіння пінами	73
1.12.3 Гасіння інертними розріджувачами	76
1.12.4 Гасіння галогенвмісними сумішами	78
1.12.5 Гасіння порошками	80
Розділ 2 ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ	83
2.1 Практичне заняття № 1. Температура горіння.	83
2.2 Практичне заняття № 2. Температура спалаху.	84
2.3 Практичне заняття № 3. Температура займання	86
2.4 Практичне заняття № 4. Концентраційні межі займання.	86
2.5 Практичне заняття № 5. Температура самозаймання.	90
2.6 Практичне заняття № 6. Пожежо- і вибухонебезпечний пил	90
2.7 Практичне заняття № 7. Самозагорання.	94
2.8 Практичне заняття № 8. Вибух і детонація.	95
ДОДАТКИ	99
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	108

ВСТУП

Навчальна дисципліна «Теорія горіння та вибуху» продовжує інженерну підготовку студента і базується на знаннях, отриманих при вивченні дисциплін «Фізика», «Хімія», «Основи теплопередачі», «Технічна механіка рідини та газу» та ін.

Дисципліна «Теорія горіння та вибуху» є підґрунтям для нормативних і вибіркових дисциплін: «Пожежна безпека виробництва», «Потенційно небезпечні виробничі технології та їх ідентифікація», «Безпека експлуатації будівель і споруд» та інших.

Дисципліна забезпечує виконання відповідних розділів у дипломних роботах та проектах.

Мета вивчення дисципліни – навчити студентів теоретичним основам горіння твердих, рідких та газоподібних речовин, теорії вибуху.

Основні завдання дисципліни – дати поняття про основні закони горіння та вибуху, методи і засоби боротьби з пожежами та вибухами.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми після вивчення дисципліни студенти повинні:

Знати:

- фізико-хімічну природу горіння;
- види горіння;
- види вибухів;
- основні закономірності кінетики процесу горіння;
- кількісні характеристики горіння та вибухів;
- теоретичні основи пожежогасіння та вибухобезпеки;

Вміти:

- застосовувати знання з дисципліни для боротьби з пожежами та вибухами;
- робити розрахунки теплового та матеріального балансу процесів горіння;
- робити розрахунки стосовно кількісних характеристик горіння та вибухів;
- застосовувати вогнегасні та противибухові засоби.

У навчально-методичному посібнику надані загальні відомості про горіння й вибух, поняття про умови виникнення горіння й вибуху, властивості пожежовибухонебезпечних речовин.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Загальні відомості про горіння й вибух

Горіння — фізико-хімічний процес перетворення компонентів горючої суміші в продукти згорання з виділенням тепла і світла. На відміну від вибуху і детонації проходить з більш низькими швидкостями і не зв'язаний з утворенням ударної хвилі.

Найбільш загальною властивістю горіння є здатність виниклого осередку полум'я переміщатися по всій горючій суміші шляхом передачі тепла або дифузії активних часток із зони горіння в свіжу суміш. У першому випадку реалізується тепловий, а в другому — дифузійний механізм поширення полум'я. Як правило, горіння протікає по комбінованому тепловому дифузійному механізму.

Для процесів горіння характерна наявність критичних умов (по складу суміші, тиску, температурі, геометричним розмірам системи) виникнення і поширення полум'я. У всіх випадках для горіння характерні три типові стадії: виникнення, поширення і згасання полум'я.

Залежно від агрегатного стану пального і окиснювача розрізняють:

- **гомогенне горіння** газів і пароподібних палих речовин в середовищі газоподібного окиснювача;
- **гетерогенне горіння** рідких і твердих горючих речовин в середовищі газоподібного (рідше – рідкого) окиснювача.

За швидкістю поширення полум'я горіння підрозділяють на *дефлаграцію*, що протікає з дозвуковими швидкостями, і *детонацію*, що поширюється з надзвуковими швидкостями [1].

При горінні окиснювач (наприклад, кисень повітря) дифундує через продукти згорання до горючої речовини і потім вступає з ним в реакцію. Час повного згорання, хв.:

$$\tau_r = \tau_\phi + \tau_x, \quad (1.1)$$

де τ_ϕ – час, необхідний для фізичного контакту між палим і окиснювачем, хв;

τ_x – час хімічної реакції, хв.

Для неоднорідної горючої системи $\tau_\phi \gg \tau_x$ і практично $\tau_r \approx \tau_\phi$. Таке горіння називають дифузійним, оскільки його швидкість визначається порівняно повільним процесом – дифузією. Так горять звичайні тверді речовини (деревина, вугілля, папір, пластмаси), рідини, гази в пальниках.

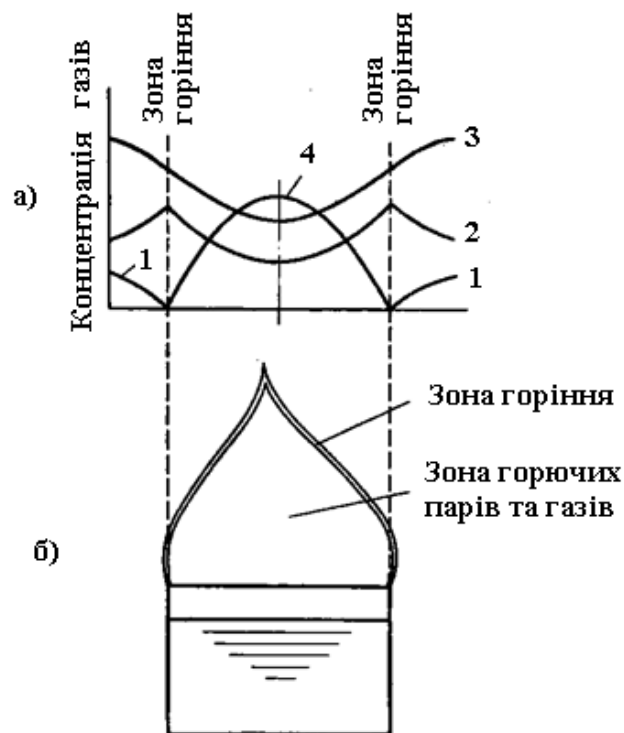
При горінні однорідних систем, таких як суміш повітря з горючим газом або парами вогнебезпечної рідини, зі зваженим в повітрі горючим пилом, $\tau_\phi \approx 0$.

Можна вважати, що $\tau_r \approx \tau_x$. Таке горіння називають кінетичним, воно є вибухом або детонацією.

Вибух - швидкопротікаючий фізичний або фізико-хімічний процес, що йде із значним виділенням енергії в невеликому об'ємі за короткий проміжок часу і що наводить до ударних, вібраційних і теплових дій на довкілля унаслідок високошвидкісного розширення продуктів вибуху. Продукти вибуху зазвичай є газами з високим тиском і температурою, які, розширюючись, здатні здійснювати механічну роботу і викликати руйнування інших об'єктів.

Місцем виділення тепла при дифузійному горінні газів і парів є зона горіння полум'я, а при горінні твердих речовин, не здатних виділяти пари і гази, їх поверхневий шар, що світиться.

Зона горіння дифузійного полум'я (рис.1.1) є тонким шаром газів, що світиться, в який з одного боку поступає паливо, а з іншого боку з повітря дифундує кисень. Стехіометрична суміш, що утворюється, згорає протягом частки секунди, тому концентрація кисню і горючого в зоні горіння (рис. 1.1, а) дорівнює нулю (у місцях пересічення кривих 1 і 4), а концентрація продуктів згорання максимальна. Оскільки весь кисень в зоні горіння вступає в реакцію, то в зоні парів і газів (криві 3 і 4 між пунктирними лініями) горіння відсутнє.



a - розподіл концентрації газів в полум'ї; *б* - схема полум'я;
 1 – розподіл кисню; 2 – розподіл продуктів горіння; 3 – розподіл азоту;
 4 - розподіл пального

Рисунок 1.1 – Схема розподілу дифузійного полум'я

Теоретична (адіабатична) температура горіння – така температура, до якої нагріваються продукти повного згорання, якщо вся теплота, що виділилася, йде на їх нагрів. Цю температуру можна розрахувати:

$$t_p = \frac{Q_{\text{нр}}}{\nu_p \cdot c_p} \quad (1.4)$$

де $Q_{\text{нр}}$ – нижча робоча теплота згорання горючої речовини (додаток 1), кДж/кг (кДж/м³);

ν_p – об'єм продуктів повного згорання, м³/кг (м³/м³);

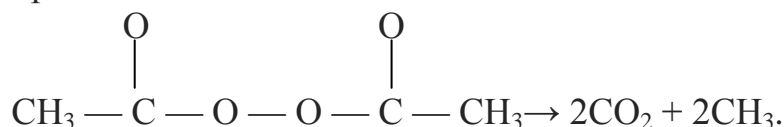
c_p – середня теплоємність продуктів згорання кДж/кг·К (кДж/м³·К).

Дійсна температура горіння завжди менше теоретичної (додаток 2) і залежить від багатьох чинників: коефіцієнта надлишку повітря, умов тепловідводу, способу спалювання і так далі.

1.2 Ланцюгова теорія горіння

Ще в 2-ій половині 18 століття було доведено, що горіння є реакція окислення. Окислення широко поширене в природі. Окрім горіння, це – корозія, гниття, старіння полімерів, мастил і так далі. Загальну теорію таких процесів створили російський академік А.Н. Бах і німецький хімік К. Енглер в кінці 19 ст. Вони встановили, що при звичайній або відносно невисокій температурі до молекул речовин приєднуються цілі молекули кисню. При цьому найбільш активізовані з них поведуться як ненасичені і напіврозкладаються, утворюючи вельми активний кисень, що має два вільні зв'язки за схемою $O=O \rightarrow -O-O-$. Ці молекули легко вступають в з'єднання з речовинами, утворюючи перекиси $R-O-O-R$ і гідроперекиси $H-O-O-H$.

Перекисні з'єднання, зважаючи на свою нестійкість, схильні до розпаду. Наприклад, перекис водню $H-O-O-H$ розпадається на воду і атомарний кисень $H_2O_2 \rightarrow H_2O + O$; перекис етилену в розчині розпадається на вуглекислий газ і вільний метильний радикал:

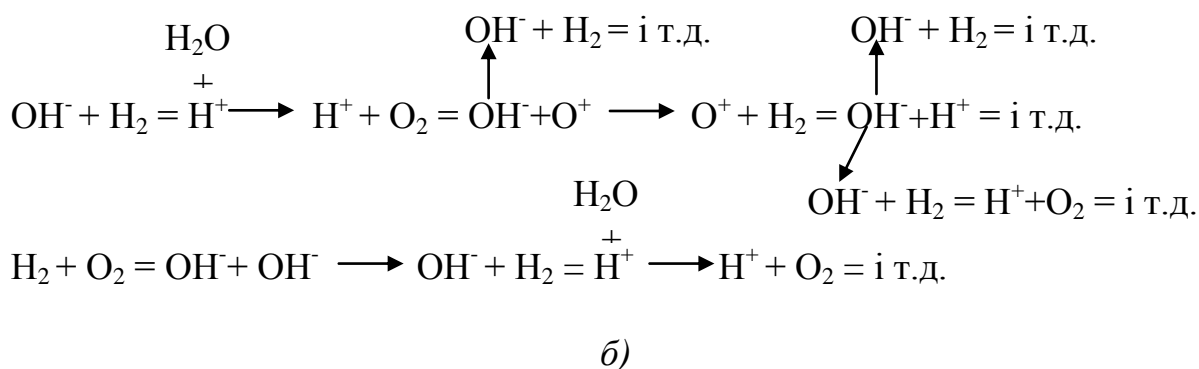
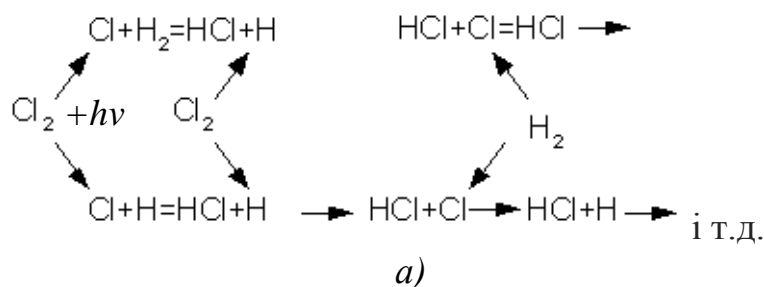


Отримувані при розпаді гідроперекисів і перекисів атомарний кисень і вільні радикали володіють надлишком енергії для продовження подальшого окислення, в результаті якого утворюються кінцеві речовини реакцій. При цьому перекисні сполуки можуть окислювати не лише продукти свого розпаду А за схемою $AO_2 + A = 2AO$, але і інші речовини за схемою $AO_2 + B = AO + BO$. Таким чином, теорія автоокислення Баха - Енглера добре пояснює процеси окислення, що мимоволі відбуваються в природних умовах.

Не дивлячись на свою універсальність, ця теорія, проте, не може пояснити ряд процесів, пов'язаних з окисненням, — дія каталізаторів, антиокислювачів і деякі інші явища. Вони добре пояснюються ланцюговою теорією окислення, розробленою в тридцятих роках академіком Н. Н. Семеновим, за яку в 1956 р. йому була присуджена Нобелівська премія. Суть цієї теорії в тому, що при дії на молекули речовин променистої енергії, електричного розряду або тепла вони, поглинаючи деяку кількість енергії, розпадаються на атоми і радикали, тобто частки з підвищеною хімічною активністю типа H, Cl, O, OH, CH₂, CH₃, C₂H₅ і т. п., які потім стають центрами ланцюгових реакцій.

Такі реакції можуть мати ланцюги, що не розгалужуються і розгалужуються. Приклад ланцюгової реакції, що не розгалужується, — взаємодія хлору з воднем. Якщо приготувати суміш водню і хлору в темноті, то при освітленні ця суміш вибухає.

Дослідження показали, що при освітленні молекула хлору, поглинаючи квант світлової енергії $h\nu$, розпадається на атоми. Активізація однієї молекули хлору повинна була б викликати утворення двох молекул HCl, проте дослідями встановлено, що при цьому утворюється 100 000 молекул хлористого водню. Це пояснюється тим, що при взаємодії атома хлору з воднем утворюється речовина, яка, вступаючи у вторинні реакції, знов відроджується і може продовжувати реакцію за схемою, приведеною на рис. 1.2, а.



а - реакції горіння, що не розгалужується; б - реакції горіння, що розгалужується

Рисунок 1.2 - Схема ланцюгової реакції горіння

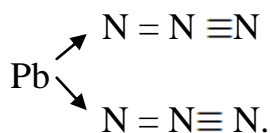
Як видно зі схеми, активізація однієї молекули хлору наводить до утворення двох атомів хлору, що є активними центрами ланцюгової реакції. Кожен з атомів хлору веде свій ланцюг, в якому активними центрами служать атоми хлору і водню, що чергуються. У ланцюгах, що не розгалужуються, реакція активного центру наводить до появи лише одного нового активного центру, тому вона може продовжуватися, але не розгалужуватися.

У реакціях з ланцюгами, що розгалужуються, кожен активний центр, що знов з'явився, утворює два нові центри, один з яких продовжує свій ланцюг, а другий починає новий, що видно з схеми горіння суміші водню і кисню (рис. 1.2, б). Така реакція виникає унаслідок активізації воднево-кисневої суміші енергією електричної іскри, полум'я сірника, тепла, стискування і тому подібне.

Ланцюгова реакція може зупинитися в результаті загибелі активних центрів, що пояснюється зіткненням цих центрів між собою з утворенням стійких молекул, з інертними домішками, із стінками судин або наявністю побічних хімічних реакцій.

Припинення ланцюгової реакції окислення від зіткнення активних центрів з інертними домішками використовується для запобігання поширенню вибухів, наприклад, у вугільних шахтах. На полиці, встановлені під кривлею вироблення через певні проміжки, насипають глинисто-сланцевий пил. При вибуху газо-або пилоповітряній суміші ударна хвиля перевертає полиці і в результаті зіткнення активних центрів з інертними частками глинисто-сланцевого пилу подальше поширення ланцюгової реакції вибуху припиняється. Подібним же чином гасять пожежі за допомогою бромистого етилу, бромистого метилу, тетрафтордиброметану і інших, подібними до них, речовин. Ланцюгова теорія окислення не лише не суперечить теорії автоокислення, але продовжує її і розвиває. Вона показує кінетику окислення, пояснює причини самоприскорення цього процесу, уточнює імовірність того чи іншого шляху активізації реагуючих речовин і, що особливо важливе, показує шляхи припинення цих процесів.

При окисленні завжди виділяється тепло, проте не всяке окислення можна називати горінням. Горіння відрізняється від інших процесів окислення відносно високою швидкістю реакції, виділенням значної кількості тепла і випромінюванням світла. Але горіння може протікати не лише як окислювальний процес з'єднання горючої речовини з окиснювачем. Воно може відбуватися і в результаті розпаду ряду речовин. Так, вибух азиду свинцю PbN_6 , ацетилену C_2H_2 і деяких інших речовин протікає без окислення продуктів їх розпаду, хоча при цьому виділяється тепло і випромінюється світло. Реакція в даному випадку супроводжується виділенням тепла за рахунок звільнення енергії при розриві подвійних і потрійних зв'язків ацетилену $H-C \equiv C-H$ і азиду свинцю PbN_6 :



Розпад азиду свинцю відбувається за рівнянням $PbN_6 \rightarrow Pb + 3N_2 + Q$ при температурі 3100 °С. Таким чином, під горінням слід розуміти всяку хімічну реакцію, при якій виділяється тепло і випромінюється світло.

Горіння на пожежах найчастіше відбувається як окислювальний процес, який виникає при контакті горючої речовини, окиснювача (зазвичай кисню повітря) і джерела запалення. Під горючою речовиною розуміють всяку тверду, рідку або газоподібну речовину, здатну окислюватися з виділенням тепла і випромінюванням світла. Найбурхливіше протікає горіння в чистому кисні.

Із зменшенням концентрації кисню горіння сповільнюється, а за наявності в повітрі 12...14 % кисню зазвичай припиняється. Проте є такі речовини (водень, сірковуглець, оксид етилену і деякі інші), які можуть горіти в повітрі при концентрації кисню 5 % і нижче. Окиснювачем може бути не лише кисень повітря, але і хлор, фтор, сірка і кисневмісні речовини: перманганат калію $KMnO_4$, селітри KNO_3 , $NaNO_3$, NH_4NO_3 , бертолетова сіль $KClO_3$, азотна кислота HNO_3 і деякі інші, які при нагріванні або ударі в природних умовах розпадаються з виділенням кисню, наприклад: $2KClO_3 \rightarrow 2KCl + 3O_2$.

У практиці встановлення причин пожеж джерелом запалення називають всяку дію на горючу речовину і окиснювач, яка може викликати реакцію горіння. Джерела запалення прийнято ділити на відкриті (що світяться) — полум'я, іскри, розжарені предмети, світлове випромінювання і приховані (що не світяться) - тепло хімічних реакцій, адсорбції, мікробіологічні процеси, адіабатичні стискування, тертя, удари і тому подібне. Вони мають різну температуру полум'я, тління і нагріву (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 - Температура полум'я, тління і нагріву деяких джерел запалення

Джерело запалення	Температура, °С	Джерело запалення	Температура, °С
Полум'я сірника	750-850	Нагрів ведучого барабана стрічкового конвеєра при швидкості 2 м/с і пробуксовці 85...95%	до 600
Тління сигарети	700—800		
Полум'я стеаринової свічки	640—940		
Полум'я газової лампи	780—1030		
Полум'я деревної лучини	850—1000		
Полум'я парафінової свічки	1427		
Полум'я бензинової запальнички	1200—1300		
Терміт	3000		
Електрон	Близько 3000		

Під контактом між горючою речовиною, окиснювачем і джерелом запалення мають на увазі таке взаєморозташування їх, при якому виникає горіння. Горіння не виникає, якщо відсутня хоч би одна з цих умов. Це дуже поважно зрозуміти, тому що вся система попередження пожеж заснована на тому, аби не допустити одночасної взаємодії згаданих умов.

Якщо ця взаємодія відбулася і виникла пожежа, то її гасіння в більшості випадків полягає в тому, аби видалити з взаємодії хоч би одну умову, необхідну для горіння.

1.3 Горіння твердих речовин

Різні по хімічному складу матеріали і тверді речовини горять по-різному. Прості (графіт, сажа, деревне вугілля, кокс, антрацит) розжарюються або тліють без утворення іскор, полум'я і диму. Це пояснюється тим, що вони не розкладаються перед тим, як вступити в з'єднання з киснем повітря. Таке (безполуменеве) горіння зазвичай протікає повільно і є гетерогенним, поверхневим.

Горіння складних за хімічним складом твердих горючих матеріалів (деревина, бавовна, каучук, гума, пластмаса та ін.) протікає в дві стадії: розпад, що не супроводжується полум'ям і випромінюванням світла; власне горіння, що характеризується наявністю полум'я або тління. Таким чином, складні речовини самі не горять, а горять продукти їх розпаду. Якщо вони згорають в газоподібній фазі, то таке горіння є гомогенним. При цьому, якщо горіння протікає при змішуванні кисню повітря з горючою речовиною, то воно є дифузійним.

Ступінь пожежної небезпеки різних горючих речовин і матеріалів залежить від їх агрегатного стану, фізико-хімічних властивостей, від конкретних умов зберігання і вживання, у тому числі і від схильності до спалаху.

Під схильністю до спалаху розуміють здатність матеріалу самозапалюватися, загорятися або тліти від різних причин. Всі тверді будівельні матеріали по займистості діляться на три групи: неспалимі, спалимі і важкоспалимі.

Неспалимі матеріали під дією вогню або високої температури не спалахують, не горять і не обвуглюються. До них відносяться всі природні і штучні неорганічні матеріали, вживані в будівництві метали, а також гіпсові або гіпсоволокнисті плити, мінеральні плити на синтетичній, крохмальній або бітумній в'язці.

Спалимі матеріали під дією вогню або високої температури спалахують, тліють або обвуглюються і продовжують горіти, тліти або обвуглюватися після видалення джерела запалення. До спалимих відносяться всі органічні матеріали, що не відповідають вимогам, що пред'являються до неспалимих або важкоспалимих матеріалів: деревина, фанера, пластик, гума.

Важкоспалимі матеріали під дією вогню або високої температури спалахують, тліють або обвуглюються і продовжують горіти або тліти лише за наявності джерела запалення, а після його видалення горіння або тління припиняється. До них відносяться матеріали, що складаються із компонентів, що не згорають і згорають (асфальтовий бетон, гіпсові і бетонні матеріали; мінераловатні плити на бітумній в'язці; глиносолом'яні матеріали густиною не менше 900 кг/м^3 ; повсть, вимочена в глиняному розчині; деревина, піддана глибокому просоченню антипіренами; цементний фіброліт; деякі полімерні матеріали і пінопласти.

Для визначення займистості однорідних твердих матеріалів і речовин використовують метод калориметрії. Сутність його полягає в тому, що випробовуваний зразок поміщають в повітряну камеру калориметра, де він піддається дії джерел запалення різної потужності протягом заданих проміжків часу. Дослідним шляхом підбирають такі умови запалення, при яких відношення кількості тепла, виділеного зразком при горінні, до кількості тепла виділеного джерелами запалення, було би найбільшим. Це відношення називають **показником займистості**:

$$K = \frac{q_0}{q_n}, \quad (1.3)$$

де q_0 - кількість тепла, виділеного зразком при горінні, кДж/кг ;

q_n - кількість тепла виділеного джерелами запалення, кДж/кг.

До неспалимих відносяться матеріали, в яких K менше 0,1, у важкоспалимих матеріалів показник K коливається в межах від 0,1 до 0,5. До цієї ж групи відносяться і важкозаймисті матеріали, в яких величина K спалахують в межах від 0,5 до 2,1. До важкозаймистих відносяться спалимі матеріали, речовини і суміші, здатні загорятися лише під впливом потужного джерела запалення. Спалимі матеріали, характеризуються показником $K \geq 2,1$. Горючі матеріали, речовини, суміші, займисті від короткочасної дії полум'я сірника, іскри, розжареного електропроводу і інших джерел запалення з низькою енергією, відносяться до легкозаймистих (папір, бавовняна матерія, вата, тирса).

Про схильність речовин і матеріалів до спалаху судять по температурі займання і самозаймання. У пожежній безпеці відрізняють запалення і займання.

Запалення – початок горіння (з'являється дим, тління).

Займання — це спалах що супроводжується появою полум'я.

Температура займання — температура речовини, при якій воно виділяє горючі пари і гази з такою швидкістю, що після займання їх від джерела запалення виникає стійке горіння.

Температуру займання твердих горючих матеріалів визначають приладом, що є циліндровою піччю. Випробовуваний зразок поміщають в реакційну камеру, що підігрівається електричними спіралями, і спостерігають за

показниками термопар і поведінкою зразка. При появі продуктів розпаду електроживлення вимикають. Найнижча температура, при якій від відкритого джерела запалення займаються продукти розпаду зразка або зразок починає тліти, є температурою займання даної речовини. Для більшості твердих горючих речовин вона знаходиться в межах 30...800 °С. Одну з найнижчих температур займання має жовтий фосфор (34°C), висока температура займання в амінопласту (725°C). Температура займання більшості порід деревини 270...300 °С.

Самозапалення – початок горіння речовини без дії відкритого джерела запалення, під впливом високої температури.

Самозаймання — це самозапалення, що супроводжується появою полум'я. Під температурою самозаймання розуміють найнижчу температуру речовини, матеріалу, при якій відбувається різке збільшення швидкості екзотермічних реакцій, що закінчуються горінням з полум'ям. Температуру самозаймання твердих горючих матеріалів і речовин визначають по тій же методиці, що і температуру займання, але до випробовуваного зразка не підносять відкрите джерело запалення. Температура самозаймання більшості твердих горючих матеріалів і речовин 40...700 °С. Низьку температуру самозаймання має білий (жовтий) фосфор (44°C), високу — магній, феросплави. У більшості порід деревини ця температура дорівнює 330...470 °С.

При самозайманні велике значення мають каталізатори і антикаталізатори. Самозаймання можливе лише тоді, коли кількість тепла, що виділяється, при окисленні перевищує віддачу тепла в довкілля. Проміжок часу, протягом якого відбувається окислення до займання, називають періодом індукції, або часом запізнювання самозаймання.

Швидкість вигорання твердих матеріалів залежить: від вологості, густини, питомого завантаження (кількість матеріалу, що доводиться на 1 м² площі підлоги), відношення площі поверхні матеріалу до його об'єму, від доступу повітря, швидкості і напрямку вітру і інших чинників. Сухі волокнисті, розпушені і пилоподібні речовини, що мають велику поверхню контакту з киснем повітря, вигоряють значно швидше, ніж вологі ущільнені матеріали з великою густиною. З твердих горючих матеріалів і речовин кіноплівка на нітроосновні, целулоїд, порох і вибухові речовини, що мають достатню кількість кисню для повного згорання, мають найбільшу швидкість горіння. Вони горять під водою, під землею і в герметично закритих резервуарах. Такі вибухові речовини, як йодистий, хлористий і сірчистий азот, ацетиленіста мідь та ін., не містять кисень і вибухають при розкладанні, як і ацетиленісте срібло, за реакцією:



Розрізняють вагову (кг/м²·хв.; кг/м²·с) і лінійну (м/хв.; мм/с) швидкості вигорання твердих матеріалів. Лінійну швидкість можна представити як об'ємну, оскільки м/хв. дорівнює м³/м²·хв. Вагова швидкість вигорання досліджених твердих матеріалів для приміщень з відношенням площі віконних

отворів до площі приміщення 0,16 коливається в межах 0,18...70 кг/(м²·хв). Малу швидкість вигорання має, наприклад, торф, велику — целулоїд.

Характерною особливістю горіння хімічно складних матеріалів і речовин є утворення полум'я і диму.

Полум'я утворюють гази, що світяться, пари і тверді частки. Полум'я, що яскраво світиться, властиво органічним речовинам, що містять 60 % і більш вуглецю, і неорганічним, що виділяють при горінні такі тверді продукти, як Al₂O₃, MgO, P₂O₅, K₂O, Na₂O тощо. Органічні речовини, що містять менше 60% вуглецю або 50 % і більш кисню, горять полум'ям, що не світяться. Неорганічні речовини, що створюють при горінні газоподібні продукти, також горять полум'ям, що не світяться.

Дим є складною сумішшю продуктів горіння, що містять тверді частки діаметром 1 нм і менш. Залежно від складу горючих речовин, їх повного або неповного згорання дим має певний колір і запах. Каучук, гума, пластмаси, смоли виділяють чорний дим; алюміній, магній, фосфор, калій, натрій — білий. Кінострічки, целулоїд і бездимний порошок утворюють жовто-бурі продукти горіння. Деревина при горінні виділяє сірувато-чорний дим, а бавовняні і шерстяні тканини — сірувато-бурий.

Через нестачу кисню повітря для повного згорання на пожежах майже завжди утворюються продукти неповного згорання, серед яких зустрічаються отруйні і вибухонебезпечні. У приміщенні, де горять бавовняні і шерстяні тканини, торф, деревина, папір, утворюється до 0,4 % оксиду вуглецю. При горінні целулоїду і кіноплівки на нітрооснові виділяється до 35 % оксиду вуглецю і до 1 % синильної кислоти. Бувають випадки, коли горіння целулоїду і кіноплівки на пожежі супроводжується сильними вибухами і викликає отруєння людей. Більшість пластмас і штучних волокон згорають. Вони горять з утворенням розріджених смол, а інколи в значній кількості виділяють оксид вуглецю, хлористий водень, аміак, синильну кислоту, фосген, фтор-фосген і деякі інші речовини, що мають високу токсичність.

Температуру горіння на пожежах орієнтовно можна визначити за кольором полум'я або напруженню металевих предметів і по їх плавленню (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Колір нагрітого металу залежно від температури

Колір	Температура, °С
Червоний, ледве видимий	550
Темно-червоний	700
Вишнево-червоний	900
Помаранчевий	1100
Білий	1400

Температура газів в зоні горіння (температура пожежі) в значній мірі залежить від величини горючого завантаження в кілограмах на один квад-

ратний метр площі горіння. При горінні найбільш поширених твердих матеріалів і речовин температура пожежі зазвичай не перевищує 1300 °С.

Горіння іноді починається з тління. **Тління** - горіння твердих речовин (матеріалів), що характеризується відсутністю полум'я, порівняно низькими швидкостями поширення полум'я по речовині (матеріалу) і температурами 400-600°С, часто супроводжується виділенням диму і продуктів неповного згорання. Зазначені ознаки свідчать про тління як процес окислення (горіння), що протікає не інтенсивно через нестачу окиснювача в зоні горіння і (або) через активне розсіювання з цієї зони теплоти. Тління може бути перехідною стадією після припинення полум'яного горіння матеріалу або видалення зовнішнього джерела запалювання. Таке тління називають залишковим.

Тління характерно для дисперсних матеріалів з розвиненою поверхнею (осіла пил, бавовна, тирса, зернопродукти, вугілля тощо).

Температура тління – мінімальне значення температури твердої горючої речовини (матеріалу), при котрій виникає тління. Температура тління залежить не тільки від виду матеріалу, але й від його дисперсності. Так, температура тління комбікорму із середнім розміром частинок 250 мкм дорівнює 355°С, а із середнім розміром 125 мкм - 265°С.

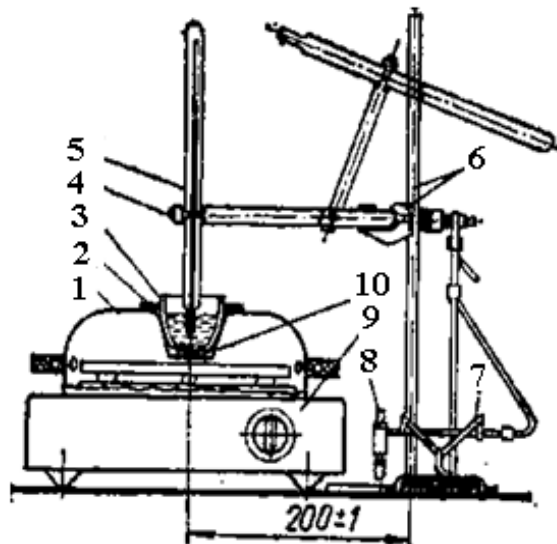
1.4 Горіння рідин

Більшість горючих рідин більш пожежонебезпечні, ніж тверді горючі матеріали і речовини, так як вони легше спалахують, інтенсивніше горять, утворюють вибухонебезпечну суміш пару і погано піддаються гасінню водою. Про схильність рідин до займання судять в основному за температурами спалаху, займання, самозаймання, концентраційним і температурним мемам займання (додаток 3).

Під **температурою спалаху** розуміють найнижчу (в умовах спеціальних випробувань) температуру горючої рідини, при якій над її поверхнею утворюється пароповітряна суміш, здатна спалахувати від джерела запалювання, але швидкість її утворення ще недостатня для подальшого горіння. Температури спалаху горючих рідин і плавких твердих хімічних органічних продуктів, нафтопродуктів, їх сумішей і водних розчинів прийнято визначати за допомогою приладів відкритого або закритого типу.

При користуванні приладом відкритого типу (рис. 1.3) тигель 3 наповнюють випробовуваним продуктом так, щоб рівень рідини був на 12 мм нижче краю тигля для продуктів з температурою спалаху до 210°С включно і на 15 мм нижче краю тигля для продуктів з температурою спалаху вище 210 °С.

Тигель, забезпечений кільцем з пароніту 2, поміщають на азбестову прокладку 10 в нагрівальну ванну 1, встановлену на електричній плитці 9.



1 – нагрівальна ванна; 2 - кільце з пароніту; 3 – тигель; 4 - утримувача штатива; 5 - термометр; 6 – штатив; 7 – підставка штатива; 8 – газова горілка; 9 - електрична плитка; 10 - азбестова прокладка

Рисунок 1.3 - Відкритий тигель для визначення температури спалаху і займання

Термометр 5 за допомогою утримувача 4 штатива 6 з підставкою 7 кріплять у вертикальному положенні так, щоб резервуар із ртуттю знаходився в центрі тигля на рівній відстані від дна і верхнього рівня залитого продукту.

При випробуванні продукт нагрівають зі швидкістю від 1 до 40 °С/хв. і через 1...1,5с над поверхнею продукту на відстані 10 ... 14 мм проводять запалену газову горілку 8 з одного боку тигля до іншого. Температурою спалаху буде температура, яка показується термометром при появі полум'я над частиною або всією поверхнею продукту. Для визначення температури спалаху нижче кімнатної застосовують холодильну камеру або заповнюють ванну охолоджуючими сумішами.

Закритий тигель, на відміну від відкритого, забезпечений пристроєм, що перемішує продукт, і кришкою з отвором і заслінкою, що відкривається при підпалі пароповітряної суміші. У закритому тиглі визначають температуру спалаху в діапазоні від -30 до 370 °С.

Температура спалаху рідин залежить від інтенсивності їх випаровування, пружності парів і коливається у великих межах: від - 52 °С (ізопентан) до +325°С (мінеральні масла).

Спалімі рідини діляться на горючі та *легкозаймисті* - ЛЗР. До ЛЗР відносяться рідини з температурою спалаху до 61 °С у закритому тиглі або до 66 °С у відкритому. Рідини з температурою спалаху вище зазначеної відносяться до *горючих* (ГР).

Легкозаймисті рідини поділяються на три розряди:

I розряд – особливо небезпечні ЛЗР, температура спалаху -18°C і нижче в закритому тиглі чи -13°C і нижче у відкритому; сюди відносяться бензини, ефір діетиловий, сірковуглець;

II розряд – постійно небезпечні ЛЗР, температура спалаху вище -18°C , але не вище 23°C в закритому тиглі чи $-13^{\circ}\text{C} < t_{\text{сп}} \leq 27^{\circ}\text{C}$ у відкритому; сюди відносяться бензол, етанол, октан;

III розряд – небезпечні ЛЗР при підвищеній температурі повітря, $23^{\circ}\text{C} < t_{\text{сп}} \leq 61^{\circ}\text{C}$ в закритому тиглі чи $27^{\circ}\text{C} < t_{\text{сп}} \leq 66^{\circ}\text{C}$ у відкритому; сюди відносяться гас, оцтова кислота, скипидар.

До горючих рідин відносять гліцерин, мазут, мінеральні мастила.

Температуру спалаху рідин у закритому тиглі можна розрахувати за формулою:

$$t_{\text{сп}} = 0,659t_{\text{к}} + \sum_{i=1}^n a_i l_i - 73,14, \quad (1.4)$$

де $t_{\text{к}}$ - температура кипіння (додаток 4), $^{\circ}\text{C}$;

l_i – кількість зв'язків i -го виду у молекулі рідини, шт;

a_i – коефіцієнт для зв'язку i -го виду (додаток 5).

Існує простіша емпірична формула:

$$t_{\text{сп}} = t_{\text{к}} - 18\sqrt{K}, \quad (1.5)$$

де K – коефіцієнт горючості, що дозволяє судити про пожежонебезпечні властивості газів та парів, а також твердих і рідких речовин. Його визначають за формулою:

$$K = 4C + H + 4S + N - 2O - 2Cl - 3F - 5Br \quad (1.6)$$

де C, H, S і т.д. – кількість атомів елемента у формулі (брутто-формулі) речовини.

Якщо $K \leq 0$ речовина не горить, при $K > 0$ – горить.

Якщо маємо суміш рідин, температуру її спалаху у закритому тиглі $T_{\text{сп}}$, тоді коефіцієнт K , розраховують за рівнянням:

$$\sum_{i=1}^n x_i \exp\left(\frac{\Delta_i}{T_{\text{сп}i}} - \frac{\Delta_i}{T_{\text{сп}}}\right) = 1, \quad (1.7)$$

де x_i – мольна частка i -го компоненту суміші;

T_{cni} – температура спалаху i -го компоненту, К;

Δ_i – значення, яке приблизно можна визначити за формулою:

$$\Delta_i = 19,6T_k - 2918,6, \quad (1.8)$$

де T_k – температура кипіння i -го компоненту, К.

Якщо склад суміші заданий у об'ємних частках, то мольну частку компоненту a можна розрахувати за формулою:

$$x_a = \frac{\frac{\rho_a r_a}{\mu_a}}{\sum \frac{\rho_i r_i}{\mu_i}}, \quad (1.9)$$

де ρ_a, ρ_i – густина окремого компонента та компонентів суміші відповідно, кг/м³;

r_a, r_i – об'ємна частка окремого компонента та об'ємні частки усіх компонентів суміші відповідно, %;

μ_a, μ_i – мольна маса окремого компонента та усіх компонентів суміші відповідно, моль.

Наведені залежності вірні для нормального атмосферного тиску $B=101,325$ кПа. Якщо тиск відрізняється від нормального, розраховується поправка, яка додається до знайденої за формулами (1.4), (1.5), або (1.7) температури спалаху:

$$\Delta t = 0,303(B - P), \quad (1.10)$$

де P – дійсний атмосферний тиск, КПа.

У приладах відкритого типу визначають і температуру займання рідин, яка завжди трохи вище температури спалаху. При цьому (після встановлення температури спалаху) продовжують нагрівати випробовуваний продукт зі швидкістю 5 ... 6 °С/хв. Випробування полум'ям газового пальника проводять через кожні 2°С підвищення температури до займання продукту. За **температуру займання** приймають найменшу температуру, при якій продукт запалюється від піднесеного до нього полум'я газового пальника і продовжує горіти не менше 5 с після його видалення.

Температуру займання для рідин можна розрахувати за формулою:

$$t_3 = 48 + 0,88t_k + \sum a_j l_j, \quad (1.11)$$

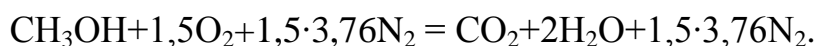
де l_j – кількість зв'язків j -го виду у молекулі рідини, шт;

a_j – коефіцієнт для зв'язку j -го виду (додаток б).

Температуру samozаймання, тобто температуру, при якій рідина запалюється без відкритого джерела полум'я, визначають за особливо розробленим методом у спеціалізованому приладі. При цьому найнижча температура, при якій рідина в приладі спалахує, є температурою її samozаймання. Температура samozаймання у легкозаймистих і горючих рідин коливається від 90 до 600 °С.

У виробничих приміщеннях, різних резервуарах, колодязях і навіть на відкритих майданчиках при тихій погоді ЛЗР і ГР можуть утворити вибухонебезпечну суміш пару з повітрям. Залежно від температури таких рідин концентрація їх парів у повітрі змінюється від мізерно малих значень до 100%, але вона не завжди може бути небезпечна щодо займання. Мінімальну концентрацію парів рідини в повітрі, при якій вони спалахують від відкритого вогню, називають **нижньою концентраційною межею поширення полум'я**. Концентрацію, вище якої пари не запалюються, називають **верхньою концентраційною межею** поширення полум'я. Область концентрації між нижньою і верхньою межами називають **областю займання**.

Пари ЛЗР і ГР в повітрі при концентрації в межах займання можуть спалахувати і вибухати з різною силою. Вибухи найбільшої сили теоретично відбуваються при стехіометричній концентрації, яку можна розрахувати за рівнянням реакції горіння парів рідини в повітрі. Для визначення стехіометричній концентрації, наприклад, метилового спирту в повітрі складають рівняння горіння:



Як видно з рівняння, стехіометрична суміш парів метилового спирту з повітрям складається з $1 + 1,5 + 1,5 \cdot 3,76 = 8,15$ об'ємів, звідки стехіометрична концентрація парів метилового спирту $C_{\text{ст}} = 1/8,15 = 0,1226$ (12,26%).

Концентраційні межі поширення полум'я визначають за допомогою лабораторних приладів, підбираючи в герметично закритій посудині приладу пароповітряні суміші, які при пропущенні електричної іскри можуть займатися.

Слід зазначити, що існує багато розрахункових формул для визначення меж поширення полум'я, але всі вони мають недоліки (не враховують особливості речовин). Частіше за інших для орієнтовних (інженерних) розрахунків застосовуються такі.

Нижня концентраційна межа поширення полум'я, %,::

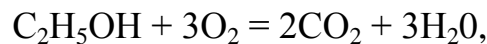
$$H = \frac{100}{4,76(N - 1) + 1}, \quad (1.12)$$

де N – кількість атомів кисню, необхідна для згорання однієї молекули пального компонента суміші, шт.

Верхня концентраційна межа поширення полум'я, %:

$$B = \frac{400}{4,76N + 4}. \quad (1.13)$$

Визначимо, наприклад, межі поширення полум'я парів етилового спирту в повітрі у відсотках до об'єму. Для цього складемо рівняння горіння:



звідки $N = 6$. Підставивши отримане значення N в формули (1.12) і (1.13), отримаємо: $H = 4$; $B = 12,8$. Отримані результати дещо відрізняються від дослідних даних (додаток 7), так як в наведених формулах не враховано деякі фактори, від яких залежать межі поширення полум'я.

Нижні і верхні концентраційні межі поширення полум'я пароповітряних сумішей, що складаються з декількох рідин, визначають за формулами Ле-Шательє, %:

$$H = \frac{100}{\sum_1^n \frac{C_i}{H_i}}, \quad (1.14)$$

$$B = \frac{100}{\sum_1^n \frac{C_i}{B_i}}, \quad (1.15)$$

де C_i – концентрація горючих компонентів, об. % або мас. %;

H_i , B_i – відповідно нижні і верхні концентраційні межі поширення полум'я кожного компонента суміші, об. % або мас. %.

Значення меж поширення полум'я суміші, що складається з декількох горючих компонентів з повітрям, завжди знаходиться між значеннями меж поширення полум'я горючих компонентів, що складають цю суміш. Так як при будь-якій температурі рідини пар над її поверхнею має певну пружність, концентраційні межі запалення ЛЗР і ГР можна виражати через температурні межі.

Нижчою температурною межею поширення полум'я називають ту найменшу температуру рідини, при якій над поверхнею утворюється суміш насичених парів з повітрям, здатна запалати при піднесенні відкритого вогню. Таким чином, нижча температурна межа запалення тієї чи іншої рідини, являє собою температуру її спалаху.

Вищою температурною межею поширення полум'я називають ту найвищу температуру рідини, при якій над її поверхнею утворюється пароповітряна суміш, здатна запалати. Температурними межами поширення полум'я парів називають температури, при яких насичені пари речовини в даному окислювальному середовищі утворюють концентрації, рівні відповідно нижній і верхній концентраційним межам поширення полум'я. Температурні межі поширення полум'я визначають в приладах, що фіксують момент вибуху пароповітряної суміші. Температури спалаху, самозаймання, а також концентраційні та температурні межі поширення полум'я при встановленні їх дослідним шляхом не постійні. Вони залежать від домішок, потужності джерела запалювання, приладу, в якому проводяться випробування, і т. п.

Характерні особливості горіння ЛЗР і ГР обумовлюються їх фізико-хімічними властивостями і умовами, в яких відбувається горіння. Нафтопродукти і ароматичні вуглеводні – бензин, толуол, ксилол, а також скипидар – горять червоним полум'ям, що світиться з утворенням чорного диму. Метиловий і етиловий спирт, оцтова кислота, сірковуглець горять полум'ям, що не світиться. Швидкість вигорання рідин визначають у масових (кг/м²·год) або в лінійних (мм/с) одиницях. Швидкість їхнього горіння непостійна і залежить від температури кипіння, початкової температури, діаметра резервуара і рівня рідини в ньому, наявності в рідині негорючих домішок, доступу свіжого повітря та інших факторів.

Швидкість нагріву при горінні нафтопродуктів залежить від наявності в них вологи. Чим її більше, тим швидше нагрівається рідина, так як пари води прискорюють конвекцію. Прогрів на велику глибину нафтопродуктів при пожежі нерідко викликає їх закипання, а іноді і викид маси нафтопродуктів, що горять, у повітря. Скипання відбувається через наявність в нафтопродуктах дрібних крапель води, що переходить в пар. Викид характерний для нафти, що містить $\geq 3,8\%$ вологи, і мазуту з вологістю $\geq 0,6\%$. Причина викиду – водяна подушка під нафтопродуктами. Він відбувається в той момент, коли шар нафтопродуктів, дотичний з водою, нагрівається значно вище 100 °С. Вода миттєво перетворюється на пару, яка виштовхує нафтопродукт із резервуара.

Температура горіння рідин на пожежах 1000 - 1300 °С. Характерною особливістю ЛЗР і ГР є і те, що багато з них (бензин, бензол, толуол, етиловий спирт, ксилол, скипидар, діетиловий ефір і деякі інші) мають низьку електропровідність і при русі по незаземлених трубах або в резервуарах накопичують статичну електрику. Це може призвести до іскріння і займання рідин.

Більшість ЛЗР і ГР легше води і не розчиняються в ній, а при гасінні спливають на її поверхню. Тому гасять ці рідини пінами, спеціальними хімічними складами і речовинами, а також розпороченими струменями води, вогнегасними порошковими складами.

1.5 Горіння газів

Горіння газів може бути дифузійним (пальники печей і котлів) і кінетичним (вибухи газоповітряних або газо-газових сумішей). За аналогією з парами рідин пожежонебезпечні властивості газів визначаються температурою самозаймання та концентраційними межами поширення полум'я (додатки 7 і 8).

Горіння газів починається з запалювання. **Запалювання** – процес ініціювання осередку горіння. Запалювання горючих газових сумішей може відбуватися при їх контакті з розжареними поверхнями або від відкритого полум'я (іскор).

Запалювання в результаті контакту з розпеченою поверхнею відбувається, якщо температура цієї поверхні перевищує деяке граничне значення, яке зветься температурою запалювання T_z . У тому випадку, коли температура нагрітої поверхні недостатня для виникнення процесу прогресивного розігріву горючої суміші і самоприскорення реакції, екзотермічна теплота відводиться в холодну суміш. Якщо температура стінки перевищує температуру запалювання, в горючій суміші виникає саморозігрів, швидкість якого більше швидкості відводу тепла. За цих умов формується початковий осередок горіння.

Температура запалювання горючої суміші завжди вище температури самозаймання. Це обумовлено різними умовами тепловідводу: при самозайманні нагріта вся суміш.

Температура запалювання залежить від розпеченого матеріалу і природи його поверхні. При цьому виявляються каталітичні або інгібуючі властивості цієї поверхні. Наприклад, при запалюванні суміші водню з повітрям нагрітим сталевим стрижнем, $T_z = 880$ °С, а вольфрамовим дротом – $T_z = 800$ °С.

Температура запалювання змінюється в залежності від тиску суміші: чим нижче тиск, тим вище температура запалювання.

Розповсюдження полум'я. Ініціація горіння газової суміші в одній точці наводить до нагріву довколишніх шарів; у них також починається хімічне перетворення. Згорання цих шарів спричиняє за собою ініціацію горіння наступних і так далі до повного вигорання горючої суміші. Таким чином, при запаленні горюча суміш згорає пошарово. Зона горіння переміщається по суміші, забезпечуючи поширення полум'я.

Зона, в якій протікає хімічне перетворення і відбувається інтенсивне розігрівання газу, що згорає, називається фронтом полум'я. Ширина фронту полум'я газових сумішей при атмосферному тиску складає декілька десятків доль міліметра (для полум'я розпаду ширина фронту істотно ширша).

Встановимо умови, що визначають можливість поширення полум'я по газовій суміші. Перед фронтом полум'я, що поширюється, знаходиться свіжа (що не згоріла) суміш, а ззаду — продукти горіння. Якщо свіжа суміш рухається назустріч фронту полум'я з швидкістю, рівній швидкості поширення полум'я, то полум'я буде нерухомим, як, наприклад, в газовому пальнику.

Розподіл температури в газі характеризується кривою, приведеною на рис. 1.4. Швидкість поширення полум'я визначається співвідношенням м/с:

$$U = be^{-\frac{E}{RT_T}}, \quad (1.16)$$

де b – величина, залежна від властивостей суміші, м/с;

$e = 2,718$;

E – енергія активації Дж/кмоль;

R – універсальна газова постійна, Дж/кмоль·К;

T_T – теоретична температура горіння, К.

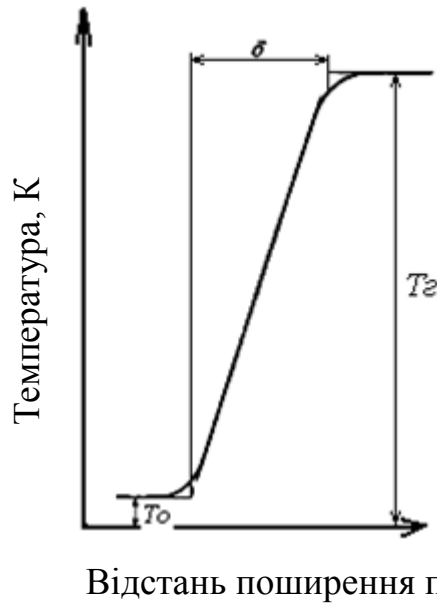


Рисунок 1.4 – Розподіл температури в газовій суміші, по якій поширюється полум'я

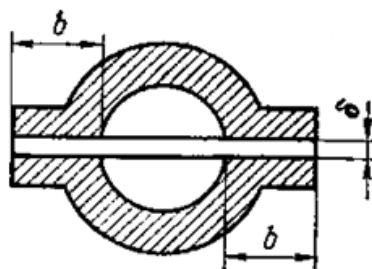
Гомогенна суміш газів або парів з повітрям згорає, як було сказано, у кінетичному режимі, у вигляді вибуху.

Згідно Правилам будови електроустановок (ПБЕ) *під вибухонебезпечною сумішшю* слід розуміти суміш з повітрям горючих газів або пари ЛЗР в певних межах поширення полум'я, а також горючого пилу або волокон з нижньою межею займання не більше 65 г/м^3 під час переходу їх у зважений стан. При цьому мається на увазі, що вибух суміші можливий за наявності або виникненні джерела ініціації вибуху. До вибухонебезпечних також відносяться суміші горючих газів і пари ЛВЖ в певних концентраційних співвідношеннях з киснем або іншим окиснювачем (наприклад, хлором).

У основу класифікації вибухонебезпечних сумішей покладена їх властивість за певних умов не передавати вибух з оболонки устаткування в довкілля через зазори між фланцями або іншими з'єднаннями (рис. 1.5). Ця властивість враховується при виготовленні одного з видів вибухозахищеного

електроустаткування, вибухонепроникність якого забезпечують міцні оболонки з фланцевими або іншими з'єднаннями і всілякою формою зазорами.

Принцип дії вибухозахисту полягає в тому, що при займанні в оболонці вибухової суміші її полум'я, проходячи через зазор, гаситься, а продукти горіння охолоджуються нижче за температуру самозаймання вибухонебезпечного середовища. Для різних вибухонебезпечних сумішей ширина фланця і висота зазору не однакові.



δ - зазор між фланцями; b - довжина фланця

Рисунок 1.5 - Принципова схема будівлі оболонки вибухонепроникного електроустаткування

Залежно від розміру безпечного експериментального максимального зазору (БЕМЗ) вибухонебезпечні суміші газів і пари з повітрям підрозділяються на категорії (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Категорії вибухонебезпечних сумішей газів і парів з повітрям

Категорія	Суміш	БЕМЗ, мм
I	Копальневий метан	> 1
II	Промислові гази і пари	$> 0,9$
II A		$0,5 < \text{БЕМЗ} \leq 0,9$
II B		$\leq 0,5$
II C		

Величини зазорів, приведені в табл. 1.3, визначаються на стандартній установці. Вони служать лише для встановлення категорії вибухонебезпечної суміші, але не є підставою для контролю зазорів вибухонепроникного електроустаткування, в якого ці зазори значно менші.

Вибухонебезпечні суміші газів і пари з повітрям залежно від температури самозаймання підрозділяються на шість груп (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Групи вибухонебезпечних сумішей газів і парів з повітрям за температурою самозаймання

Група	Температура самозаймання, °С
T1	>450
T2	301...450
T3	201...300
T4	136...200
T5	101...135
T6	85...100

Газо- і пароповітряні вибухонебезпечні суміші ділять на чотири категорії і п'ять груп (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Приклади вибухонебезпечних сумішей за категоріями та групами

Категорія	Група	Речовини, що утворюють з повітрям вибухонебезпечну суміш
I	T1	Копальневий метан
IIA	T1	Аміак; ацетон; бензол; діхлоретан; доменний газ; ізобутан; кислота оцтова; ксилол; метан промисловий; вуглецю оксид; пропан; стирол; толуол; етан
IIA	T2	Бутан; етанол; метанол
IIA	T3	Бензини А-66, А-72, А-76, Б-70; гексан; гептан; гас; нафта; пентан; скипидар; уайт-спирит
IIA	T4	Ацетальдегід; декан
IIВ	T1	Коксовий газ; синильна кислота
IIВ	T2	Камфорне масло; формальдегід; етилен
IIВ	T3	Сірководень; дизельне паливо
IIВ	T4	Діетиловий ефір
IIС	T1	Водень; водяний газ
IIС	T2	Ацетилен
IIС	T3	Трихлорсилан
IIС	T5	Сірковуглець
IIС	T6	Фосфін

За допомогою коефіцієнта горючості (рівняння 1.6) можна достатньо точно визначити нижню концентраційну межу поширення полум'я, %:

$$H = \frac{44}{K} \cdot \quad (1.17)$$

Нижні і верхні концентраційні межі поширення полум'я газоповітряних сумішей, що складаються з декількох горючих рідин, визначають за формулами (1.14) і (1.15). Якщо газова суміш складається з горючих та негорючих газів, розрахунок трохи ускладнюється. Розрахунок нижньої концентраційної межі проводиться таким чином. Знаходиться число молей повітря, що припадає на 1 моль вихідної суміші

$$N = \sum_{k=1}^n \frac{K_k}{H_k} - 0,01 \left(\sum_{k=1}^n K_k + \sum_{j=1}^m K_j C_j \right), \quad (1.18)$$

де K_k – концентрація k -го горючого компонента, об. %;

H_k – нижня концентраційна межа поширення полум'я k -го горючого компонента, об. %;

K_j – концентрація j -го негорючого компонента, об. %;

C_j – його розрахунковий коефіцієнт (додаток 9).

Знаходиться нижня концентраційна межа поширення полум'я суміші:

$$H_c = \frac{100}{1 + N}. \quad (1.19)$$

Розрахунок верхньої концентраційної межі проводиться таким чином. Підраховується число атомів і структурних груп i -го виду в молекулах кожного горючого компонента – m_{ik} . Знаходиться умовне число атомів і структурних груп i -го виду в суміші горючих компонентів:

$$m_i = \sum_{k=1}^n \frac{K_k m_{ik}}{\sum K_k}. \quad (1.20)$$

Стандартна теплота утворення суміші горючих компонентів, кДж/моль:

$$\Delta H = \frac{\sum_{k=1}^n \Delta H_k K_k}{\sum K_k}, \quad (1.21)$$

де ΔH_k – стандартна теплота утворення k -го горючого компонента, кДж/моль (додаток 10).

Мінімальна флегматизуюча концентрація j -го негорючого компонента:

$$K_{j\phi} = 100 \frac{a_j \Delta H + b_j + \sum d_i m_i}{c_j - 1 + \sum e_i m_i}, \quad (1.22)$$

де a_j, b_j, c_j, d_i, e_i – розрахункові коефіцієнти (додаток 9)

Коефіцієнт флегматизації j -го негорючого компонента, безрозмірний:

$$C_{j\phi} = \frac{\sum K_k}{\sum \frac{K_k}{C_{k\phi}}}, \quad (1.23)$$

де $C_{k\phi}$ - коефіцієнт флегматизації j -го флегматизатора для k -го горючого компонента (додаток 11) .

Верхня умовна межа поширення полум'я для j -го негорючого компонента, %:

$$B_j = \frac{K_{j\phi}}{\left(1 - \frac{\sum \frac{K_k}{B_k}}{\sum \frac{K_k}{H_k}}\right) (1 - C_{j\phi})}, \quad (1.24)$$

де B_k, H_k – відповідно верхня і нижня межа поширення полум'я для k -го горючого компонента, %.

Верхня межа поширення полум'я для даної суміші, %:

$$B = \frac{100}{\sum \frac{K_k}{B_k} + \sum \frac{K_j}{B_j}}. \quad (1.25)$$

Наведені формули для концентраційних меж поширення полум'я (1.12), (1.13), (1.14), (1.15), (1.17), (1.19), (1.25) вірні для температури 25°C. З підвищенням температури межі розширюються за рахунок зниження нижньої і підвищення верхньої межі поширення полум'я. Для температур 26...150°C мають місце залежності, %:

$$H_t = H \left(1 - \frac{t - 25}{1250}\right); \quad (1.26)$$

$$B_t = B \left(1 + \frac{t - 25}{1250} \right), \quad (1.27)$$

де H_t, B_t – відповідно нижня та верхня межа поширення полум'я при температурі $t, ^\circ\text{C}$. %;

H, B - нижня та верхня межа поширення полум'я при температурі 25°C , %.

Вплив підвищеного тиску на межі поширення полум'я залежить від виду горючої суміші. Для суміші СО з повітрям з підвищенням тиску межі поширення полум'я поволі зближуються, а для сумішей вуглеводнів з повітрям – розходяться.

Межі поширення полум'я суміші водню з повітрям при підвищенні тиску до 2 МПа зближуються, а подальше підвищення тиску веде до розширення меж.

Зменшення тиску нижче за атмосферний веде до зближення меж аж до їх злиття при деякому граничному тиску. Для сумішей вуглеводнів з повітрям цей тиск при температурі $20\dots 25^\circ\text{C}$ складає $4\dots 4,5$ кПа, для суміші водню з повітрям – $0,5\dots 1$ кПа. Граничний тиск для будь-якої суміші зменшується з ростом температури.

Температуру самозаймання газів та парів ЛЗР і ГР можна розрахувати за формулами:

$$t_{cз} = 300 + 116\sqrt{5 - l_c}, \quad \text{якщо } l_c \leq 5 \quad (1.28)$$

$$t_{cз} = 300 - 38\sqrt{l_c - 5}, \quad \text{якщо } l_c \geq 5 \quad (1.29)$$

де l_c – умовна середня довжина молекули сполуки, яка дорівнює середньому арифметичному всіх можливих довжин ланцюгів молекули, безрозмірна:

$$l_c = \frac{1}{n_x} \sum l_j, \quad (1.30)$$

де n_x - кількість ланцюгів у молекулі сполуки, шт;

l_j - довжина j -го ланцюга, безрозмірна.

Під ланцюгом молекули розуміють безперервний ланцюг атомів. Що з'єднує дві кінцеві групи: - CH_3 або $=\text{CH}_2$. Кінцевими групами також вважають всі функціональні групи і цикли (- О -; - ОН; - СО -; - NH_2 ; C_6H_6 та ін.). Позначимо число кінцевих груп m , тоді кількість ланцюгів:

$$n_x = 0,5m(m - 1). \quad (1.31)$$

Довжину ланцюга розраховують за рівнянням:

$$l_j = m_{cj} + \sum l_e, \quad (1.32)$$

де m_{cj} - число атомів вуглецю у j -му ланцюгу, шт;

l_e - еквівалентна довжина функціональної групи або циклу, що входять у ланцюг, безрозмірна:

$$l_e = \frac{a + bm_c}{r}, \quad (1.33)$$

де a і b - коефіцієнти, що залежать від виду групи або циклу (додаток 12);

m_c - загальна кількість атомів вуглецю в молекулі, шт;

r - загальна кількість функціональних груп, циклів, локалізованих кратних зв'язків вуглець – вуглець у молекулі, шт.

Потрійний зв'язок $C \equiv C$ збільшує довжину ланцюга на $6/m_c$ атомів вуглецю. Подвійний зв'язок $C = C$ довжину ланцюга не змінює.

Якщо функціональна група, для котрій розраховується l_e , приєднана до ароматичного циклу з боковим вуглецевим ланцюгом або відокремлена від ароматичного циклу не менш чим одним атомом вуглецю, то за m_c замість реальної кількості атомів вуглецю в ароматичному циклі використовують його еквівалентну довжину:

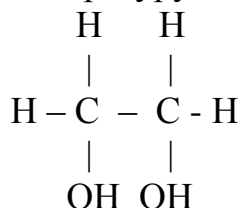
$$l_{ey} = n_{\pi} - 0,5 + \sum l_{ef}, \quad (1.34)$$

де n_{π} - число ядер у циклі, шт;

$\sum l_{ef}$ - сума еквівалентних довжин функціональних груп, що входять до циклу, безрозмірна.

Довжина ланцюга збільшується на 2, якщо в його склад входять 2 групи, приєднані до ароматичного циклу в орто-положенні одна до одної.

Наприклад, треба розрахувати температуру самозаймання етиленгліколю:



Число кінцевих груп у молекулі $m = 4$. Кількість ланцюгів за формулою (1.31): $n_{\text{т}} = 6$. Для ланцюга, до якого не входять групи ОН $l_1 = 2$. Еквівалентна довжина функціональної групи ОН за формулою (1.33) $l_e = 2$. За формулою (1.32) визначаємо: $l_2 = 3$ $l_3 = 4$ $l_4 = 3$ $l_5 = 4$ $l_6 = 6$.

Умовна середня довжина молекули сполуки за рівнянням (1.30) $l_c = 3,67$. Використовуємо формулу (1.28), отримаємо

$$t_{\text{сз}} = 300 + 116\sqrt{5 - 3,67} = 434^{\circ}\text{C}.$$

1.6 Пожежо- і вибухонебезпечний пил

Частинки, що знаходяться в зваженому стані в рідкому або газоподібному середовищі, утворюють з нею дисперсну систему. Частинки твердої речовини в цій системі складають дисперсну фазу, а рідина, повітря або суміш газів є дисперсійним середовищем. Пил знаходиться в зваженому стані в повітрі, утворює *аерозоль*. Пил, що осів з повітря, є *аерогелем*, або просто гелем.

Пил, що отримується на спеціальних пилоприготувальних установках і особливо той, що утворюється як побічний продукт або відходи в різних виробничих процесах, має частинки, розміри яких знаходяться в дуже широких межах.

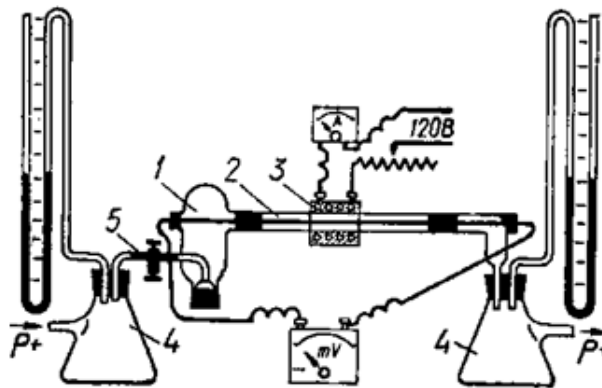
Чим дрібніше пилинки, тим більше розвинена у них поверхня і тим пил небезпечніше відносно займання і вибуху, оскільки хімічна реакція між газом і твердою речовиною, як правило, протікає на поверхні останнього і швидкість реакції збільшується у міру збільшення поверхні: 1 см^3 твердої монолітної речовини має поверхню 6 см^2 , а 1 см^3 пилу, що складається з кубиків з величиною ребра 1 мкм , має поверхню $60\,000 \text{ см}^2$. Так, 1 кг кам'яного вугілля згорає протягом декількох хвилин, а 1 кг кам'яновугільного пилу — за доли секунди. Алюміній, магній, цинк в монолітному стані зазвичай не здатні горіти, але у вигляді зваженого в повітрі пилу вони вибухають. Порошки заліза і свинцю, приготувані прожаренням відповідних оксалатів, самозаймаються у виді аерозолі. Алюмінієва пудра здатна самозайматися в стані аерогелю.

Наявність великої поверхні в пилу обумовлює його високі адсорбційні здібності. Так, 50 см^3 сажі можуть містити в собі 950 см^3 адсорбованого повітря, що в 19 разів більше об'єму самого адсорбенту. Кількість кисню, адсорбованого пилом, недостатньо для повного її згорання, але його завжди вистачає для протікання початкових процесів окислення.

Маючи велику поверхню, пил володіє великою електричною ємністю і здатністю накопичувати заряди статичної електрики унаслідок адсорбції іонів газів, тертя і ударів часток одна об іншу. Наприклад, потенціали в дробарках зерна досягають $10 - 11 \text{ В}$, а у вальцьових млинах $5 - 7 \text{ В}$. При транспортуванні пилу по трубопроводах його потенціал зростає залежно від концентрації, розмірів часток, швидкості руху, матеріалу трубопроводу, вологості

середовища і інших чинників. Так, при концентрації цукрового пилу 1000 г/м^3 і швидкості руху 10 м/с був виявлений потенціал 3200 В . При швидкості руху вугільного пилу понад $2,25 \text{ м/с}$ величина потенціалу досягає 7500 В . При розрядці зарядів такої величини можуть утворюватися іскри, здатні запалювати пилоповітряні суміші. Пожежо- і вибухонебезпечні властивості пилу у вигляді аерозолів визначаються по нижній концентраційній межі займання і температурі самозаймання; у вигляді аерогелів — по температурах тління, займання і самозаймання (додаток 13). Температура самозаймання аерогелю значно нижча, ніж аерозолу, бо висока концентрація горючого в аерогелю сприяє акумуляції тепла, а оскільки порошинки аерозолів знаходяться на деякій відстані один від одного, то це збільшує втрати тепла в процесі окислення при самозайманні. Температура самозаймання залежить також від міри здрібнення часток.

Для визначення температури самозаймання пилу існує прилад (рис. 1.6). При випробуваннях в розпилювальну камеру 1 поміщають порцію пилу і в лівій буферній колбі 4 створюють тиск $6,6 \text{ кПа}$, а в правій — $3,9 \text{ кПа}$.



1 - розпилювальна камера; 2 – кварцова трубка; 3 – нагрівальна піч;
4 – буферна колба; 5 – гвинтовий затиск.

Рисунок 1.6 - Прилад для визначення температури самозаймання пилу

Потім відкривають гвинтовий затиск 5, і пил за рахунок різниці тисків в буферних колбах переміщується зліва направо по кварцовій трубці 2, підігрітій нагрівальною піччю 3. Мінімальна температура усередині кварцової трубки, при якій пил загоряється, є температурою його самозаймання.

Для визначення нижньої концентраційної межі поширення полум'я пил подається форсункою в сталевий циліндр діаметром 106 мм , об'ємом 4 л і підпалюється електронагрівачем. За нижню концентраційну межу поширення полум'я приймають найменшу кількість пилу в грамах на кубічний метр, при якому в циліндрі відбувається вибух. Температури тління і займання визначаються так само, як для твердих речовин і матеріалів.

За пожежо- і вибухонебезпечними властивостями пил розподіляють на 2 групи і 4 класи (табл. 1.6).

Таблиця 1.6 - Класифікація пожежо- і вибухонебезпечного пилу

Група	Критерій групи	Клас	Критерій класу	Приклади
А, вибухонебезпечний пил	$H \leq 65 \text{ г/м}^3$	I, найвибухонебезпечний	$H \leq 15 \text{ г/м}^3$	Нафталін, сірка
		II, вибухонебезпечний	$15 < H \leq 65 \text{ г/м}^3$	Алюміній, борошно
Б, пожежонебезпечний пил	$H > 65 \text{ г/м}^3$	III, найпожежонебезпечний	$t_{c3} \leq 250^\circ\text{C}$	Тютюн, елеваторний пил
		IV, пожежонебезпечний	$t_{c3} > 250^\circ\text{C}$	Вугілля, цинк

До групи А відноситься вибухонебезпечний пил з нижньою межею поширення полум'я $H \leq 65 \text{ г/м}^3$. На відміну від вибухонебезпечного пилу, в пожежонебезпечному, група Б, нижня межа поширення полум'я вище 65 г/м^3 . До цієї групи відносяться тютюновий, елеваторний, вугільний високозольний пил, пил органічних фарбників, цинковий; тирса тощо. Група А розподіляється на 2 класи: I - з $H \leq 15 \text{ г/м}^3$ і II - з $15 < H \leq 65 \text{ г/м}^3$. Група Б розподіляється на 2 класи за температурою самозаймання: III клас - пил з $t_{c3} \leq 250^\circ\text{C}$, IV клас - пил з $t_{c3} > 250^\circ\text{C}$.

При концентраціях вибухонебезпечного пилу, відповідних нижнім межам поширення полум'я, предмети видно на відстані 3 - 4 м. Такі концентрації найчастіше можливі в апаратах, установках або біля них, а також в гірських копальнях і при вибухових роботах.

У виробничих приміщеннях концентрація пилу зазвичай значно нижче за нижні межі поширення полум'я. Верхні межі поширення полум'я пилу настільки великі, що практично недосяжні. Так, концентрація верхньої межі вибуху цукрового пилу 13500 г/м^3 , а торф'яного — 2200 г/м^3 . Тому вони не регламентуються.

Дрібнозернистий пил, що запалав, в стані аерозолу може згорати із швидкістю горіння газоповітряній суміші. При цьому підвищується тиск у зв'язку з утворенням газоподібних продуктів горіння, об'єм яких в більшості випадків перевищує об'єм суміші, і унаслідок нагрівання газоподібних продуктів горіння до високої температури, що теж викликає збільшення їх об'єму. Найбільші тиски, зафіксовані при вибухах: вугільної пудри $0,8-1 \text{ МПа}$ і алюмінієвої — $1,2 \text{ МПа}$.

Здатність пилу вибухати і величина тиску при вибуху в багато чому залежать від температури джерела запалення, вологості пилу і повітря, зольності, дисперсності пилу, температури пилоповітряної суміші.

Чим вище температура джерела запалення, тим нижче концентрація пилу, здатного вибухнути. Збільшення вологовмісту повітря і пилу зменшує інтенсивність вибуху. При $6,5 \%$ вологи в донецькому вугіллі його пил не

вибухонебезпечний ($H > 65 \text{ г/м}^3$). Пил кам'яного вугілля з виходом летких речовин до 40 % при зольності 15...30 % не вибухонебезпечний. Із зменшенням розмірів порошинок тиск при вибуху збільшується. Домішка інертних газів і пару в пилоповітряних сумішах знижує вибуховість. Для попередження вибуху пилу важливо, щоб він не скупчувався, оскільки пил, що осів, при вибуху миттєво переходить в зважений стан, що, як правило, викликає повторний і потужніший вибух.

Міру запиленості приміщень визначають спеціальними приладами або за формулою, г/м^3 :

$$C = \frac{hFd}{V}, \quad (1.35)$$

де h - товщина шару пилу на поверхнях приміщення, мм;

F - площа поверхні приміщення, покрита пилом, м^2 ;

d - об'ємна вага пилу, кг/м^3 ;

V - об'єм приміщення, м^3 .

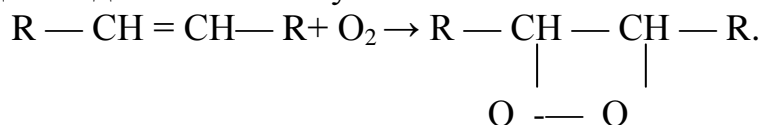
Порівнюючи отримані дані з нижніми межами поширення полум'я, встановлюють, чи можливий в даному приміщенні вибух пилу, чи ні.

Самозагорання речовин і матеріалів.

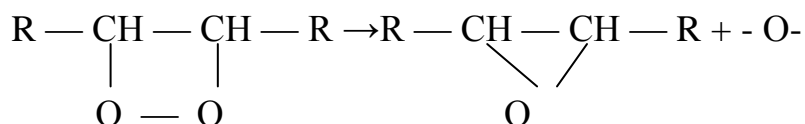
Самозагорання — це початок горіння речовини, матеріалу або суміші без дії відкритого джерела запалення унаслідок різкого збільшення швидкості екзотермічних реакцій. Залежно від причин самозагорання буває хімічним, мікробіологічним і тепловим.

Хімічне самозагорання виникає при дії на речовини кисню повітря, води або при взаємодії речовин. Нерідкі пожежі із-за самозагорання промаслених ганчірок, паклі, вати і навіть металевої стружки. Це пояснюється тим, що більшість рослинних олій і тваринних жирів схильні до самозаймання, оскільки є сумішами гліцеридів жирних кислот, серед яких зустрічаються насичені, — пальмітинова $\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$, стеаринова $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ і ненасичені — олеїнова $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$, лінолева $\text{C}_{17}\text{H}_{31}\text{COOH}$ і ліноленова $\text{C}_{17}\text{H}_{29}\text{COOH}$ відповідно з однією, двома і трьома подвійними зв'язками.

Відповідно до теорії автоокислення академіка Баха ненасичені сполуки, володіючи великою вільною енергією, активізують кисень повітря і вступають з ним у з'єднання за місцем подвійного зв'язку:



Утворені перекиси легко розпадаються з виділенням атомарного кисню:



Атомарний кисень здатний окислювати важко окиснювальні сполуки, такі як гліцериди насичених кислот. Одночасно з окисленням ненасичених сполук йде їх полімеризація.

Окислення і полімеризація протікають з виділенням тепла. Якщо воно відводиться, то процес йде шляхом полімеризації і висихання олії з утворенням твердої плівки. Якщо тепло не відводять, то воно накопичується, температура сполук підвищується до їх самозаймання. Таким чином, само загорання олій і жирів можливо тільки за певних умов: при вмісті достатньої кількості ненасичених сполук, при наявності великої поверхні окислення, при малій тепловіддачі в навколишнє середовище. Про схильність олії або жиру до самозагорання можна судити по його йодному числу, враховуючи властивості галоїдів взаємодіяти з ненасиченими сполуками, приєднуючись за місцем подвійних зв'язків. Йодним числом називається кількість йоду в грамах, поглинена 100 г олії або жиру, що випробовується. Чим вище йодне число, тим більше в цієї олії ненасичених сполук і тим більше воно схильне до самозаймання (табл. 1.7).

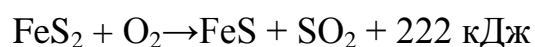
Таблиця 1.7 - Пожежонебезпечні властивості масел та жирів

Масла та жири	Йодне число	Температура спалаху, °С	Температура самозаймання, °С
Олії, що висихають			
Ляне	175...205	300	343
Конопляне	150...172	229	410
Горіхове	142...162	-	430
Тунгове	154...177	239	410
Оліфа натуральна	-	220	420
Напіввисихаючі олії			
Соняшникова	120...142	227	370
Соєва	122...127	240	460
Бавовняна	101...120	233	380
Олії, що не висихають			
Касторова	82...88	220	460
Гірчична	92...123	296	-
Оливкова	77...91	244	370
Кокосова	77...91	216	-
Жири			
Івасевий	135...175	-	-
Дельфіновий	134...174	-	-
Трісковий	144...160	-	-
Тюленячий	150...156	-	-

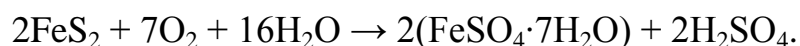
Оліфи, отримані при спеціальній обробці олій проварюванням і добавкою в них солей кобальту, марганцю, свинцю або кальцію, званих сикативами, мають більшу схильність до самозагорання, ніж натуральні олії та жири.

Вважаються, що не самозагораються в звичайних умовах мінеральні масла, оскільки вони майже не містять ненасичених сполук і мають йодне число, рівне 20. Не самозагораються тверді масла і жири, оскільки вони складаються з гліцеридів насичених кислот. Штучні синтетичні масла можуть самозагоратися, тому промаслені ганчірки, дрантя і тому подібне слід збирати в металеві ящики з кришками, що закриваються, аби запобігти виникненню пожежі.

Сульфіди заліза при взаємодії з киснем повітря самозагораються в звичайних температурних умовах. Відмічені випадки самозагорання піриту FeS_2 на заводах сірчаної кислоти, в копальнях і на складах. Окислення піриту на повітрі протікає за реакцією:

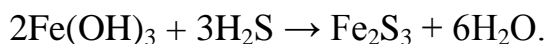


Самозагоранню піриту сприяє волога. В цьому випадку реакція протікає за рівнянням:

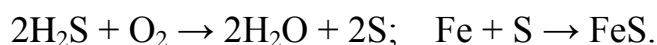


Залізний купорос, що утворюється при цьому, збільшуючись в об'ємі, викликає розтріскування піриту і його подрібнення, що сприяє самозагоранню.

Сульфіди Fe_2S_3 і FeS утворюються в результаті корозії апаратури при взаємодії сірководню або сірки із залізом або його оксидами. Сульфіди заліза утворюються у виробничій апаратурі при нормальній температурі унаслідок дії сірководню на продукти корозії заліза:



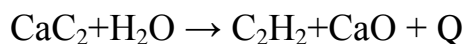
Якщо ж температура в апараті вища за температуру дисоціації сірководню, тобто вище 310°C , сульфід залізу утворюється так:



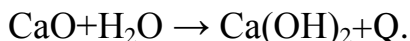
Сульфіди Fe_2S_3 і FeS були причиною неодноразових пожеж і вибухів залізничних цистерн і резервуарів при звільненні їх з-під нафтопродуктів, а також при ремонті нафтоперегінних апаратів. Щоб уникнути пожеж від самозагорання сульфідів заліза, вугілля і руди при складуванні необхідно добре провітрювати. Апарати і резервуари для нафтопродуктів повинні мати антикорозійні покриття. Інакше після зливу нафтопродуктів їх треба продути парою або продуктами горіння і заповнити водою.

Білий фосфор і металоорганічні сполуки, маючи низьку температуру самозаймання, легко самозагораються на повітрі. Тому білий фосфор зберігають, розфасовують і упаковують під водою. Карбіди лужних металів при взаємодії з водою вибухають і самозагораються навіть в атмосфері двооксиду

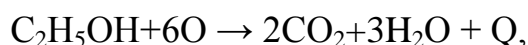
вуглецю і двооксиду азоту. При взаємодії карбіду кальцію CaC_2 з недостатньою кількістю води



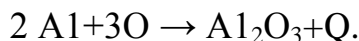
утворюється ацетилен, оксид кальцію і розвивається температура до 1000°C (температура самозаймання ацетилену 335°C). Бувають пожежі в результаті займання горючих матеріалів від тепла, що виділяється при реакції негашеного вапна з водою:



Розкладаючись, пероксиди і оксиди можуть викликати самозагорання не лише горючих органічних сполук:



але і зазвичай негорючих неорганічних речовин, наприклад, алюмінієвого порошку:



Самозагорання речовин при взаємодії зі сполуками, що віддають кисень та іншими окиснювачами протікає настільки швидко, що практично його неможливо припинити. Тому працівникам лабораторій, складів і сховищ необхідно добре знати хімічні властивості речовин, аби не допустити самозагорання при їх взаємодії між собою.

Схильне до самозагорання і деяке буре і кам'яне вугілля. Спочатку адсорбується кисень повітря, при цьому трохи підвищується температура вугілля. Потім розкладаються і окислюються сірчисті сполуки, після чого окислюються ненасичені сполуки і, нарешті, інші складові вугілля. Дослідженнями встановлено, що до самозагорання схильне вугілля, що містить більше 12% летких сполук (оксиду вуглецю, метану, етану, водню), що виділяються з вугілля при сухій перегонці, більше 5% ненасичених сполук і до 8% сірчистих сполук, зокрема піриту. Самозагорання відбувається тим швидше, чим більше подрібнених часток в штабелі вугілля, чим більше його висота, чим вище температура вугілля. Рихле укладання без трамбування і вміст вологи від 0,03 до 9% прискорює самозагорання. Вугілля, що містить більше 10 % вологи, не самозагорається.

Залежно від схильності до самозагорання все вугілля ділять на дві категорії: небезпечні (бурі і кам'яні, за винятком вугілля марки Т, а також їх суміші різних сортів при переважаючій кількості вугілля, що самозагорається) та стійкі (антрацит і кам'яне вугілля марки Т, а також суміші антрациту і вугілля, що самозагорається у відношенні 1:1). Нормами і правилами передбачається ущільнення штабелів при складуванні вугілля, а також контроль теплового режиму усередині штабелів для попередження самозагорання.

Мікробіологічне самозагорання полягає в тому, що при відповідній вологості і температурі у фрезерному торфі, рослинних і деяких інших продуктах інтенсифікується життєдіяльність мікроорганізмів і утворюється

паутиновий глет (грибок). При цьому підвищується температура і міняються форми мікроорганізмів. Досягши температури 75 °С мікроорганізми гинуть, але вже при 60 - 70°С відбувається окислення і обвуглювання деяких легкозаймистих органічних сполук і утворюється дрібнопористе вугілля. За рахунок адсорбції кисню повітря вони нагріваються до температури розпаду і активного окислення органічних сполук, що наводить до займання. Бувають випадки самозагорання торф'яних брикетів в трюмах судів при їх перевезенні. Це пояснюється тим, що брикети руйнувалися і утворювалася дрібна крихта. Брикети, а також фрезерний торф, що мають вологість 50%, не самозагораються. Для запобігання самозагоранню фрезерного торфу правилами зберігання обмежуються розміри штабелів і регулярно контролюється температура усередині них.

З рослинних продуктів до мікробіологічного самозагорання схильні свіжі або заскиртовані в сирому вигляді сіно, конюшина, різні трави і їх суміші, хміль, а також солод, силосна маса, трав'яна мука та інші, в яких протікає життєдіяльність мікроорганізмів. Для попередження самозагорання рослинних продуктів не дозволяється скиртувати їх в сирому вигляді і в сиру погоду, обмежуються розміри скирт (20 × 5 × 4м) і не допускається попадання вологи всередину скирт.

Теплове самозагорання — це самозагорання під дією зовнішнього нагріву речовини (матеріалу, суміші) вище температури самонагрівання. З точки зору хімізму процесу воно не відрізняється від хімічного самозагорання, але відбувається не при звичайній температурі навколишнього середовища (20...25°С), а при підвищеній (40...100°С).

Матеріали (кіно-, фотоплівки і бездимний порошок) на основі нітроцелюлози при температурі 40 – 50°С розкладаються з підвищенням температури до самозаймання. Напіввисихаючі рослинні олії (соняшникова, бавовняна та ін.), касторова оліфа, а також скипидарні лаки, фарби і ґрунтовки можуть самозагоратися при температурі доквілля 80...100 °С. Деревина дубова, соснова, ялинова, вироби з неї, деревно-волокнисті плити і тирса при температурі вище 100 °С схильні до самозагорання. При цій же температурі схильні до самозагорання буковий паркет, покрівельний картон, нітролінолеум, термоліт і деякі інші матеріали і речовини.

Випробування на схильність до теплового самозагорання проводять за допомогою термостатів, в які поміщають кошики з мідної сітки з випробовуваними матеріалами розмірами від 15×15×15 до 200×200×200 мм, і встановлюють залежність між температурою доквілля, розмірами зразка і часом його самозагорання.

Чим ці показники менше, тим більше матеріал схильний до самозагорання. Мірою попередження теплового самозагорання є оберігання речовин від дії джерел нагріву.

Можливість самозагорання матеріалу, що знаходиться в потенційно пожежонебезпечної області, встановлюють за допомогою рівнянь:

$$lgt_o = A - nlg l \quad (1.36)$$

$$lgt_o = B - mlgt \quad (1.37)$$

де t_o - температура навколишнього середовища, при якій може виникнути само загорання, °С;

l - визначальний розмір (зазвичай товщина) матеріалу, мм;

τ - час, протягом якого може відбутися самозаймання, год.;

A, B, n, m - коефіцієнти, що визначаються для кожного матеріалу по дослідним даним (табл. 1.8).

З рівняння (1.36) при заданому l знаходять t_o , при якій може виникнути самозаймання даного матеріалу, з рівняння (1.37) ,при відомій t_o - величину τ .

Таблиця 1.8 – Параметри рівнянь, що характеризують самозагорання

Матеріал	A	n	B	m
Повсть	2,783	0,279	2,350	0,140
Дерматин	2,530	0,230	2,160	0,090
ДВП	2,646	0,207	2,381	0,075
Картон	2,575	0,159	2,334	0,142
Торф фрезерний	2,778	0,264	2,396	0,180
Бавовна	2,547	0,140	2,332	0,057
Сіно	2,515	0,109	2,311	0,058
Силос	2,572	0,182	2,300	0,113

При температурі, нижче обчисленої t_o , або при τ , меншому, ніж час, розрахований за рівнянням (1.37), самозаймання не відбудеться.

Температуру і час самозагорання пиловидних органічних матеріалів визначають за формулами:

$$lgt_o = C + plgs ; \quad (1.38)$$

$$lgt_o = D + qlgt , \quad (1.39)$$

де t_o - температура навколишнього середовища, при якій може виникнути само загорання, °С;

τ - час, протягом якого може відбутися самозаймання, год.;

s - питома поверхня тілу, що утворює пиловидний матеріал, м⁻¹;

C, D, p, q – коефіцієнти які залежать від виду органічного матеріалу, безрозмірні.

Питома поверхня тілу може приблизно бути виражена рівнянням:

$$s = 2 \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{y} + \frac{1}{z} \right), \quad (1.40)$$

де x, y, z – розміри тіла по відповідним осям, м.

Спочатку визначають питому поверхню s . Потім, з рівняння (1.38) при відомій s знаходять t_o , при якій може виникнути самозагорання даного матеріалу, з рівняння (1.39), при відомій t_o - величину τ .

Самозагорання може розвиватися у результаті присутності у речовині деяких домішок. Наприклад, чиста аміачна селітра не має схильності до самозагорання. Якщо у ній нема домішок, її транспортування та зберігання навіть у великих кількостях небезпеки не представляє. Проте, суміші цієї речовини з горючими органічними матеріалами (деревиною, торфом, льоном тощо) схильні до само загорання, що визначається можливістю протікання екзотермічних реакцій нітрування. За рахунок таких реакцій температура селітри росте і коли вона досягає $90 \dots 100^\circ\text{C}$, починається автокаталітичний розклад, в результаті якого суміш самозагорається. Автокаталітичний розклад селітри викликають, головним чином, двооксид вуглецю і водяна пара, що виділяються при розкладі органічних сполук. Каталізаторами розкладу можуть бути домішки металів. Збільшення вмісту мінеральних мастил до 1,8% призводить до переходу дефлаграційного горіння селітри у вибух. Аналогічний процес можливий при присутності у селітрі сполук, що виділяють хлор у зовсім невеликій кількості – 0,005...0,3%.

1.7 Визначення витрат повітря та кількості продуктів згорання

1.7.1 Витрати повітря

Для нормальної роботи теплотехнічних установок, необхідно знати, скільки необхідно повітря для спалювання даного палива, скільки при цьому утворюється продуктів згорання та їх склад. Ці значення розраховують на 1 кг твердого або рідкого і на 1 м^3 газоподібного палива.

Теоретичні витрати повітря (тобто витрати згідно хімічної реакції горіння) при спалюванні твердого або рідкого палива, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$V^0 = 0,0889(C^p + 0,375S_{\text{т}}^p) + 0,345H^p - 0,043O^p \quad (1.41)$$

де C^p, H^p, O^p – вміст відповідних елементів у робочій масі палива, мас. %;

$S_{\text{т}}^p$ – вміст у паливі летючої сірки, що входить у склад органічних сполук

і сірчаного колчедану, мас. %.

Теоретичні витрати повітря при спалюванні газоподібного палива, м³/м³:

$$V^0 = 0,0476 \left[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right], \quad (1.42)$$

де CO , H_2 , H_2S , $C_m H_n$ - хімічні формули компонентів, які позначають їх вміст у газі, об. %.

Величина V^0 являє собою мінімально необхідну кількість повітря для забезпечення повного згорання 1 кг (м³) палива за умови, що весь кисень повітря і кисень, що міститься у паливі, будуть використані при горінні.

Реально таких умов досягти важко, тому повітря для горіння подається у більшій кількості порівняно з теоретичною. Відношення дійсної кількості повітря, що подається до топки, до теоретично необхідного називається *коефіцієнтом надлишку повітря*:

$$\alpha = \frac{V_d}{V^0} \quad (1.43)$$

Значення α залежить від виду палива, способу спалювання і конструкції топки, воно, як правило, коливається у межах 1,02...1,05.

1.7.2 Склад і кількість продуктів згорання

Продукти повного згорання палива при $\alpha=1$ містять CO_2 , SO_2 , H_2O , N_2 . Водяна пара у продуктах згорання утворюється при спалюванні водню або компонентів палива, що містять водень, при випаровуванні вологи палива та вноситься вологим повітрям. Азот потрапляє у продукти згорання з повітря і палива (якщо він там є). У продуктах згорання також присутні інші компоненти повітря – аргон, криптон, ксенон тощо, але їх вміст незначний і їм нехтують.

Якщо $\alpha>1$, у продуктах згорання буде присутнє надлишкове повітря, тобто додаткова кількість азоту і кисню.

Знайдемо теоретичні об'єми продуктів згорання твердого палива, м³/кг. Об'єм CO_2 :

$$V_{CO_2} = 0,0187C^p. \quad (1.44)$$

Об'єм двооксиду сірки:

$$V_{SO_2} = 0,00701S_x^p. \quad (1.45)$$

Часто ці два компоненти об'єднують у формулі для трьохатомних газів:

$$V_{RO_2} = 0,0187C^P + 0,00701S_{\pi}^P. \quad (1.46)$$

Теоретичний об'єм водяної пар

$$V_{H_2O}^0 = 0,111H^P + 0,0124W^P + 1,24W_{\phi} + 0,0161V^0, \quad (1.47)$$

де H^P - кількість пари, що утворилася при згоранні палива, мас. %;

W^P - вологість палива, мас. %;

W_{ϕ} - витрати пари, враховують тільки при застосуванні пари для розпилення мазуту, кг/кг;

V^0 - вологовміст повітря, г/кг; звичайно приймається 13 г/кг.

Теоретичний об'єм азоту:

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,008N^P. \quad (1.48)$$

Якщо $\alpha > 1$, дійсні об'єми компонентів продуктів згорання складуть:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161V^0(\alpha - 1), \quad (1.49)$$

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0,79V^0(\alpha - 1), \quad (1.50)$$

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1). \quad (1.51)$$

Об'єм трьохатомних газів не залежить від коефіцієнту α .

Сумарний об'єм продуктів повного згорання:

$$V_{\Sigma} = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 + 1,061V^0(\alpha - 1). \quad (1.52)$$

Для газоподібного палива теоретичний і дійсний об'єми азоту знаходяться за формулами (1.48) і (1.50). Теоретичний об'єм трьохатомних газів:

$$V_{RO_2} = 0,01(CO_2^n + CO + H_2S + \sum mC_mH_n), \quad (1.53)$$

де CO_2^n - вміст двооксиду вуглецю в паливі, мас. %

Теоретичний об'єм водяної пари:

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \left[H_2S + H_2 + \sum \left(\frac{n}{2} C_m H_n \right) + 0,124d \right]. \quad (1.54)$$

При $\alpha > 1$ дійсні об'єми знаходять за формулами (1.49), (1.50), (1.51), (1.52).

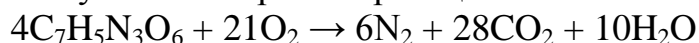
1.8 Вибух, його види

Визначення вибуху вже було надане. Ще одно визначення: **Вибух** – процес швидкого виділення енергії, зв'язаний з раптовою зміною стану речовини, утворенням і поширенням в середовищі особливого роду збурення – ударної хвилі.

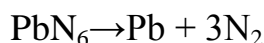
Початкова енергія при вибуху переходить до теплової і кінетичної. Руйнування, що викликав вибух, обумовлені дією ударної хвилі, іноді ще – виділенням теплової енергії..

Вибухи виникають з різних причин, мають різну фізичну природу. Основні види вибухів такі.

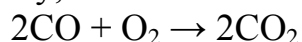
1) *Вибухи, що обумовлені хімічними реакціями.* Частіше всього це реакції окислення або розкладання. До цього типу відносяться вибухи вибухових речовин – твердих (порох, тротил, динаміт) та рідких (нітрогліцерин). Наприклад, вибух тротилу можна виразити реакцією окислення:



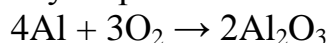
Хоча реакція у цьому випадку може йти іншими шляхами, з утворенням CO, оксидів азоту. Як приклад вибуху внаслідок розкладання можна навести реакцію вибуху азиду свинцю:



Хімічними реакціями зумовлені також вибухи газо-, паро- і пилоповітряних сумішей. На металургійних підприємствах, наприклад, трапляються вибухи доменного газу, який містить оксид вуглецю:



Вибухонебезпечні суміші з повітрям утворюють водень, ацетилен, метан, сірководень, пари ацетону, бензину, діетилового ефіру тощо. Зважений у повітрі алюмінієвий пил вибухає з утворенням глинозему:



Один з найпотужніших вибухів мав місце у 1921 р. у Німеччині, м. Оппау, на заводі анілінових фарбників та добрив, де також вироблялись компоненти вибухових речовин. Вибухнуло 12 000 т суміші сульфату та нітрату амонію, що еквівалентно вибуху 5000 т тротилу. Загинула 561 людина. У місті було зруйновано 80% будівель, 7500 мешканців залишилися без житла, зруйновані 2 села, скинуті з рейок потяги. У радіусі 70 км було вибито скло у будівлях. Звук вибуху було чути у Мюнхені – за 300 км від епіцентру. На місці вибуху утворилася вирва 90×125 м і глибиною 20 м.

2) *Вибухи, зумовлені електричним розрядом.* При іскровому розряді або при розряді через тонкий дріт електрична енергія переходить у тепло повітря чи

метала, що випарився. При сильному електричному розряді, наприклад, при ударі блискавки, утворюється ударна хвиля.

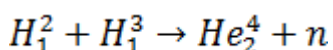
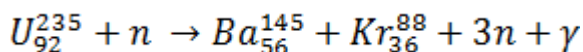
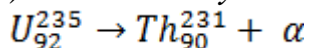
3) *Вибухи, зумовлені швидкою зміною тиску.* Наприклад, при ударі або нагріванні балону із стисненим газом (азотом, аргоном) може зчинитися розрив балона, різке розширення газу. Утворюється ударна хвиля, розлітаються уламки. Такого ж типу вибухи трапляється при аваріях вакуумних установок.

До цього типу вибухів треба віднести вибухи вулканів, коли визволяється енергія тиску, накопичена магмою. Один з масштабніших таких вибухів стався у 1883р. на о.Кракатау. Звук цього вибуху було чути на Мадагаскарі, на відстані 4775 км. Енергія вибуху еквівалентна 100 000 атомних бомб Хіросіми (тобто близько 1500 мегатонн тротилового еквіваленту). Загинули мешканці островів, що розташовані в окрузі – до 200 000 чоловік. Ударна хвиля 7 разів оббігла Землю. Пилові хмари, що утворилися в наслідок вибуху, досягли Європи та Північної Америки. На протязі 3 років рівень сонячної радіації був знижений на 20...30%, значення середньої світової температури повітря знизилася на 1К. 3 місяця у деяких районах США та Франції спостерігалися пурпурові заходи. Але це не самий потужний вулканічний вибух в історії Землі. Близько 1400 р. до н. е. на острові Санторін в Егейському морі стався вибух вулкана, енергія котрого була у 10 разів більша, ніж при вибуху Кракатау – 15 000 Мт тротилового еквіваленту. Утворилася кальдера діаметром 14 км, 72 км³ гірських порід було висаджено у повітря. Вибух Санторіна став причиною загибелі Мінойської цивілізації на о. Крит.

Приблизно така ж енергія вибуху мала місце у 1815 р., коли вибухнув вулкан Тамбора в Індонезійському архіпелазі. Загинуло близько 100 000 чоловік. Пил, що піднявся до атмосфери викликав так званий «рік без літа», що був відмічений повсюдним зниженням температури повітря, зливами, помаранчевими заходами.

4) *Вибухи, зумовлені швидкою зміною фізичного стану.* При пошкодженні барабану котла, вода, що там знаходиться, миттєво закипає, її об'єм різко збільшується, виникає ударна хвиля. При потраплянні розплавлених матеріалів на сиру поверхню або на воду теж спостерігається миттєве закипання та вибух.

5) *Атомні вибухи.* Вони зумовлені ядерними реакціями ділення або синтезу.



Найпотужніший атомний вибух водневої бомби був здійснений СРСР у жовтні 1961 р. на острові Нова Земля. Потужність – 50 (58) мегатонн у тротиловому еквіваленті. Все живе було знищено у радіусі 62 км.

б) *Вибухи, зумовлені кінетичною енергією тіл, що швидко рухаються.* При ударі таких тіл з твердою поверхнею може виділитися теплова енергія, достатня

для перетворення частини речовини у нагрітий газ, що швидко розширюється, утворюючи ударну хвилю. До такого типу вибухів відносяться падіння метеоритів.

Такий вибух знищив динозаврів 65 млн. років тому. На Землю впав астероїд діаметром близько 15 км. Енергія, що при цьому виділилася склала $15 \cdot 10^6$ Мт у тротиловому еквіваленті.

У промисловості частіше за всього зустрічаються вибухи, зумовлені хімічними реакціями, швидкою зміною тиску, швидкою зміною фізичного стану. Далі будуть розглядатися тільки вибухи першого виду.

1.9 Вибух і детонація

Вибухове горіння – це горіння кінетичне. Воно розвивається у газо-, паро- і пилоповітряних сумішах за наявності джерела запалення, а також у вибухових речовинах і матеріалах при ініціюванні вибуху.

Так як у сумішах горюча речовина і окиснювач перемішані, розподілені більш-менш рівномірно, процес дифузії, його швидкість не впливає на поширення полум'я. Швидкість горіння визначається швидкістю хімічної реакції, яка значно більше швидкості дифузії. У результаті різкого термічного розширення продуктів горіння попереду фронту полум'я виникають хвилі стиснення, котрі приводять газ до руху. Подальша хвиля, що поширюється у більш густому середовищі, доганяє попередню. У результаті накладення хвиль утворюється стрибок ущільнення, що є характерним для ударної хвилі. Швидкість ударної хвилі для звичайного вибуху (не детонації) складає десятки і сотні м/с, часто вона перевищує швидкість звуку.

У твердих вибухових речовинах вибухове горіння пояснюється швидким хімічним перетворенням, що викликає ударну хвилю.

Розглянемо явище детонації на прикладі газоповітряної суміші. Припустимо, суміш знаходиться у трубі (рис. 1.7). Запалення відбувається з одного, закритого, боку труби. Полум'я починає поширюватися зі швидкістю, що визначається хімічною реакцією горіння.

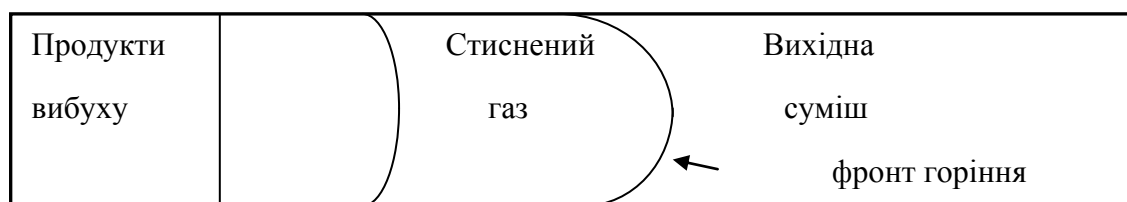


Рисунок 1.7 – Виникнення детонації газоповітряної суміші в трубі

Так як полум'я не може поширюватися в усіх напрямках, інтенсивність ударної хвилі і швидкість поширення полум'я росте. Прилегли до стінки шари газу гальмуються, фронт полум'я скривлюється, зростає поверхня горіння,

збільшується швидкість згорання і швидкість руху фронту полум'я. Полум'я поширюється у все більш стиснутому газі.

Швидкість ударної хвилі залежить від густини середовища, вона зростає з ростом густини. Стиснення, що відбувається у трубі з точки зору термодинаміки близьке до адіабатичного, тобто відбувається так швидко, що теплообмін із навколишнім середовищем через стінки труби не має місця. При адіабатичному стисненні температура газу росте. При досить сильному стисненні температура стисненого газу досягне температури самозаймання і виникне детонація. Таким чином, **детонація** (франц. *détoner*— вибухати, від лат. *detono* - гримлю) – поширення полум'я шляхом займання ударною хвилею. При звичайному вибуху займання здійснюється хімічною ланцюговою реакцією, що поширюється у середовище.

Якщо ударна хвиля поширюється у твердій чи рідкій вибуховій речовині, при певних умовах, які в основному визначаються тиском, також виникає детонація. При детонації сферичного заряду, що підривається зсередини, зовнішні шари заряду не встигають зрушитися з місця до закінчення перетворення. До моменту закінчення реакції горіння газу, що утворилися, займатимуть первісний об'єм вибухової речовини, їх середня густина буде дорівнювати початковій густині твердої речовини (рис. 1.8). Тиск буде дуже великим.

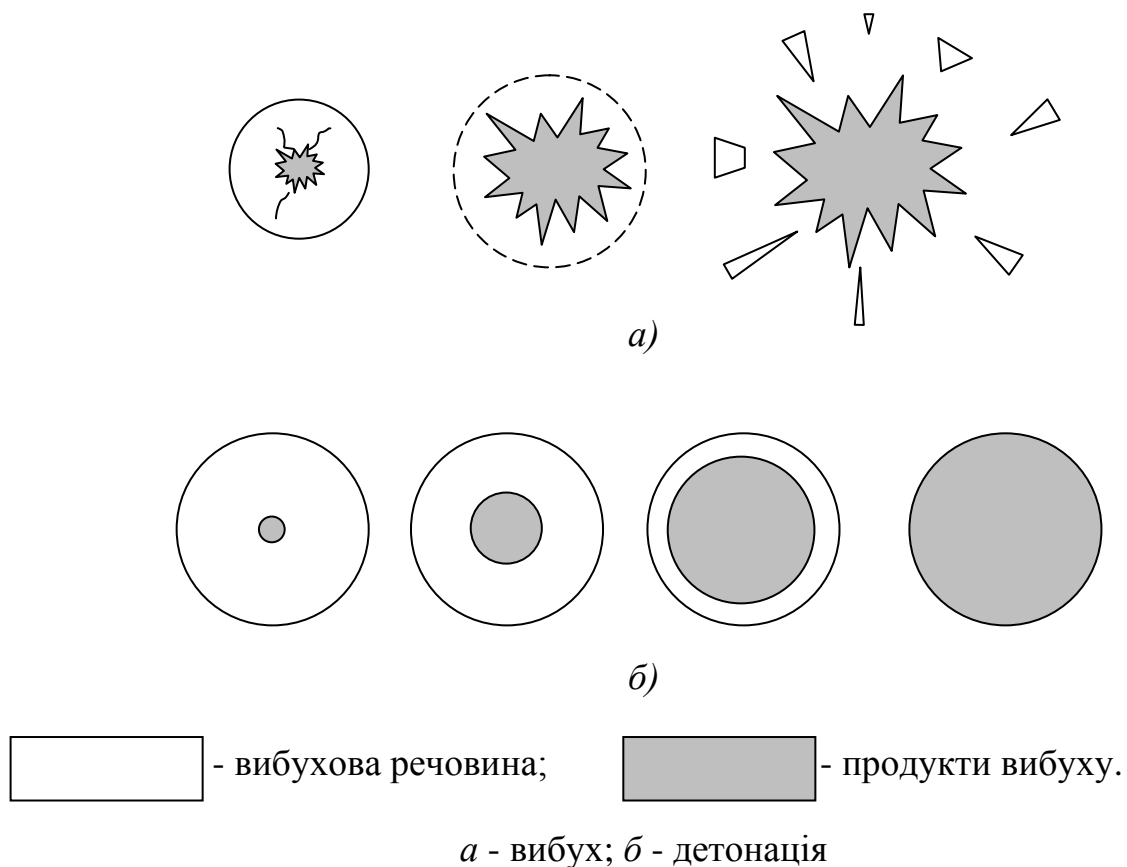


Рисунок 1.8 – Схеми вибуху і детонації

Детонація відбувається з певною для кожної речовини швидкістю. Для газових сумішей це 1000...4000 м/с, для вибухових речовин – 2,5...9 км/с (табл.1.9).

Таблиця 1.9 – Швидкість детонації газових сумішей і вибухових речовин

Речовина	Швидкість детонації, м/с	Речовина	Швидкість детонації, м/с
Водень і кисень	2820	Динаміт	6500
Метан і кисень	2320	Тротил	6900
Сірковуглець і кисень	1800	Нітрогліцерин	8200
Амоніт	2500	Гексоген	8400
Гримуча ртуть	4500	Астроліт	9500

Швидкість потоку продуктів реакції за фронтом хвилі в 2-4 рази менша, ніж швидкість фронту детонації. Тиск в детонаційній хвилі дорівнює, Па:

$$p = \rho_0 u D, \quad (1.55)$$

де ρ_0 - густина вихідної речовини, кг/м³;

u - швидкість потоку продуктів реакції, м/с;

D - швидкості фронту хвилі детонації, м/с.

Тиск при детонації газів зазвичай складає 2-3 МПа, в разі твердих вибухових речовин може досягати 20-40 ГПа; температура продуктів детонації складає 2000-5000К.

Стійка стаціонарна детонація, що поширюється з швидкістю, постійною для даної речовини, відбувається за умови, якщо швидкість детонаційної хвилі відносно продуктів реакції дорівнює швидкості звуку c в них: $D = c$. Якщо збудити в середовищі детонацію з більшою швидкістю, хвиля розрідження, що виникає за її фронтом (у продуктах реакції), наздоганяє фронт детонації, знижує тиск і швидкість детонації доти, поки вони не набудуть значень, що відповідають умові $D = c$.

Насправді стаціонарна детонація в газах нестійка. Фронт ударної хвилі не плоский і не гладкий, він зборознений дрібними поперечними хвилями, процес як би пульсує: реакція за фронтом хвилі йде нерівномірно, виникає в окремих точках при зіткненні поперечних хвиль одна з одною або зі стінками труби, у яку поміщений реагуючий газ. Відстань між центрами виникнення реакції збільшується, а число їх у фронті хвилі зменшується у міру зменшення швидкості і тиску детонації. Поблизу меж детонації (нижньої і верхньої) не зрідка залишаються всього один-два центри. Вони рухаються уздовж стінок

труби по спіралі, здійснюючи декілька десятків тисяч зворотів в секунду. Це – так звана спінова детонація в газах. У рідких і твердих речовинах детонація також може відбуватися нерівномірно, у тому числі і в режимі спінової детонації.

Тиск в ударній хвилі та її швидкість зменшуються у міру видалення від центру. Тиск зменшується приблизно обернено пропорційно квадрату відстані.

Однією з характеристик детонаційної здатності речовини є **критичний діаметр** - найменший діаметр циліндричного заряду вибухової речовини, при якому можливе поширення детонації.

При діаметрі заряду менше критичного детонація або не виникає, або затухає. Мінімальна швидкість детонації, відповідна критичного діаметру, називається **критичною швидкістю**. Зі збільшенням діаметра заряду швидкість детонації зростає до постійного значення, характерного для даного складу та стану вибухової речовини (ВР). Діаметр заряду, вище якого швидкість детонації не збільшується, називається **граничним діаметром**, а швидкість - граничною або оптимальною швидкістю детонації.

Для бризантних індивідуальних вибухових хімічних сполук критичний діаметр зазвичай становить кілька мм, для речовин, що ініціюють - соті частки мм, для гранульованих промислових ВР - до 150 мм. Використання ВР з великим критичним діаметром детонації не має практичного сенсу.

На величину критичного діаметра детонації впливають склад, ступінь подрібнення, фізичний стан ВР, вологість, температура, густина і інші параметри. Значно знизити критичний діаметр може міцна оболонка заряду.

Критичні діаметри деяких ВР наведені в таблиці 1.10.

Таблиця 1.10 – Критичні діаметри детонації

Вибухова речовина	Критичний діаметр, мм
ТЕН пресований	2,0 - 3,2
Нітроглицерін (при t=20 °C)	2,5
Гексоген	2,5 - 4,4
Тетрил	5,0 - 7,0
Пікринова кислота	7,0 - 9,0
Тротил (в залежності від технології виготовлення)	6,0 - 60,0
Перхлорат амонію	25,0 - 30,0

Крім швидкості поширення ударної хвилі, тиску і температури вибуху, його характеристикою може служити енергія, що виділяється. Ця енергія вимірюється у МДж, або у тротиловому еквіваленті, тобто у масі тротилу, при вибуху якого виділиться така ж кількість енергії. Кількість виділеної енергії

залежить від маси вибухової речовини і від питомої енергії її вибуху, МДж/кг (табл. 1.11).

Таблиця 1.11 – Питома енергія вибуху деяких вибухових речовин

Речовина	Питома енергія, МДж/кг	Речовина	Питома енергія, МДж/кг
Димний порох	2,8	Тротил	4,1
Бездимний порох	3,1...4,6	Гексоген	5,4
Гримуча ртуть	1,7	Нітрогліцерин	6,2

Руйнівна дія вибуху залежить від маси заряду і відстані. Відстань, на якій дія вибуху здійснює певний руйнівний ефект, м:

$$r = k\sqrt[3]{m}, \quad (1.56)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від виду вибухової речовини, $\text{м}\cdot\text{кг}^{-1/3}$;
 m – маса заряду, кг.

Максимальний тиск вибуху для індивідуальних речовин, що містять С, Н, О, N, галогени, можна розрахувати за рівнянням, Па:

$$P_{max} = P_o \frac{T_T M}{T_o N}, \quad (1.57)$$

де P_o, T_o – початковий тиск, Па, і температура, К;
 T_T – теоретична (адіабатична) температура горіння, К;
 M – число молей продуктів реакції;
 N – число молей вихідної суміші.

Надлишковий тиск вибуху газу або парів у приміщенні з вільним об'ємом $V, (\text{м}^3)$, Па:

$$\Delta P = (P_{max} - P_o) \frac{33,3mz}{V\rho_o C_{ст}}, \quad (1.58)$$

де m – маса газу чи пари, кг;
 z – коефіцієнт участі, для газів $z = 0,5$, для парів $z = 0,3$;
 ρ_o – густина газу чи пари, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 $C_{ст}$ – стехіометричний коефіцієнт:

$$C_{ст} = \frac{100}{1 + 4,84\beta}, \quad (1.59)$$

$$\beta = C + \frac{H - G}{4} - \frac{O}{2}, \quad (1.60)$$

де C , H , G , O – кількість у молекулі атомів відповідно вуглецю, водню, галогенів, кисню.

Надлишковий тиск вибуху для інших індивідуальних речовин і сумішей розраховується за рівнянням, Па:

$$\Delta P = \frac{m Q_H^P P_o z}{3V \rho_n C_p T_o}, \quad (1.61)$$

де Q_H^P – нижча робоча теплота згорання речовини (суміші), кДж/кг;

ρ_n – густина повітря за робочих умов, кг/м³;

C_p – масова теплоємність повітря за постійним тиском, у розрахунках можна прийняти $C_p = 1,01$ кДж/кг К.

1.10 Ударна хвиля

Ударна хвиля (УХ) – тонка перехідна область, що розповсюджується із надзвуковою швидкістю, в якій відбувається різке зростання густини, тиску і швидкості речовини. УХ виникають при вибухах, детонації, при надзвуковому русі тіл, при потужних електричних розрядах. Наприклад, при вибуху ВР утворюються високо нагріті продукти вибуху, що мають велику густину і що знаходяться під високим тиском. У початковий момент вони оточені нерухомим повітрям при нормальній густині і атмосферному тиску. Продукти вибуху, що розширюються, стискають навколишнє повітря, причому в кожен момент часу стиснутим виявляється лише повітря, що знаходиться в певному обсязі; поза цього обсягу повітря залишається у первісному стані. З плином часу обсяг стисненого повітря зростає. Поверхня, яка відділяє стисле повітря від не стисненого і являє собою УХ (або, як кажуть, *фронт УХ*). У ряді випадків надзвукового руху тіл в газі (артилерійські снаряди, кулі, надзвукові літаки, космічні апарати) напрямок руху газу не збігається з нормаллю до поверхні фронту УХ, і тоді виникають косі УХ.

При проходженні газу через УХ його параметри міняються дуже різко і в дуже вузькій області. Товщина фронту УХ має порядок довжини вільного пробігу молекул, проте при багатьох теоретичних дослідженнях можна нехтувати такою малою товщиною і з великою точністю замінити фронт УХ поверхнею розриву, вважаючи, що при проходженні через неї параметри газу змінюються стрибком (звідси назва «стрибок ущільнення»). Із законів збереження маси, імпульсу і енергії можна отримати рівняння ударної адіабати (адіабати Гюгоніо):

$$u_2 - u_1 - \frac{(p_2 + p_1)}{2} (v_2 - v_1) = 0 \quad (1.62)$$

$$i_2 - i_1 - \frac{(p_2 - p_1)}{2} (v_2 + v_1) = 0 \quad (1.63)$$

де u – внутрішня енергія, Дж/кг; індексом 1 позначені параметри газу до УХ, 2 – після;

i – ентальпія, Дж/кг;

p – тиск газу, Па;

v – питомий об'єм, м³/кг;

Перехід газу через ударну хвилю є незворотнім процесом, тому на ударній хвилі питома ентропія збільшується (для слабких ударних хвиль в ідеальному газі зростання ентропії пропорційно кубу відносного зростання тиску $\frac{(p_2 - p_1)}{p_1}$).

Збільшення ентропії означає наявність дисипації (в середині ударної хвилі, що є вузькою перехідною зоною, істотні, зокрема, в'язкість і теплопровідність). Це, зокрема, призводить до того, що тіло, що рухається в ідеальній рідині з виникненням ударних хвиль, відчуває силу опору, тобто для такого руху парадокс Д'Аламбера не має місця.

Часто ударною адіабатою Гюгоніо називають криву (рис. 1.9) в площині (p , V) або (p , ρ), що визначає залежність p_2 від ρ_2 при заданих початкових значеннях p_1 і ρ_1 . При цих заданих значеннях ударна хвиля, перпендикулярна потоку, визначається всього одним параметром (похила ударна хвиля характеризується додатково значенням дотичній до її поверхні складової швидкості): наприклад, якщо задати p_2 , то по адіабаті Гюгоніо можна знайти ρ_2 , а звідси швидкість, температуру тощо.



Рисунок 1.9 - Ударна адіабата H и адіабата Пуассона P , що проходять через початкову точку A вихідного стану

Адіабату не слід плутати з адіабатою Пуассона, яка описує процес з постійною ентропією s . На відміну від адіабат Пуассона, для яких $s(p, \rho) = \text{const}$, рівняння ударної адіабати не можна написати в такому вигляді. Адіабати Гюгоніо для заданої речовини становлять двохпараметричне сімейство кривих (кожна крива визначається завданням як p_1 , так і ρ_1), тоді як адіабати Пуассона - однопараметричні.

Є рівняння, що зв'язує стиснення (збільшення густини газу ударною хвилею) і збільшення тиску:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\left(\frac{k+1}{k-1}\right) \frac{p_2}{p_1} + 1}{\frac{p_2}{p_1} + \frac{k+1}{k-1}}, \quad (1.64)$$

де k – показник адіабати.

Аналіз цієї формули показує, що граничне стиснення газу ударною хвилею (якщо $p_2 \rightarrow \infty$) дорівнює $\frac{k+1}{k-1}$ раз. Наприклад, для одноатомного газу $k = 5/3$ і граничне стиснення $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 4$, для двоатомного газу (у тому числі повітря) $k = 7/5$; $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 6$; для трьох- і багатоатомного газу $k = 4/3$, $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 7$.

1.11 Вибухові речовини

Вибухові речовини – сполуки або суміші, що здатні до швидкого хімічного перетворення, що самопоширюється (до вибуху) з утворенням газів і виділенням значної кількості тепла.

Таке перетворення, виникнув в якій-небудь точці під дією відповідного імпульсу, поширюється з великою швидкістю на всю масу вибухової речовини. Швидке утворення великих об'ємів газів і нагрівання їх до високої температури зумовлює раптове розвинення у місці вибуху значного тиску. Енергія стиснених газоподібних продуктів вибуху є джерелом механічної роботи вибуху.

Внаслідок великих швидкостей процесу вибух дозволяє отримати у невеликому об'ємі величезні потужності. Так, при спалюванні 1 кг вугілля виділяється близько 33 МДж тепла. Навіть якщо спалювання здійснюється у вигляді пилу і ця маса вугілля згорає за 1 с, потужність складе 33 МВт. При вибуху 1 кг гексогену виділяється тільки 5,7 МДж енергії, але так як час вибуху – соті частки секунди, то розвинута потужність складе 500 000 МВт.

Класифікація вибухових речовин. За агрегатним станом вибухові речовини діляться на тверді (тротил, динаміт, порох, амоніт тощо); рідкі (нітрогліцерин); газоподібні (суміш водню і кисню – гримуча суміш, зараз не

застосовується); суміші рідких і твердих речовин (оксиліквіти); зважені у повітрі тверді або рідкі частинки (пил вугілля, сірки – без практичного застосування).

За складом вибухові речовини розподіляють на сполуки і суміші. У першій групі можна виділити важливіші класи:

а) нітросполуки, що містять групу NO_2 – тротил $\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$, гексоген $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$;

б) ефіри азотної кислоти, що містять групу ONO_2 – нітрогліцерин $\text{O}_2\text{NOCH}_2\text{CH}(\text{ONO}_2)\text{CH}_2\text{ONO}_2$;

в) солі азотної кислоти – аміачна селітра NH_4NO_3 , нітрати органічних сполук;

г) гримуча кислота HCNO та її солі - фульminat ртуті $\text{Hg}(\text{CNO})_2$ (гримуча ртуть);

д) азотистоводнева кислота HN_3 та її солі – азид свинцю PbN_6 .

Суміші ділять на такі класи:

а) бездимний порох – піроксилін та нітрогліцеринові сполуки;

б) димний порох – селітра, сірка, вугілля;

в) динаміти – нітрогліцерин, нітрати та домішки;

г) амоніти – аміачна селітра і домішки;

д) хлоратні і перхлоратні суміші;

е) сплави нітросполук;

е) оксиліквіти – рідкий кисень і дисперсні горючі речовини: вугільний пил, тирса тощо;

ж) суміші горючих речовин з концентрованою азотною кислотою або тетроксидом азоту.

За характером дії та використанням вибухові речовини поділяють на три групи:

1. **Метальні**, що служать для виштовхування з ствола кулі або снаряду, для спорядження феєрверків, сигнальних ракет. Сюди відносяться порохи різних видів.

2. **Бризантні**, що служать для руйнування гірських порід, масивів металобрухту, будівель, що підлягають знесенню, для спорядження зарядів авіабомб, мін, снарядів. Сюди відносяться тротил, динаміти, амоніти та ін.

3. **Що ініціюють**. Застосовуються для ініціювання вибуху інших вибухових речовин у капсулях, детонаторах. Сюди відносяться матеріали на основі азиду свинцю, гримучої ртуті.

Серед бризантних речовин виділяють **запобіжні** вибухові речовини - спеціальні вибухові речовини, що володіють зниженою здатністю запалювати горючі гази (метан, сірководень та ін.) і пил (вугільний, сланцевий та ін.), що містяться в атмосфері підземних виробок. Запобіжні властивості вибухових речовин забезпечуються їх хімічним складом. Властивість вибухових речовин не запалювати копальні гази і пил при вибуху зветься **антігрізутністю**. Такі речовини мають низьку теплоту згорання і невелику швидкість детонації. Сюди відносяться амоніти, амонали.

Початковим імпульсом, що викликає вибух, можуть бути різні види впливу: нагрівання, полум'я, іскри, електричний розряд, удар, тертя, дія вибуху іншої речовини, хімічна дія, світло. Наприклад, суміш водню і хлору вибухає при освітленні.

Чутливість вибухової речовини характеризується мінімальною величиною початкового імпульсу. Практичне значення мають вибухові речовини, чутливість яких лежить у певних межах. Поводження з речовинами із занадто великою чутливістю може бути небезпечним. Якщо чутливість мала, виникають утруднення при здійсненні вибуху у момент застосування. Найбільшу чутливість мають речовини, що ініціюють.

Чутливість вибухової речовини до теплової дії характеризує температура, при якій виникає спалах (температура спалаху). Випробування проводять у стандартних умовах за визначеною методикою. Температура спалаху гримучої ртуті - 170°C, піроксиліну - 190°C, нітрогліцерину - 200°C, пороху – 180...310°C, амоніту - 320°C.

Чутливість до удару визначають мінімальною висотою падіння вантажу 2 кг на певну кількість вибухової речовини у стандартних умовах, що викликає вибух. Чутливість вибухових речовин до удару наведена у табл. 1.12.

Таблиця 1.12 – Чутливість вибухових речовин до удару

Речовина	Чутливість, см	Речовина	Чутливість, см
Азид свинцю	3	Нітрогліцерин	4
Гексоген	35	Порох	60...110
Гримуча ртуть	2	Тротил	80

Характер механічної дії вибуху на навколишнє середовище у значній мірі залежить від швидкості його поширення. При відносно малих швидкостях (вибухове горіння без детонації) вибухові речовини здійснюють металну дію, при великих швидкостях (детонація) – бризантну. Бризантна дія тим сильніша, чим більша швидкість детонації.

Детонація вибухової речовини може викликати вибух іншої речовини не тільки при контакті між ними, але і на деякій відстані.

Руйнівна дія вибухових речовин визначається також такими термінами як фугасність і бризантність.

Фугасність визначає здатність продуктів вибуху здійснювати роботу при розширенні. Фугасність дорівнює збільшенню об'єму стандартної свинцевої бомби (бомби Трауцля) після вибуху в неї 10 г вибухової речовини. Фугасність тротилу – 285...300 см³; динаміту – 340...410 см³; амоналу – 400 см³; гексогену – 490 см³; нітрогліцерину – 590 см³; нітрогліколю – 620...650 см³.

Бризантність – здатність вибухової речовини здійснювати дроблення твердого середовища.

Найбільш простим і поширеним способом визначення бризантності є проба Гесса. Цей спосіб використовується для промислових вибухових речовин

як стандартний. Випробування проводять шляхом підриву заряду масою 50 г, заряд розташовується зверху на тонкому сталевому диску, в свою чергу диск встановлений зверху на свинцевому циліндрі діаметром 40 мм і висотою 60 мм (рис. 1.10). Після підриву заряду вимірюється зменшення висоти свинцевого циліндра. Різниця між середніми висотами циліндра до і після вибуху є мірою визначення бризантності вибухової речовини. Традиційно вимірюється в міліметрах.

Бризантність тротилу – 13...16,5 мм; амоналу – 16 мм; динаміту – 15...18мм; гексогену – 24 мм.

Вимірювання бризантності вибухових речовин з високою швидкістю детонації і малим граничним діаметром детонації по обтисненню свинцевого циліндра є важкою через руйнування циліндра. Для таких речовин зазвичай застосовують метод вимірювання обтиску мідного циліндра (крешеру) в приладі-бризантометрі або за відхиленням балістичного маятника. Цей маятник являє собою підвішений на металевих тягах циліндричний вантаж, в який вкладається заряд вибухівки. При підриві фіксують величину відхилення маятника. Потім за спеціальними таблицями робиться перерахунок величини відхилення на бризантність, що відповідає методу Гесса.



Рисунок 1.10 – Проба Гесса для визначення бризантності

Бризантність інколи визначають також по виходу фракцій при дробленні породної (в деяких випадках металевою) оболонки навколо заряду. Бризантну дію оцінюють (методика Л. І. Барона, С. П. Левчика) за результатом вибуху заряду масою 20 г в базальтовому кубічному блоці з ребром довжиною 150 мм, вміщеному в сталеву посудину. Після вибуху визначають вихід роздробленої фракції (розмір частинок менше 7 мм).

Характеристики деяких вибухових речовин.

Димний порох (чорний порох) - історично перша і найпростіша за хімічним складом металеві вибухова речовина, що складається в основному з

трьох компонентів: селітри, деревного вугілля і сірки. Вважається встановленим, що порох був винайдений в Китаї, де у вигляді селітро-сіро-вугільної суміші був відомий вже близько X століття. У Європі, за легендою, винахідником пороху вважається німецький монах Бертольд Шварц (близько 1330 р.), але, очевидно, порох був відомий і до нього. На протязі близько 500 років, до середини XIX століття, порох був практично єдиною доступною людству вибуховою речовиною. До 1890-м років був майже повністю витіснений з військової сфери більш досконалішими вибуховими речовинами. Зокрема, як метална речовина поступився різним видам бездимного пороху. Проте димний порох продовжує застосовуватися і в даний час, хоча сфера його використання досить вузька. Насамперед він вживається в піротехніці, рідше - як металний заряд в деяких видах боєприпасів і іноді в дистанційних трубках. Він також нерідко використовується стрілками-любителями та мисливцями при ручному спорядженні патронів

До явних недоліків димного пороху при використанні у військовій справі відноситься його вельми мала потужність в порівнянні з бездимним порохом (не кажучи вже про бризантні ВР). Крім того, як випливає з назви, при згорянні він утворює щільну хмару диму, демаскує стрілка або позицію і заважає бачити мету. Перевагами чорного пороху є надзвичайно тривалий термін зберігання, меншою мірою - слабка чутливість до змін температури повітря, порівняльна безпека для зброї при стрільбі, простота і дешевизна виробництва.

Класичний димний порох з деякими відхиленнями має наступний склад (за вагою): 75% калієвої селітри KNO_3 , 15% вугілля, 10% сірки. Теплота згоряння - 2,9 МДж / кг, адіабатична температура горіння - 2200 К.

Бездимний порох або **нітропорох** - групова назва металних вибухових речовин, що використовуються у стрілецькій зброї і артилерії, в твердопаливних ракетних двигунах, які при згорянні не утворюють твердих частинок (диму), а тільки газоподібні продукти згоряння, на відміну від димного (чорного) пороху.

Типи бездимного пороху: корда, баліста, білий порох та ін.

Бездимний порох складається з нітроцелюлози (одноосновний), зазвичай з додаванням до п'ятдесяти відсотків нітрогліцерину (двухосновний), і іноді нітрогліцерину в поєднанні з нітрогуанідіном (трьохосновний). Кінцевий продукт гранулюється в сферичні частинки або пресується в циліндри або пластівці за допомогою розчинників типу ефіру. Також додатковою складовою бездимного пороху можуть бути стабілізатори та балістичні модифікатори. Двухосновні порохи зазвичай використовуються у виготовленні патронів для стрілецької і мисливської зброї, у той час як трьохосновні більш широко застосовуються в артилерії і двигунах ракет (ТПРД) невеликого калібру.

Причина бездимного цих порохів полягає в тому, що продукти окислення їх інгредієнтів в основному газоподібні, у порівнянні з чорним порохом, що виділяє при згорянні до 55% твердих речовин (карбонат калію, сульфат калію та ін.).

Бездимний порох горить тільки по поверхні гранул. Більші гранули згоряють повільніше і швидкість їх контролюється спеціальним покриттям, що заважає горінню, основна функція котрого - регулювати більш-менш постійний тиск на обертову кулю або снаряд, які ще не покинули ствол, що дозволяє їм досягати максимальної швидкості.

Гранули також покриваються графітом, з метою уникнути їх загорання від іскор статичної електрики.

Теплота згорання різних типів бездимного пороху - 2,18 – 4,88 МДж / кг, адіабатична температура горіння – 1430 – 3400 К.

Нітрогліцерин (1,2,3-трінітроксіпропан) - складний ефір гліцерину і азотної кислоти. Широко відомий завдяки своїм вибуховим і лікарським властивостям. Хімічна формула $O_2NOCH_2CH(ONO_2)CH_2ONO_2$. Вперше синтезований італійським хіміком Асканія Собреро в 1847 році. Прозора в'язка нелетка рідина. Дуже чутливий до удару, тертя, високих температур, різкого нагріву тощо. Чутливість до удару для вантажу 2 кг - 4 см. Вельми небезпечний у поводженні. При обережному підпалюванні в малих кількостях нестійко горить синім полум'ям. Температура спалаху близько 200 ° С. Теплота згорання 6,535 МДж / кг. Адіабатична температура горіння 4110 ° С. Швидкість детонації 8200 м / с. Застосовується як компонент деяких рідких ВР, динамітів і головним чином бездимного пороху. Крім того, в малих концентраціях застосовується в медицині.

Динаміт (від грец. Δύναμις - сила) - вибухова суміш, абсорбент, просочений нітрогліцерином. Також може містити й інші компоненти (селітра та ін). Щільна тверда глиноподібна речовина. Вся маса зазвичай спресовується в циліндричну форму і поміщається в паперову або пластикову упаковку. Підрив заряду здійснюється за допомогою капсули-детонатору.

Динаміт був запатентований Альфредом Нобелем 25 листопада 1867. Як абсорбент був обраний діатоміт. Як абсорбент у 19 столітті також використовувалися пісок, глина, туф.

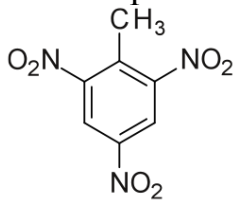
Основні сучасні різновиди динаміту мають такий склад:

- Стандартний 62%: Нітрогліцерин або його суміш з нітрогліколем - 62%, нітроцелюлоза - 3%, нітрат калію або натрію - 27%, деревне борошно - 8%. (Теплота згорання - 5,3 МДж / кг; температура спалаху 205°С; фугасність 380 см³; швидкість детонації 6000 м/с при густині 1,4 г/см³).
- Нітрогліцерин або його суміш з нітрогліколем - 15%, нітроцелюлоза - 1%, нітрат амонію - 73,5%, тротил - 9%, поліметилметакрилат - 0,5%, деревне борошно - 2%. Фугасність 340 см³. Швидкість детонації 5100 м / с при густині 1,32 г/см³.
- Нітрогліцерин або його суміш з нітрогліколем - 60%, нітроцелюлоза - 3%, нітрат амонію - 31%, деревне борошно - 6%. Фугасність 410 см³. Швидкість детонації 6400 м / с.
- Нітрогліцерин або його суміш з нітрогліколем - 60%, нітроцелюлоза - 4%, нітрат калію або натрію - 28%, деревне вугілля - 8%.

- Нітрогліцерин або його суміш з нітрогліколем - 10%, нітроцелюлоза - 1%, нітрат амонію - 58%, деревне вугілля - 8%, оксалат амонію - 5%, хлорид натрію - 18%.

Для спорядження снарядів динаміт виявився не цілком відповідним через те, що при низьких температурах його чутливість різко зростала. Це іноді призводило до розривів снарядів у стовбурі гармати, а при високих температурах при недостатній герметичності корпусів снарядів нітрогліцерин починав відділятися від глини і витікати назовні, що призводило до вибухів снарядів у місцях зберігання. Втім, таке частіше відбувалося через порушення технології виробництва динаміту на заводах. Тому все ж динаміт, хоч і в обмежених масштабах, застосовувався для спорядження снарядів у період до і під час Першої Світової війни. Більшою мірою динаміт застосовувався в підривної справі в період Першої Світової війни.

У ряді країн (США, Англія, Німеччина, Італія, Хорватія, Фінляндія) динаміт широко застосовувався і в період Другої Світової війни. У Червоній Армії динаміт не застосовувався. У післявоєнний період динаміт в СРСР застосовувався в народному господарстві в шахтах, кар'єрах, але в міру освоєння промисловістю більш безпечних ВВ до шістдесятих років його виробництво було припинено. В даний час, через небезпеку при поводженні і високої вартості виробництва, динаміти витіснені аміачноселітреними вибуховими речовинами.



- **Тринітротолуол** (тротил, тол, TNT, $C_7H_5N_3O_6$) - одне з найбільш поширених бризантних вибухових речовин. Являє собою жовтувату кристалічну речовину з температурою плавлення $80,85^{\circ}C$.

Тринітротолуол був отриманий в 1863 році німецьким хіміком Юліусом Вільбрандом. У 1891 р в Німеччині почалося промислове виробництво тротилу. З 1902 р. в німецькій і американській арміях почали використовувати боєприпаси, споряджені тротилом замість пікринової кислоти.

Тротил став основною вибуховою речовиною для спорядження боєприпасів завдяки вдалому поєднанню достатньої потужності з низькою чутливістю, можливістю переробки литтям.

Застосовується в промисловості і військовій справі як самостійно в гранульованому (гранулотол), пресованому або литому вигляді, так і в складі багатьох вибухових сумішей (алюмотол, амонал, амоніт та інші). У США тротил в промисловості і гірському ділі не застосовують з початку 1990-х років через токсичність продуктів вибуху.

Тротил менш чутливий до тертя і нагрівання, ніж багато інших вибухових речовин, наприклад, динаміт, і загоряється тільки при температурі $290^{\circ}C$, тому може бути відносно безпечно нагрітий до температури плавлення. Це дозволяє легко надати потрібну форму за допомогою лиття. Литий або

пресований тротил горить без вибуху жовтуватим полум'ям. Для вибуху зазвичай необхідне використання детонатора, проте порошкоподібний тротил з домішками може мати підвищену чутливість до зовнішніх впливів, в тому числі і до полум'я. Тротил не розчиняється водою, що не гігроскопічний, не змінює своїх вибухових властивостей при тривалому нагріванні, змочуванні водою. Тривале (60-70 років) перебування у воді або землі, не змінює вибухових властивостей.

Незважаючи на широку поширеність тринітротолуолу, в даний час його намагаються замінити на більш економічні і більш безпечні малочутливі вибухові речовини. Наприклад, Збройні сили США, починаючи з 2010 року, замінюють тротил в великокаліберних снарядах на ІМХ-101.

Швидкість детонації в залежності від густини – 6700...7000 м/с. Теплота згорання – 4,1...4,23 МДж/кг. Бризантність – 13...16,5 мм. Фугасність – 285...300 см³.

Амоніт - різновид промислових вибухових сумішей. Зазвичай являє собою порошкоподібну суміш аміачної селітри NH₄NO₃ з тринітротолуолом (рідше з гексогеном, дінітронафталіном) і невибуховими горючими компонентами (торф, деревне борошно, технічне масло тощо). Зміст тротилу може варіювати від 10% до 50% за масою.

Виготовляють амоніти змішуванням добре перемелених компонентів, сплавленням і грануляцією. Теплота згорання від 2,1 до 8,4 МДж / кг, швидкість детонації від 1,5 до 6 км / с. Амоніти застосовують при різних видах відкритих вибухових робіт, для спорядження різних типів боєприпасів (мін, бомб, снарядів), для підривних робіт. Амоніти певного складу застосовуються як запобіжні вибухові речовини.

Переваги амонітів в порівнянні з іншими вибуховими речовинами - мала чутливість до механічних впливів (удару, тертя), висока хімічна стійкість, відносна безпека у виробництві, зберіганні та поводженні; недоліки - гігроскопічність, низька водостійкість, здатність до злежування.

Найбільш поширена марка - «Амоніт № 6-ЖВ». Склад:

- водостійка аміачна селітра 79 ± 1,5%
- тротил (або гранулотол) 21 ± 1,5%.

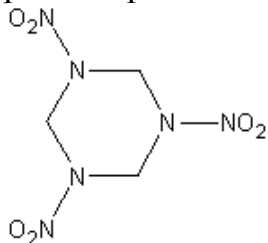
Амонал - являє собою амоніт з додаванням порошкоподібного алюмінію. Амонал не реагує на удар і підпалювання. Для того щоб викликати детонацію, необхідний детонатор.

Амонал за ГОСТ 21984 - однорідний порошок сіро-сталевого кольору. Малосипкий, водостійкий, стабільний при зберіганні. Склад: селітра аміачна - 80,5%, тротил- 15%, пудра алюмінієва - 4,5%. Випускався в патронах. Фугасність - не менше 400 см³, бризантність - 16 мм.

Амонал скельний № 3 - однорідний порошок сіро-сталевого кольору. Одна з найпотужніших промислових вибухових речовин. Має високу водостійкість і хорошу детонаційну здатність, не злежується при зберіганні. Через підвищену чутливість вимагає підвищеної обережності у поводженні. Склад: селітра

аміачна NH_4NO_3 - 72%, тротил - 16%, гексоген - 1,5%, пудра алюмінієва - 8%.
Фугасність - не менше 450 см^3 , бризантність - 18 мм.

Амонал призначений для вибухових робіт в рудниках і шахтах, безпечних по газу і пилу, і на відкритих розробках. Застосовується для підривання міцних і вельми міцних порід в сухих і обводнених умовах шпуровим методом. У роки другої світової війни при нестачі тротилу, амоналом споряджали міни і ручні гранати. Снаряди амоналом не споряджалися, так як ця речовина детонує при пострілі з гармати.

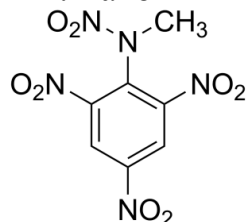


- **Гексоген** (ціклотриметилентринітрамін, RDX, T4) - $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, потужна бризантна вибухова речовина. Чутливість до удару 35 см; швидкість детонації - 8360 м / с , тиск у фронті ударної хвилі - 33,8 ГПа, фугасність - $470 \dots 490 \text{ см}^3$, бризантність - 24 мм. Температура спалаху - 230° C , температура плавлення $204,1^\circ \text{ C}$.

Гексоген - білий кристалічний порошок. Без запаху, смаку, сильна отрута. Густина - 1816 кг / м^3 . Розчиняється у воді, погано розчинний у спирті, ефірі, бензолі, толуолі, хлороформі, краще - в ацетоні, концентрованих азотній і оцтовій кислотах. Розкладається сірчаною кислотою, їдкими лугами, а також при нагріванні.

Гексоген (від грец. - той, що породжує шістку) отримав свою назву за зовнішнім виглядом його структурної хімічної формули. Вперше його синтезував в 1897 році німецький хімік і інженер Ленце. У 1920 році Герц показав, що гексоген є найсильнішою вибуховою речовиною, що далеко перевершує тротил. За швидкістю детонації він випереджав усі інші відомі тоді вибухівки, а визначення його бризантної здатності звичайним методом було неможливо, тому що гексоген розбивав стандартний свинцевий стовпчик.

Гексоген застосовують для виготовлення детонаторів, спорядження боєприпасів та для вибухових робіт в промисловості, як правило, в суміші з іншими речовинами (тротилом і т. п.) і з добавкою флегматизаторів (парафіну, воску, церезину), що зменшують небезпеку вибуху гексогену від випадкових причин. Також використовується як компонент ракетного палива.



- **Тетрил** (2,4,6-тринітро-N-метил-N-нітроанілін; метілпикрілнітрамін; нітрамін; тетраліт) - $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{N}(\text{CH}_3)\text{NO}_2$ - потужна вибухова бризантна речовина. Кристали білого кольору. Колір технічного продукту світло-жовтий, обумовлений домішками. Густина кристалів - 1730 кг / м^3

м³. Негігроскопічний, у воді практично не розчиняється, слабо розчинний у етанолі. Добре розчинний в ацетоні, діхлоретані, бензолі.

Швидкість детонації - 7500 м/с, бризантність за Гессом - 19 мм. Температура спалаху - 190 °С, температура плавлення - 129,5 °С (з розкладанням). Теплота вибуху - 4815 кДж / кг. Чутливість до удару 40 см.

Отруйний, вимагає прийняття спеціальних заходів захисту при поводженні. Хімічна стійкість нижче, ніж у тротилу та інших нітросполук, але достатня для тривалого зберігання при нормальних умовах.

Застосовують для виготовлення детонаторів і детонуючих шнурів. Обмежено застосовують в розривних боєприпасах малого калібру. Застосовувався в 1-й і 2-й Світових війнах, у 2-й половині ХХ століття застосування значно скоротилося. У США виробництво припинено. В даний момент є боєприпаси, в яких тетрил використовується у вигляді сплавів з тротилом і тротилом з гексогеном для збільшення швидкості детонації загальної маси вибухової речовини.

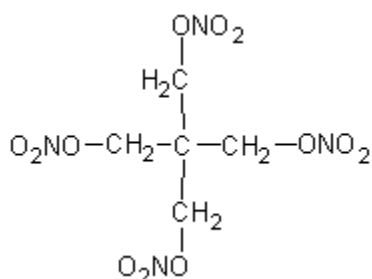
Піроксилін (грец. πῦρ «вогонь» і ξύλον «деревина»; тринітроцелюлоза, тринітрат целюлози) - $[C_6H_7O_2(ONO_2)_3]_n$, продукт повної етерифікації целюлози азотною кислотою. Має вигляд пресованої паперової волокнистої маси біло-сірого кольору. Піроксилін був отриманий А. Браконно в 1832 році, проте вивченням властивостей його тоді не займалися. Офіційно про цю речовину повідомив німецький хімік Крістіан Фрідріх Шенбейн в березні 1846 на засіданні Базельського суспільства; отриманий варіант нітроклітковини він назвав піроксиліном. У 1846-1848 роках Г. І. Гесс і А. А. Фадеев досліджували властивості піроксиліну і показали, що по потужності піроксилін в кілька разів перевершує димний порох.

Дослідженнями піроксиліну з 1862 року займався англійський хімік Фредерік Август Абель, якому в 1868 році вдалося отримати пресований піроксилін.

Ще наприкінці п'ятдесятих і початку шістдесятих років 19 століття в Австрії було запропоновано застосувати піроксилін як металну речовину, Але несподіваний вибух магазину з 2000 пудами (32000 кг) піроксиліну привів до висновку про ненадійність піроксилінових зарядів і «піроксилінової» артилерії, що змусило від введення цієї артилерії відмовитися.

У вісімдесятих роках 19 століття почали застосовувати піроксилін для підривних робіт і, нарешті, для спорядження снарядів. Застосування піроксиліну для спорядження снарядів представляло великі вигоди порівняно з селітри-сіро-вугільним порохом. Піроксилін мав більшу густину і фугасну дію (рази в три більш). Таким чином, можна було очікувати, що снаряди, споряджені піроксиліном, за інших рівних умов, будуть діяти в 3 - 3,5 рази сильніше снарядів, споряджених порохом.

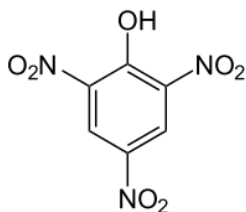
Піроксилін вимагає умов для збереження їм певної вологості і певних якостей, що виключають можливості розкладання. Піроксилін уражається цвіллю і псується гризунами. Зараз піроксилін застосовується для виробництва бездимного пороху.



- **Пентрит** (пентаерітрітетранітрат,

тетранітропентаерітрит, ТЕН, ніперит) - хімічна сполука $(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4\text{C}$. Одна з найпотужніших бризантних вибухових речовин. У чистому вигляді використовується для спорядження капсулів-детонаторів, а у флегматизованому - для спорядження кумулятивних припасів, детонуючого шнура. Хімічно стійкий. Являє собою білий кристалічний порошок.

Детонує при ударі, горіння нещільних зарядів нестійке і може переходити у детонацію. Швидкість детонації 8350 м/с. Теплота розкладання 5756 кДж/кг. Бризантність за Гессом 24 мм. Фугасність 500 см³. Чутливість до удару 17



см. - **Тринітрофенол** (пікринова кислота, мелініт, шімоза) - $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{OH}$, нітропохідна фенолу. За нормальних умов - жовта кристалічна речовина.

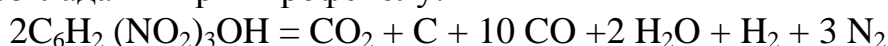
Пікринову кислоту і її солі, пікрати, використовують як вибухові речовини, а також в аналітичній хімії для визначення калію, натрію.

У другій половині XIX століття пікрати (в основному калію і амонію) почали широко використовуватися у військовій справі. Тривалий час сам тринітрофенол використовувався як жовтий барвник для вовни та шовку і не вважався вибухонебезпечною речовиною. У 1873 Шпренгель показав здатність тринітрофенолу до детонації, а в 1886 французький інженер Тюрпен виявив, що у сплавленому або сильно спресованому стані тринітрофенол детонує і запропонував його для спорядження боєприпасів. Це дало початок широкому застосуванню тринітрофенолу в якості потужної бризантної вибухової речовини.

Під час російсько-японської війни 1904-1905 японська армія застосовувала в широких масштабах снаряди з «шімозою» до польових і гірських гармат і в корабельної артилерії. Останні з масою заряду тринітрофенолу до 41 кг не могли пробити броньовий захист, але наносили значні руйнування на палубах і показали хорошу ефективність. Російсько-японська війна стала апофеозом застосування тринітрофенолу.

Висока активність речовини, велика кількість нещасних випадків, змусили хіміків багатьох країн шукати альтернативу. Таким став тринітротолуол.

Реакція розкладання тринітрофенолу:



Швидкість детонації при густині речовини 1760 кг / м^3 - 7680 м / с . Фугасність - 310 см^3 . Бризантність за Гессом - 17 мм.

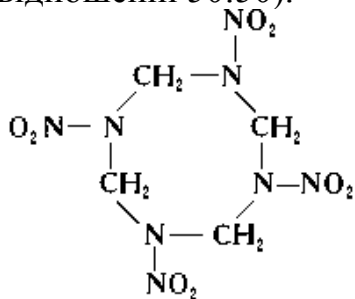
При терті між чорними металами (сталь, чавун) порошок детонує, між кольоровими металами детонація не виникає. Горить спокійно, з плавленням, полум'я сильно коптить. Навіть великі маси (близько 100 кг) можуть спокійно горіти, якщо при цьому розплав вільно розтікається.

При швидкому нагріванні в замкнутій оболонці до 300°C тринітрофенол вибухає.

Етиленглікольдінітрат (нітрогліколь, ЕГДН) - $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_6\text{N}_2$, бризантна вибухова речовина. Пари вельми токсичні при вдиханні. При попаданні в організм викликає отруєння навіть до летального результату.

Прозора рухома рідина. Густина при 20°C 1489 кг/м^3 , температура затвердіння $-21,7^\circ \text{C}$. Мало гігроскопічний, розчинний в етанолі, метанолі, діетиловому ефірі, нітробензолі, ацетоні. Розчинність у воді 0,5% при 25°C . Летючість значно вище, ніж у нітрогліцерину. Хімічні властивості близькі до нітрогліцерину. Термічна стійкість дещо вища. Чутливість до удару нижче, ніж у нітрогліцерину (20 ... 25 см), а чутливість до передачі детонації вище. Від полум'я спалахує, горить з шипінням, при перегріванні можливий вибух. Швидкість детонації в сталевій трубі діаметром 35 мм - 8300 м/с . Фугасність - 650 см^3 .

Застосовується в сумішах з нітрогліцерином у виробництві незамерзаючих динамітів для застосування при низьких температурах (зазвичай у співвідношенні 50:50).



- **Октоген** (1,3,5,7-тетранітро-1,3,5,7-тетраазабіклооктан, циклотетраметилентетранітрамін, НМХ) — $(\text{CH}_2)_4\text{N}_4(\text{NO}_2)_4$, термостійка бризантна вибухова речовина. Являє собою білий порошок кристалічного характеру. Отруйний.

Володіє високою чутливістю до удару. Швидкість детонації 9100 м/с при густині 1840 кг/м^3 . Теплота вибуху $5,7 \text{ МДж/кг}$. Фугасність 480 см^3 .

Застосовується при виробництві пластичних вибухових речовин, вибухових роботах у високотемпературному середовищі. У складі сумішевих ВР (найчастіше сплав октогена і тринітротолуолу - октил) використовується для військових цілей, як правило, для спорядження кумулятивних зарядів. В силу дорожнечі найчастіше застосовується лише в якості останнього шару на більш дешевих ВР. Компонент твердих ракетних палив. Представляє інтерес як термостійка вибухова речовина (застосовують при температурах до 210°C) для перфорації високотемпературних нафтових і газових свердловин.

Фульмінат ртуті (гримуча ртуть) - $\text{Hg}(\text{CNO})_2$, ртутна сіль фульмінової (гримучої) кислоти, вибухова речовина, що ініціює.

Білий або сірий кристалічний порошок, не розчиняється у воді. Має солодкий металевий смак, отруйна. Теплота розкладання 1,8 МДж/кг. Температура спалаху - 180 °С. Чутливість до удару - 2 см. Легко вибухає при ударі, дії полум'я, розпеченого тіла і т. п. При обережному нагріванні гримуча ртуть повільно розкладається. При 130-150 °С самозаймається з вибухом. Волога гримуча ртуть набагато менш вибухонебезпечна. Вологість гримучої ртуті, запресованої в капсуль-детонатор, повинна бути не більше 0,03%. Гримуча ртуть добре розчинна у водних розчинах аміаку або ціаністого калію. Концентрована сірчана кислота викликає вибух однією краплею. Температура вибуху гримучої ртуті дорівнює 4810 °С, швидкість детонації 4500 ... 5400 м/с в залежності від густини. Гримуча ртуть у присутності вологи енергійно взаємодіє з алюмінієм. Тому алюмінієва оболонка руйнується, а за рахунок теплоти реакції може виникнути вибух. Суміші, що містять гримучу ртуть, не повинні стикатися з алюмінієвою оболонкою.

Розкладання гримучої ртуті відбувається за рівнянням:



Гримучу ртуть застосовують в капсулях-детонаторах і капсулях-запальниках. Останнім часом гримуча ртуть витісняється більш ефективними вибуховими речовинами, що ініціюють - азидом свинцю та ін.

Відкрита гримуча ртуть в 1799 році англійським хіміком Е. Хоуардом.

Астроліт — різновид рідких сумішевих вибухових речовин на основі гідразину $\text{H}_2\text{N}-\text{NH}_2$ та аміачної селітри NH_4NO_3 , запропонований в 1960-х Геральдом Хьорстом, хіміком компанії «Атлас Паудер». Використовувалися в промисловості та будівництві, проте були витіснені більш дешевими і безпечними вибуховими складами.

Найбільш відомі марки:

- «Астроліт G» - найбільш поширена марка, складається з нітрату амонію як окиснювача і гідразину в якості пального у співвідношенні 2: 1 за масою. Швидкість детонації 8600 м / с.

- «Астроліт А» - суміш «Астроліта G» з високодисперсним порошком алюмінію. Має швидкість детонації нижче (приблизно 7600 м/с), однак за рахунок більшої густини і бризантності більш ефективний при застосуванні.

- Астроліт А-1-5 - безбарвна рідина з характерним запахом на основі перхлорату гідразина. Швидкість детонації - 9500 м/с.

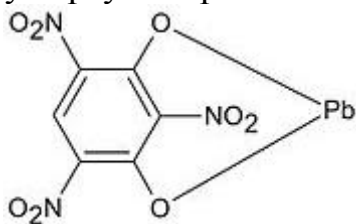
Висока по відношенню до нітрогліцерину і тротилу, швидкість детонації астроліта лише ненабагато перевершує швидкість детонації пентриту або гексогену. При цьому енергетичні характеристики астроліта значно нижче.

Примітною особливістю астролітів є висока для рідкого стану стабільність і низька летючість. Астроліт може вбиратися в ґрунт і зберігати вибухові властивості протягом декількох днів. Основна область застосування астролітів - підводні вибухи.

Азид свинцю - хімічна сполука свинцю $Pb(N_3)_2$, сіль азотистоводневої кислоти. Кристалічна речовина. У воді погано розчинний, розчинний у моноетаноламіні.

Застосовується як вибухова речовина, що ініціює, має високу чутливість і дуже малий критичний діаметр. Найбільш часто застосовується в капсулях-детонаторах, зазвичай в сумішах з ТНРС. Поводження вимагає особливої обережності і спеціальних технічних прийомів. Теплота вибуху азиду свинцю близько 1,536 МДж/кг, швидкість детонації близько 4800 м/с. Фугасність 110см^3 .

Азид свинцю менш чутливий до механічних впливів і нагріванню, ніж гримуча ртуть. При зволоженні не втрачає чутливості до механічних впливів.



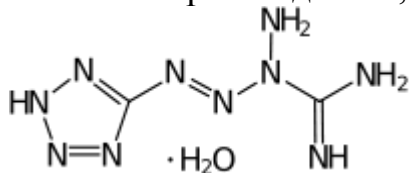
- **Тринітрорезорцинат свинцю** (ТНРС; стифнат свинцю) - $C_6H(NO_2)_3O_2Pb$.

Кристалічна речовина від оранжевого до коричневого кольору, володіє сильними токсичними і вибуховими властивостями. Моногідрат ТНРС володіє хорошою чутливістю до іскри і полум'я, тому використовується в якості ініціюючої вибухової речовини в капсулях-детонаторах і запальниках. Не взаємодіє з металами (мідь, алюміній), чим вигідно відрізняється від азиду свинцю. Погано розчинний у воді і органічних розчинниках. Чутливість до удару нижче, ніж у азиду свинцю, а до тертя - така ж. Ініціююча здатність нижче, ніж у інших ініціюючих ВР.

Застосовується як добавка до азиду свинцю і тетразену для поліпшення їх запальних якостей.

Швидкість детонації 5200 м/с. Теплота вибуху 1554 кДж/кг. Фугасність 130см^3 .

Безводний ТНРС вкрай чутливий до іскор, тому практично не застосовується. При нагріванні до $100\text{ }^\circ\text{C}$ втрачає кристалізаційну воду, при $200\text{ }^\circ\text{C}$ починає розкладатися, при $240\text{ }^\circ\text{C}$ вибухає.



- **Тетразен** - $C_2H_6N_{10}\cdot H_2O$, Моногідрат 5-(4-амідино-1-тетразено) тетразола.

Жовтуваті клиновидні кристали. У насипному вигляді являє собою пухку кристалічну масу з насипною густиною 450 кг / м^3 . Густина кристалів 1685 кг/м^3 . Майже не розчинний у воді ($0,02\text{ г}$ на 100 г води при $22\text{ }^\circ\text{C}$) і в органічних розчинниках.

Вибухова речовина, що ініціює, використовується в капсулях наколювальної дії як сенсibilізатор (збільшувач чутливості) до азиду свинцю

або тринітрорезорцинату свинцю. Чутливий до удару (чутливість вище, ніж у гримучої ртуті), менше до тертя.

Теплота вибуху 2305 кДж / кг. Температура спалаху 140 ° С.

IMX-101 (від англ. Insensitive Munitions Explosive 101, вибухова суміш зниженої чутливості для боєприпасів, модифікація 101) - вибуховий склад, відібраний для заміни тринітротолуолу в артилерійських снарядах армії США.

Основні компоненти складу - 2,4-дінітроанізол (англ. аббревіатура DNAN), нітротриазолон (NTO), нітрогуанідін (NQ). Енергетичні характеристики IMX-101 і тротилу ідентичні.

Знижена вибухонебезпечність полягає у відсутності детонації: при падіннях, при стрільбі по цієї вибухівці, при попаданні шрапнелі, у вогні, а також при підриві поблизу вибухового пристрою. Перехід на IMX-101 підвищує живучість складів та військової техніки, що транспортує і використовує снаряди з IMX-101. Використання нової вибухівки дозволяє знизити клас небезпеки при транспортуванні.

Пластичні вибухові речовини - вибухові речовини і суміші, що мають пластичні властивості.

Пластична вибухівка зазвичай дорожче традиційної. Тому такі речовини не застосовують для виробництва снарядів, а використовують у військовій і інженерній справі для підриву конструкцій: щоб надійно зруйнувати, наприклад, рейку, достатньо обліпити її вибухівкою і вставити детонатор.

За хімічним складом пластичні ВР зазвичай поділяють на:

- вибухові речовини з полімерним (пластичним або еластичним) сполучним;
- пластичні вибухові речовини з низькомолекулярним сполучним;
- водонаповненні пластичні вибухові речовини - в яких вміст води набагато перевищує рівноважну вологість.

Наприклад, одна з найпоширених за кордоном вибухівок - **С-4** (Composition C-4) - застосовуваний в США різновид пластичних вибухових речовин військового призначення.

Цей склад був розроблений в 1960-х для поліпшення вибухівки, яку застосовували у 2-й світовій війні, що складалася з гексогену, мінерального масла і лецитину. С-4 входить до групи з позначенням С, до якої також входять склади С-2 і С-3, що містять різні кількості гексогену.

До складу С-4 входять: гексоген (91%); полімерне сполучне - поліізобутилен (2,1%); пластифікатор - ди-(2-етилгексил)-себацінат або диоктилсебацінат (5,3%); моторне мастило. Чутливість до удару - 48 см.

Склад деяких пластичних вибухівок наведений у табл. 1.13.

Таблиця 1.13 – Деякі пластичні вибухові речовини

Назва	Вибуховий компонент, %	Сполучне, %	Країна - розробник
ПВВ-5А	Гексоген, 85%	Поліізобутилен, 5%; мінеральне мастило	СРСР
Гексопласт ГП-87К	Гексоген, 82,5%	Бутилкаучук, 5%	СРСР
EDC-37	Октоген + нітроцелюлоза, 91%	Поліуретан, 9%	США
PBXN-5	Октоген, 95%	Фтореластомер, 5%	США
PBX-9205	Гексоген, 92 %	Полістирол, 6%; Диоктилфталат, 2%	США
LX-15	Гексанітростильбен, 95 %	«Kel-F» 800, 5%	США

Оксиліквіт - бризантна вибухова речовина, що виготовляється просоченням рідким киснем горючих пористих матеріалів (вугілля, торф, мох, солома, деревина). Оксиліквіт відносять до вибухових речовин Шпренгеля, тобто до сумішей із значним вмістом рідких компонентів, що виготовляються безпосередньо на місці застосування. Вибухові властивості оксиліквітів були відкриті в Німеччині в 1897 році професором Карлом фон Лінде, творцем установки зі зрідження газів.

До оксиліквітів можуть бути віднесені і вибухові речовини на основі рідкого озону або його суміші з рідким киснем, хоча практичного застосування такі суміші не мають у зв'язку з високою вартістю і нестійкістю озону, однак, при необхідності створення надпотужних ВР, існує можливість застосування такого варіанту.

Відразу після просочення оксиліквіт є вибуховою речовиною підвищеної потужності, проте випаровування рідкого кисню призводить до постійного зниження його вибухових властивостей аж до повного їх зникнення. Ця властивість оксиліквітів може вважатися їх недоліком - оксиліквіт необхідно готувати безпосередньо на місці вибухових робіт, а після приготування вибух повинен бути проведений в найкоротший термін. Однак у той же час це може бути і перевагою: оскільки наповнювач сам по собі є інертним, відпадає необхідність у вилученні оксиліквітів, що не вибухнули, з свердловин і камер, а його перевезення не пов'язане з небезпекою вибуху.

Життєздатністю оксиліквіту називають час, протягом якого зберігаються його розрахункові вибухові характеристики; він залежить від виду та розміру використовуюваного наповнювача, його теплоємності та здібності поглинати кисень, густини, вологості та вмісту кисню і може становити від декількох хвилин до декількох годин. Протягом цього часу оксиліквіти небезпечні у поводженні, високочутливі до теплового випромінювання, чутливі до тертя; в напівзамкнутому об'ємі їх горіння може переходити у вибух - мали місце випадки самозаймання та вибуху набоїв оксиліквітів при їх проштовхуванні в

свердловини. В метою зниження горючості до складу оксиліквітів можуть вводитися антипірени.

Оксиліквіти використовувалися при вибухових роботах, головним чином у гірничій справі. Вперше вони були застосовані при проходці Симплонського тунелю в Швейцарії в 1899 році; в СРСР широко використовувалися, зокрема, в 1927-1932 роках на будівництві Дніпрогесу. З широкого вживання вони вийшли на початку 1960-х років.

У другу світову війну оксиліквітами іноді заповнювалися авіабомби - суміш сфагнуму і деревного вугілля, набита в залізобетонний корпус бомби, безпосередньо перед вильотом заливалася рідким киснем і зберігала вибухові властивості протягом 3-4 годин.

1.12 Умови, необхідні для припинення горіння

Для припинення горіння необхідно виконання хоча б однієї із наступних умов:

- ізолювання осередку горіння від повітря або зниження концентрації кисню розбавленням негорючими газами (парами) до значення, при якому горіння не може здійснюватись;

- охолодження осередку горіння до температури нижче відповідної межі;

- інтенсивне гальмування (інгібування) швидкості хімічних реакцій у полум'ї;

- механічний зрив полум'я сильним струменем газу або рідини;

- здійснення умов вогнеперешкодження, тобто таких умов, за якими полум'я не розповсюджується крізь вузькі канали.

Всі існуючі вогнегасні засоби здійснюють, як правило, комбінований вплив на процес горіння речовин. Наприклад, вода може охолоджувати, ізолювати або розбавляти джерело горіння; піна діє ізолююче і охолоджуюче; найбільш ефективні газові засоби впливають на процес горіння одночасно як інгібітори і розріджувачі; порошки можуть інгібувати горіння і створювати умови вогнеперешкодження при утворенні стійкої порошкової хмари. Проте для будь-якого вогнегасного засобу характерно якась одна домінуюча властивість. Наприклад, вода справляє переважно охолоджуючу дію, піни – ізолюючу, засоби на основі галогеновуглеводнів і порошкові суміші – специфічну інгібуючу дію. Крім того, в залежності від умов застосування виявляється та чи інша властивість вогнегасної речовини. Деякі порошкові суміші при гасінні металів виявляють в основному ізолюючі властивості, а при гасінні вуглеводнів – інгібуючі.

Фізико-хімічні властивості горючого матеріалу визначають вибір засобу гасіння. Для гасіння пожежі неможна застосовувати речовини, що реагують з горючим чи окиснювачем. Наприклад, неможна застосовувати воду для гасіння матеріалів, що взаємодіють з нею з утворенням горючих газів або з виділенням тепла (лужні метали, карбід кальцію, негашене вапно).

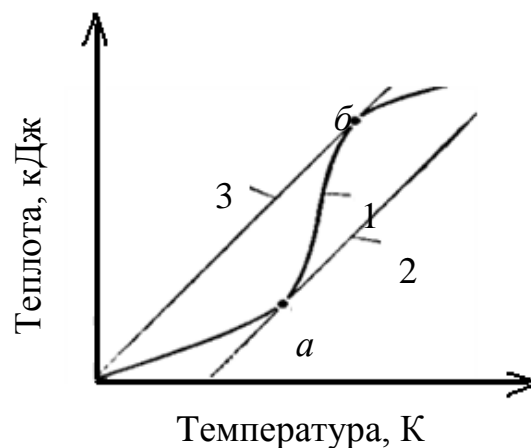
Особливості теплового режиму процесу пожежогасіння. Згідно з існуючими уявленнями про граничні умови горіння нижня температурна межа, до якої може поширюватися полум'я, що саме підтримується, звичайних вуглеводних горючих матеріалів, становить близько 1000 °С. При зниженні температури горіння нижче цієї межі відбувається загасання полум'я.

Тим часом для початку горіння досить нагріти горючу середу до температури її самозаймання. Іноді вважають, що гасіння полум'я може досягатися лише при зниженні температури в зоні реакції нижче температури самозаймання.

На рис. 1.11 схематично показаний характер зміни температури при виникненні і придушенні горіння, який ілюструє різні температурні межі цих процесів.

Різниця між температурами самозаймання і погасання пояснюється теорією теплового вибуху, згідно якої критичний режим досягається при рівності швидкостей виділення і відводу тепла в одиниці об'єму реагуючого середовища. Оскільки швидкість тепловідведення пропорційна градієнту температур, при зниженні температури вдовж кривої 1 рівність швидкостей тепловідводу і тепловиділення досягається при більш високому значенні Q , і, отже, при більш високій температурі, ніж при загоранні.

З викладених відомостей про горіння випливає, що гасіння пожежі може бути забезпечене або охолодженням зони реакції, або палаючого матеріалу. В останньому випадку придушення горіння досягається тоді, коли відвід тепла від палаючої речовини відбувається з більшою швидкістю, ніж поглинання нею тепла, переданого від полум'я.



a – точка самозаймання; *б* – точка погасання

Рисунок 1.11 – Співвідношення між тепловиділенням (1) і тепловідводом при загоранні (2) і гасінні (3)

Було встановлено, що горіння припиняється при зниженні кількості тепла, переданого від полум'я поверхні горючого матеріалу, до 10 кДж/см²

(наприклад, у випадку гасу таке зменшення передачі тепла поверхні дзеркала горіння відповідає 23% всієї теплоти згорання, тобто для припинення горіння достатньо зменшити потік від полум'я до поверхні в розмірі, що відповідає зниженню теплоти згорання гасу на 23%).

У той же час розрахунки показують, що припинення горіння охолодженням зони реакції до граничного значення (близько 1000 °С) вимагає відібрання такої кількості тепла із зони горіння, яке відповідає 45% теплоти згорання горючої суміші стехіометричного складу.

Таким чином, для припинення горіння охолодженням зони реакції потрібно відвести в два рази більше тепла, ніж при охолодженні поверхні палаючої речовини. Ці результати були отримані в дослідях з гасом. Мабуть, із збільшенням пружності пари горючої рідини, і зокрема в разі ЛЗР, відмінності в умовах гасіння охолодженням поверхні і зони власне горіння будуть зменшуватися, а в разі твердих матеріалів - зростати.

Деякі закономірності інгібування горіння. Насамперед необхідно зазначити, що інгібувати можна тільки ті процеси горіння, які пов'язані з ланцюговим розгалуженим характером окислення. Такими властивостями володіють горючі системи, в яких як окиснювач бере участь кисень (повітря).

У той же час процеси горіння органічних матеріалів в інших окиснювачах (в галогені, оксидах азоту), що протікають переважно за механізмом прямих ланцюгів (тобто за тепловим механізмом), як відомо, не інгібуються (наприклад, порох).

Безуспішними до цього часу залишаються також спроби знайти інгібітори для придушення горіння у повітрі металів і ряду металовмісних речовин (гідридів легких металів, деяких елементоорганічних сполук).

Горіння органічних матеріалів протікає через стадію окислення водню. Горіння водню при атмосферному тиску в початковій стадії протікає ізотермічно. Це вказує на суто ланцюговий характер початку горіння і, отже, на принципову можливість інгібування горіння водню в цих умовах.

Гальмуюча дія інгібіторів горіння пов'язана із загибеллю тій частині активних центрів, яка відповідає термодинамічно надрівноважному їх змісту. При зниженні концентрації активних центрів до рівноважної загибель їх в реакції з інгібітором стає утрудненою, оскільки зменшення активних центрів компенсується надходженням нових внаслідок термічної дисоціації. Тому остаточне припинення горіння, як правило, досягається при одночасному гальмуванні реакції і охолодженні (наприклад, при розведенні зони реакції надлишком летючого інгібітору) реагуючій горючій суміші.

Оцінка ефективності вогнегасних сумішей пов'язана з необхідністю моделювання процесів гасіння. Хоча досить точно моделювання цих процесів досить проблематично, цілком очевидно, що не можна орієнтуватися тільки на натурні випробування.

Для практичного вирішення проблеми можна скористатися двома шляхами - приблизними моделюванням, заснованим на виключенні другорядних

факторів і відповідних критеріїв подібності, і диференціацією способів гасіння на поверхневі та об'ємні.

1.12.1 Гасіння водою

Вода є найширше застосованим засобом гасіння пожеж у різних агрегатних станах. Фактори, що це обумовлюють: доступність, низка вартість, значна теплоємність, висока теплота пароутворення, низька в'язкість, відсутність токсичності.

Вогнегасна здібність води обумовлена охолоджуючою дією, розбавленням горючого середовища парами, механічною дією (зривом полум'я). Добра розбавляюча дія, що призводить до зниження концентрації кисню в повітрі, пояснюється тим, що об'єм пари у 1700 разів перевищує об'єм випарованої води. Проте обсяг водяної пари, що утворюється при полум'яному горінні, невеликий, оскільки вода контактує з палаючим матеріалом нетривалий час і роль пари в припиненні горіння незначна. При горінні твердих матеріалів основну роль в пожежогасінні грає охолодження поверхні.

Відомі такі способи подачі води в осередок горіння: у вигляді суцільних і розпорошених струменів. Суцільні струмені являють собою нерозривний потік води, що має велику швидкість і порівняно невеликий перетин. Ці струмені характеризуються певною ударною силою і великою дальністю польоту; при цьому значні обсяги води впливають на малу площу.

Суцільними струменями гасять пожежі в тих випадках, коли потрібно подати воду на велику відстань або надати їй значну ударну силу (наприклад, при гасінні пожеж газових фонтанів, при великому вогнищі пожежі, коли неможливо доставити близько до вогнища горіння ствол для подачі води, при необхідності з великої відстані охолоджувати сусідні з палаючим об'єктом металокопункції, резервуари тощо). Цей спосіб гасіння є найбільш простим і поширеним.

Розпорошені струмені - це потік води, що складається з дрібних крапель. Ці струмені характеризуються незначною ударною силою і дальністю дії, але зрошують більшу поверхню. При подачі води розпорошеними струменями створюються найбільш сприятливі умови для її випаровування і тим самим підвищення охолоджуючого ефекту і розбавлення горючого середовища.

Гасіння розпорошеними струменями має ряд переваг (в першу чергу скорочується витрата води) і тому в останні роки знаходить все більше застосування.

Встановлено, що оптимальний діаметр крапель для гасіння бензину становить 0,1 мм, для гасу і спирту - 0,3 мм, для трансформаторного масла і нафтопродуктів з високою температурою спалаху - 0,5 мм. Відношення часу випаровування краплі води до часу її нагрівання не залежить від розміру краплі і становить близько 13,5. Встановлено також, що час випаровування краплі діаметром 0,1 мм не перевищує 0,04 с. За цей час краплі з вказаним ступенем дисперсності встигають повністю випаруватися в полум'я і забезпечити

високий коефіцієнт використання і відповідний ефект гасіння. Більш великі краплі випаровуються не повністю і не дають подібного ефекту.

У разі гасіння горючих рідин, що мають високу температуру спалаху, вирішальне значення має охолодження горючої речовини до температури, меншої температури спалаху. У цьому випадку ефект досягається і при діаметрі краплі більше 0,1 мм.

Основні вимоги для гасіння пожеж рідин розпорошеною водою:

- забезпечення дисперсності до 0,1 мм для гасіння легкозаймистих рідин і до 0,5 мм для гасіння рідин з температурою спалаху вище 60 ° С;
- розпорошена вода повинна покривати всю поверхню, що горить і зрошувати навколишні тверді поверхні;
- інтенсивність подачі води повинна бути не менше 0,2 л·см²·с⁻¹.

Проникаюча здатність розпорошених струменів визначається їх тиском, опором полум'я і гарячих газів, розміром і швидкістю руху крапель. Опір полум'я і гарячих газів (напір полум'я) характеризується підйомною силою повітря і газоподібних продуктів згоряння, яка пропорційна висоті полум'я і обумовлюється теплової конвекцією. Досліди показали, що напір полум'я не залежить від природи горючої речовини. Напір струменя визначається швидкістю руху крапель і захопленого ними потоку повітря; він оцінюється експериментально по реакції насадка, з якого викидається струмінь. Проникаюча здатність струменя убуває із зменшенням напору струменя і розміру крапель. При діаметрі крапель вище 0,8 мм проникаюча здатність струменя не залежить від її напору. У той же час у міру зменшення розміру крапель коефіцієнт корисного використання води підвищується. Оптимальний розмір крапель залежить від напору струменя і становить 0,8-0,33 мм при напорі 0,6-2,6 кПа.

Найбільш істотним недоліком води, що обмежує область і умови її застосування в якості вогнегасного засобу, є порівняно висока температура замерзання. Для зниження температури замерзання застосовують спеціальні добавки та антифризи: мінеральні солі (K₂CO₃, MgCl₂, CaCl₂), деякі спирти (гліколі).

Залежно від джерела вода містить різні природні солі, що зумовлюють підвищення її корозійної здібності і електропровідності. Піноутворювачі, солі, використовувані проти замерзання, та інші добавки також посилюють ці властивості. Запобігти корозії контактуючих з водою металевих виробів (корпусів вогнегасників, трубопроводів та ін.) можна або нанесенням на них спеціальних покриттів, або додаванням до води інгібіторів корозії. В якості останніх застосовують неорганічні сполуки (кислі фосфати, карбонати, силікати лужних металів, окиснювачі типу хроматів натрію, калію або нітриту натрію, що утворюють на поверхні захисний шар), органічні сполуки (аліфатичні аміни та інші речовини, здатні абсорбувати кисень). Найбільш ефективний з них - хромат натрію, але він токсичний. Для захисту від корозії пожежного обладнання зазвичай застосовують покриття.

Домішки, що додаються до води (особливо солі, що дисоціюють) підсилюють її електропровідність на 2-3 порядки. Тому при гасінні пожеж водою електрообладнання знеструмлюють. Разом з тим відомі приклади застосування води для захисту високовольтного кабельного господарства. У цьому випадку застосовують дистильовану воду.

Воду не можна застосовувати для гасіння речовин, що бурхливо реагують з нею з виділенням горючих газів. До таких речовин відносяться метали (особливо небезпечні лужні метали, які реагують з вибухом), багато які металоорганічні сполуки (алюміній органічні, літій органічні та ін.), карбіди металів, деякі гідриди металів та ін.

Нафтопродукти і інші органічні рідини, легші за воду, при гасінні водою спливають на її поверхню, і площа пожежі збільшується. У цьому випадку слід застосовувати розпилену воду. Характер дроблення води при цьому (розмір крапель) слід підбирати з урахуванням температури спалаху горючого відповідно до даних, розглянутих вище. При гасінні палаючих масел і жирів водою, особливо при застосуванні компактних струменів, може відбутися викид або розбризкування палаючих продуктів.

В таблиці 1.13 подано короткий перелік речовин, для гасіння яких не можна застосовувати воду і водопінні засоби.

Вельми істотними недоліками води є її погана здатність змочувати і мала в'язкість, що утрудняють гасіння волокнистих, пилоподібних і особливо тліючих матеріалів. До тління схильні матеріали з великою питомою поверхнею, в порах яких міститься повітря, необхідне для горіння. Такі матеріали можуть горіти при сильно зниженому вмісті кисню в навколишньому середовищі. Проникнення вогнегасних засобів в пори тліючих матеріалів, як правило, досить важко.

Таблиця 1. 13 – Горючі речовини, для гасіння яких не можна застосовувати воду

Речовина	Характер взаємодії з водою
Алюмінійорганічні сполуки	Реагують з вибухом
Літійорганічні сполуки, карбіди лужних металів, гідриди деяких металів, карбіди кальцію, алюмінію, барію, силани	Розкладаються з виділенням горючих газів
Лужні метали, магній, цинк, титан	Виділяють водень, що займається або вибухає
Гідросульфат натрію	Самозаймання
Сірчана кислота, хлорид титану	Сильний екзотермічний ефект
Бітум, пергідрат натрію, жири, масла, петролатум	Підсилення горіння у результаті викиду, розбризкування, скипання

Для підвищення вогнегасної ефективності води в неї вводять добавки, що підвищують її здатність змочувати, в'язкість. Рівнодіюча сил, що діють на молекулу, що знаходиться на поверхні рідини, спрямована всередину рідини, і тому молекули рідини прагнуть опуститися в нижні шари.

Робота переводу молекул на поверхню рідини вимагає витрат енергії, характерної для кожної речовини і званої поверхневим натягом. Чим вище поверхневий натяг, тим гірше здатність рідини змочувати і тим більше її рухливість і розтікання. Це пояснюється прагненням краплі прийняти сферичну форму і протидіяти її зміни тим більшою мірою, чим вище поверхневий натяг. В результаті крапля стикається зі змочувальним матеріалом дуже малою поверхнею і легко з нього стікає, не проникаючи в пори матеріалу.

Вода має досить великий поверхневий натяг, що й обумовлює її погану здатність змочувати поверхню.

Змочувачі, що застосовуються для зменшення поверхневого натягу води, є поверхнево-активними речовинами, тобто речовинами, здатними адсорбуватися на межі розділу вода-повітря і розташовуватися певним чином. Всі поверхнево-активні речовини можна розділити на дві основні групи: іоногенні і неіоногенні. До групи йоногенних входять речовини, здатні у воді дисоціювати на протилежно заряджені частини. Більша частина, що складається з вуглеводневого іона, і грає роль поверхнево-активного агента. Ця група ділиться на дві підгрупи - аніоноактивні, тобто вуглеводнева частина є аніоном, і катіоноактивні, в яких роль поверхнево-активного агента відіграє катіон. В якості змочувачів при пожежогасінні катіоноактивні з'єднання не застосовують.

До групи неіоногенних входять розчинні у воді, але не дисоціюючи і не утворюючи іонів речовини. Розчинення таких з'єднань обумовлено створенням між кисневими атомами, які входять до їх складу і молекулами води водневого зв'язку і утворенням гідратів. Вхідна в з'єднання вуглецева частина зумовлює їх гідрофобні властивості.

При пожежогасінні найбільш доцільно застосовувати як змочувачі сульфонати, сульфонол, змочувачі ДБ і НБ.

Наприклад, при застосуванні 0,2% розчину сульфазолу при гасінні деревини час гасіння зменшується у 2,3 рази, питомі витрати води – в 4,5 рази.

Втрати води, пов'язані з розтіканням, можна зменшити, як уже говорилося, підвищенням її в'язкості. Встановлено, що підвищення в'язкості до 1,0-1,5 Па·с дозволяє скоротити час гасіння приблизно в 5 разів. Найкращими добавками для цього є розчини альгінату натрію і натрійкарбоксиметилцелюлози. Показано, що 0,05% розчин натрійкарбоксиметилцелюлози сприяє суттєвому скороченню витрат води на пожежогасіння. Якщо витрата на гасіння звичайної води становить 40...400 л/м², то «в'язкий» води витрачається 5...85 л/м².

Вогнегасну здатність води можна також підвищити добавками (в межах 5%) карбонатів або бікарбонатів лужних металів, так як при випаровуванні води виділяються вільні солі, що інтенсивно гальмують в дрібнодисперсному стані процеси, що йдуть в полум'ї.

1.12.2 Гасіння пінами

Піна - вогнегасний склад, найбільш широко застосовуваний при пожежогасінні, - являє собою колоїдну систему, що складається з бульбашок газу, оточених плівками рідини.

Піни характеризуються агрегативною і термодинамічною нестійкістю. Оскільки чисті рідини мають великий поверхневий натяг, для отримання піни в систему необхідно вводити добавки, що знижують поверхневий натяг води. В якості цих добавок, званих піноутворювачами, застосовують деякі природні (що містять білок) і синтетичні (сульфокислоти, їх солі тощо) поверхнево-активні речовини. Крім того, для підвищення стійкості пін в них вводять також стабілізатори (солі полівалентних металів, глинозем і ін.).

Піни застосовують для гасіння твердих та рідких речовин, що не вступають у взаємодію з водою, і в першу чергу - для гасіння нафтопродуктів. При гасінні піну зливають на окремі ділянки палаючої поверхні. Розтікаючись, піна повністю покриває поверхню горючого, утворюючи шар певної товщини. По поверхні холодного нафтопродукту піна рухається з постійною швидкістю, що дорівнює 0,34 м/см. У разі ж розтікання по палаючому продукту рух піни сповільнюється в міру віддалення від місця зливу і може в деякій точці стати рівною нулю. Цей ефект пов'язаний з тим, що руйнування піни з підвищенням температури прискорюється і може настати момент, коли швидкості надходження піни та її руйнування стануть рівними. Таким чином, мінімальна витрата піни повинна забезпечувати перевищення швидкості руху піни над швидкістю її руйнування в найвіддаленіших від місць зливу точках.

Вогнегасна здатність піни обумовлена насамперед її ізолюючою дією, тобто здатністю перешкоджати проходженню в зону полум'я горючих парів. Наприклад, швидкість випаровування бензину під шаром піни товщиною 5 см зменшується в 30-40 разів. Ізолююча дія піни залежить від її фізико-хімічних властивостей і структури, від товщини її шару, а також від природи горючої речовини і від температури на її поверхні.

Разом з тим особливо при гасінні твердих матеріалів істотне значення може мати також охолоджуюча дія піни.

До переваг піни належить той факт, що на відміну від ряду інших вогнегасних сумішей для поверхневого гасіння вона не вимагає одночасного перекриття всього дзеркала (площі) горіння. Застосування піни, особливо високократної, дозволяє значно скоротити витрату води. Крім того, піна має більш високу змочувальну здатність, ніж вода.

Вогнегасні властивості піни визначаються також її кратністю, стійкістю, дисперсністю і в'язкістю. Характеристики цих властивостей піни залежать від природи горючої речовини, умов протікання пожежі і подачі піни. Кратністю піни називається відношення об'єму піни до об'єму рідкої фази (або до об'єму розчину, з якого вона утворена). З плином часу піна руйнується. Руйнування її обумовлюється старінням, впливом поверхні, на яку вона нанесена, температурою і умовами подачі. Підвищення температури сприяє руйнуванню

піни. Роль горючої речовини, на яку наноситься піна, пов'язана насамперед із її електростатичними властивостями. Руйнуванню піни сприяє також механічне розбивання струменя піни при її подачі. Стійкість піни характеризується її опірністю процесу руйнування і оцінюється тривалістю виділення з піни 50% рідкого середовища, званого відсіком. Піни з більшою кратністю менш стійки. Хімічна піна, як правило, більш стійка, ніж повітряно-механічна.

Дисперсність піни обернено пропорційна розмірам бульбашок і багато в чому визначає її якість. Чим вище дисперсність, тим краще піна, тим більше її стійкість, тим вище її вогнегасна ефективність. З підвищенням кратності піни її дисперсність зменшується. Ступінь дисперсності піни багато в чому залежить від умов її отримання, в тому числі і від характеристики апаратури. З підвищенням в'язкості піни стійкість її зростає, але погіршується розтікання по палаючій поверхні. Тому необхідно підбирати оптимальне значення в'язкості піни.

Хімічна піна утворюється при взаємодії розчинів кислот і лугів у присутності піноутворюючої речовини і являє собою концентровану емульсію двоокису вуглецю у водному розчині мінеральних солей, що містить піноутворюючу речовину. Останнім часом намітилася тенденція до скорочення застосування хімічної піни, що пов'язано з порівняно високою її вартістю і складністю організації гасіння пожеж.

Повітряно-механічна піна підрозділяється на низьократну (кратність до 30), середньократну (кратність 30-200), високократну (кратність вище 200). Найбільш широке застосування знаходить піна середньої кратності, для отримання якої використовують просту піногенеруючу апаратуру (типу ГВП-600), що забезпечує одночасну подачу на металеву сітку 2-6% -ного водного розчину піноутворювача і ежектуємого потоком цього розчину повітря.

Незважаючи на те що при дуже високої кратності (наприклад, 500-1000) витрати води ще більше скорочуються, вогнегасна здатність високократної піни погіршується, тому що зменшуються її стійкість та ізолювальна здатність. Оптимальна кратність піни становить 70-150. Густина піни середньої і високої кратності менше, ніж щільність низьократної піни, тому менш імовірно її занурення всередину пального; крім того, піну середньої або високої кратності можна використовувати не тільки для поверхневого, але і для об'ємного гасіння. Такий спосіб широко застосовують при гасінні пожеж у підвалах, кабельних каналах тощо.

Піна низької кратності має обмежене застосування і рекомендується в основному для гасіння пожеж рідин в резервуарах, обладнаних установками подачі піни через шар горючої речовини, а також для охолодження палаючого і сусіднього з ним устаткування. Інтенсивність подачі низьократної піни при гасінні нафтопродуктів в резервуарах повинна становити 0,1 - 0,15 л /с·м².

Для отримання вогнегасних пін застосовують такі піноутворювачі (ПУ):

- ПУ-1, що являє собою розчин нейтралізованого газового контакту Петрова (натрієві солі нафтових сульфокислот) з добавками кістяного клею і етанолу або етиленгліколю;

- ПУ-1Д, що представляє собою розчин алкіларілсульфоната, що містить 26-29% активної речовини;

- ПУ-1с, що являє собою ПУ-1Д з додаванням 3,5% альгінату натрію і 1% спиртів фракції С₁₀-С₁₂;

- ПУ «САМПО» призначений для гасіння пожеж деревини, гуми і т. п., може використовуватися для об'ємного гасіння. Біологічно розкладаємий;

- ПУ «ФОРЕТОЛ» на основі фторованих ПАР (поверхнево активних речовин), призначений для гасіння етанолу та інших полярних рідин. Підвищена стійкість забезпечується утворенням полімерної плівки на палаючій поверхні. Має високу вогнегасну здатність.

Якість піни залежить від природи води. Наприклад, при застосуванні морської води умови піноутворення погіршуються. У цьому випадку рекомендується застосовувати розчин піноутворювачів з концентрацією в два рази більше зазначених вище.

Якість піноутворювачів характеризується зовнішнім виглядом, в'язкістю, мінімальною температурою застосування, температурою замерзання, корозійною здатністю. За зовнішнім виглядом піноутворювачі повинні являти собою однорідну рідину без осаду і сторонніх включень. В'язкість ПУ не повинна перевищувати 10^{-4} м²/с. Під мінімальною температурою застосування піноутворювачів розуміють ту найнижчу температуру, при якій він ще зберігає рухливість. Її оцінюють за різкої зміни характеру залежності в'язкості від температури.

Для зниження корозійної здатності в піноутворювачі додають спеціальні інгібітори.

Вогнегасна ефективність піни характеризується інтенсивністю її подачі та питомими витратами. На кривій «витрати піни - інтенсивність подачі» є мінімум.

Причинами, що обумовлюють збільшення витрати піни на одиницю площі вогнища пожежі зі збільшенням інтенсивності її подачі, є скупчення піни в місці зливу і пов'язане з цим її руйнування і погіршення розподілу по площі вогнища пожежі. При гасінні осередку пожежі великої площі можливості рівномірного розподілу піни досить обмежені. Тому виникає проблема рівномірного розподілу піни по всій поверхні без її перевитрати. Друга причина пов'язана з тим, що піна при русі і в спокійному стані має різні фізичні властивості. Ізолююча здатність піни, що знаходиться в русі, зменшується. У спокійному статичному стані піна створює «ущільнений» шар. Проте перехід до статичного станом відбувається в часі. Період цього переходу сягає 20 с.

Для умов гасіння піною виведено наступне рівняння:

$$\tau = S \ln \left[\frac{1}{1 - (h/KI)} \right], \quad (1.65)$$

де τ – час гасіння, с, при інтенсивності I , м³/с·м²;

S – стійкість піни, с;

h – товщина шару піни, м;
 K – кратність піни.

Звідси отримаємо формулу для критичній інтенсивності, тобто коли $\tau \rightarrow \infty$, $\text{м}^3/\text{с}\cdot\text{м}^2$:

$$I_{\text{кр}} = \frac{h_{\text{кр}}}{KS'} \quad (1.66)$$

де $h_{\text{кр}}$ - критична товщина шару піни, м.

Таким чином, критична інтенсивність подачі піни визначається стійкістю піни, її кратністю і ізолюючої здатністю, що характеризується значенням $h_{\text{кр}}$. Запропоновано оптимальну (нормативну) інтенсивність оцінювати за рівнянням:

$$I_{\text{н}} = 2,3I_{\text{кр}} \quad (1.67)$$

Для підвищення якості піноутворювачів, наприклад з метою збільшення стійкості утворюваних за їх допомогою пін, в розчин ПАР вводять невеликі добавки, які забезпечують збільшення в'язкості (зменшення зневоднення піни), полегшують створення поверхневих адсорбційних шарів (зменшують поверхневий натяг) і структурно зміцнюють плівки пін (зниження інтенсивності відсіку). До добавок, що задовольняє цим вимогам, відносяться метилцелюлоза, натрійкарбоксиметилцелюлоза і вищі спирти з вмістом 12-16 атомів вуглецю.

1.12.3 Гасіння інертними розріджувачами

Об'ємне гасіння засноване на створенні в захищеному об'єкті середовища, яке не підтримує горіння, і є одним з найбільш ефективних способів пожежного захисту приміщень. Поряд з можливістю швидкого гасіння цей спосіб забезпечує попередження вибуху при накопиченні в приміщенні горючих газів і парів.

В якості вогнегасних сумішей при цьому способі використовують інертні розріджувачі - двооксид вуглецю, азот, аргон, водяна пара, димові гази і летючі інгібітори - деякі галогенвмісні речовини.

Горіння більшості речовин припиняється при зниженні вмісту кисню в навколишньому середовищі до 12-15% (об.), а для речовин, які характеризуються широкою областю займання (водень, ацетилен), металів (калій, натрій та ін.), деяких гідридів металів і металоорганічних сполук, тліючих матеріалів - до 5% (об.) і менше.

В таблиці 1.14 наведено граничний вміст кисню при розведенні повітря двооксидом вуглецю і азотом:

Таблиця 1.14 – Вміст кисню при розбавленні повітря флегматизатором, при якому припиняється горіння, об.%

Горюча речовина	Флегматизатор		Горюча речовина	Флегматизатор	
	CO ₂	N ₂		CO ₂	N ₂
Ацетилен	9,0	6,5	Пропілен	14,0	12,0
Бутан	16,0	13,0	Калій	-	5,0
Водень	7,0	5,0	Натрій	-	5,0
Метан	16,0	13,0	Бавовна	6,0	4,0

Гасіння при розведенні середовища інертними розріджувачами пов'язано з втратами тепла на нагрівання цих розріджувачів і зниженням швидкості процесу та теплового ефекту реакції. Декілька більша флегматизуюча ефективність двооксиду вуглецю в порівнянні з азотом пояснюється більш високою його теплоємністю. Двооксид вуглецю найбільш широко застосовують для об'ємного гасіння пожеж на складах ЛЗР, в акумуляторних станціях, сушильних печей, стендів для випробування двигунів, електрообладнання та ін. Двооксид вуглецю не можна застосовувати для гасіння лужних і лужноземельних металів, деяких гідридів металів і сполук, в молекули яких входить кисень.

Двооксид вуглецю використовується в стаціонарних установках, а також у вогнегасниках (ВВ, ВВК). Особливістю двооксиду вуглецю є його здатність при дроселюванні утворювати пластівці «снігу». При поверхневому гасінні «сніжним» двооксидом вуглецю його розбавляюча вогнегасна дія доповнюється охолодженням вогнища горіння.

У тих випадках, коли не можна застосовувати двооксид вуглецю, використовують азот або аргон, причому останній тоді, коли є небезпека утворення нітридів металів, що мають вибухові властивості (нітриди магнію, алюмінію, літію, цирконію та ін.).

Для більшості речовин вогнегасна концентрація двооксиду вуглецю становить 20-30% (об.).

При влаштуванні систем об'ємного пожежогасіння інертними газами зустрічаються з двома проблемами - можливістю застосування способу обмежуються розмірами приміщень, які захищаються і необхідністю враховувати небезпеку ураження людей, що викликається задухою. Перша проблема обумовлена тим, що при дуже великому обсязі приміщення важко забезпечити подачу необхідної кількості газу за допустимий час. Крім того, при цьому потрібно настільки велике число балонів, що їх вартість, витрати на зберігання, обслуговування та інші витрати можуть перевищити вартість об'єкта, що захищається.

Можливості об'ємного способу гасіння значно розширюються при використанні зріджених газів. Зріджені гази займають обсяг приблизно в 500 разів менший, ніж така ж маса газу, і не вимагають великих зусиль для подачі на гасіння. Тому практично відпадає необхідність в обмеженні приміщень, які захищаються за об'ємом. Зберігати зріджені гази можна в спеціальних криогенних ємностях. Вельми перспективно застосування зріджених газів для захисту приміщень атомних електростанцій з рідко металічними теплоносіями. За кордоном відомо застосування зріджених газів для захисту приміщень об'ємом 30 тис. м³.

Граничне розведення повітря азотом, при якому не настає задуха, відповідає зниженню вмісту кисню до 14-16% (об.). У випадку ж застосування двооксиду вуглецю летальна концентрація його становить близько 10% (об.). Разом з тим, вогнегасні концентрації азоту і двооксиду вуглецю складають відповідно 40% (об.) і 30% (об.), тобто виявляються вищими небезпечних для людей концентрацій.

При проектуванні систем об'ємного пожежогасіння необхідно передбачати сигналізуючий пристрій, яке попереджає про пуск системи гасіння в дію. Проміжок часу між сигналом і пуском установки повинен бути достатнім для евакуації людей з приміщення.

Слід зазначити, що в разі подання інертного розріджувача у замкнуте герметичне приміщення середовище може залишатися прийнятною для життя людей аж до придушення вогнища пожежі. Це пов'язано з відмінностями механізмів процесів дихання людини і горіння. У першому випадку критичний вміст кисню визначається його абсолютним вмістом (парціальним тиском), і в другому - об'ємним змістом. При введенні розріджувача в герметичне приміщення абсолютний вміст кисню не змінюється, а об'ємна концентрація знижується. У такому приміщенні горіння може припинитися і в результаті самозатухання, але при цьому відбувається поглинання кисню. Тому введення розріджувача має значно підвищити ймовірність збереження життя людей в замкнутому приміщенні при пожежі.

1.12.4 Гасіння галогенвмісними сумішами

Всі описані вище вогнегасні суміші надають порівняно пасивну дію на полум'я і не впливають на кінетику і хімізм реакції в полум'ї. Більш перспективними представляються такі вогнегасні засоби, які ефективно гальмують хімічні реакції в полум'ї, тобто чинять інгібуючий вплив.

До таких вогнегасних засобів відносяться склади на основі галогенпохідних граничних вуглеводнів, в яких атоми водню заміщені повністю або частково атомами галогенів.

Численними дослідженнями встановлено, що найбільш ефективними і зручними для застосування є бром- і фтор похідні метану і етану. Вогнегасна ефективність галогенвуглеводнів підвищується при інших рівних умовах при заміщенні в них атома водню на атом галогену в наступній послідовності: F,

С1,Вг, І. Враховуючи дефіцитність і високу вартість йодпохідних, в якості основи практичних інгібіторів обрані бромвмісні вуглеводні. При введенні фтору в молекулу галогенвуглецевого інгібітору підвищується в бажаних межах його стабільність, зменшуються горючість, токсичність і корозійна активність. З подібних галогенорганічних сполук найбільш широке застосування знайшли трифторбромметан, діфторхлорбромметан, дібромтетрафторетан, дібромдіфторметан.

У нашій країні в основному застосовують дібромтетрафторетан, а також до недавнього минулого - бромистий етил (іноді з добавками бромистого метилену).

Останнім часом проведено велику кількість досліджень, з яких випливає, що склади на основі бромистого етилу володіють невисокою вогнегасною здатністю, а також рядом інших недоліків. В даний час склади на основі бромистого етилу виключені з обігу.

Трифторбромметан і діфторхлорбромметан застосовуються в обмежених масштабах. Ці сполуки мають і торговельні найменування: за кордоном - галони і у нас - хладони (у холодильній техніці - фреони). Кожен галон або хладон характеризується набором цифр. За зарубіжній номенклатурою номер галону складається таким чином: перша цифра - число атомів вуглецю, друга - атомів фтору, третя - атомів хлору, четверта - атомів бромі і п'ята - атомів йоду. Число атомів водню визначається відсутнім числом валентних зв'язків. Номер хладону складається таким чином: перша цифра - число атомів вуглецю мінус одиниця (якщо отриманий 0, він не пишеться), друга - число атомів водню плюс одиниця, третя - число атомів фтору; бром характеризується буквою В і цифрою за кількістю атомів; число атомів хлору визначається за вільними зв'язками.

Наприклад, трифторбромметан, CF_3Br , маркується як галон – 1301, як хладон – 13В1.

Галогенвуглеводні є летючими сполуками, вони погано розчиняються у воді, але добре змішуються з багатьма органічними речовинами. Хладони 114В2, 12В2 - важкі рідини із специфічним запахом. Решта хладонів за нормальних умов - гази, що легко зріджуються під невеликим тиском. Хладони мають високу густину як в рідкому, так і газоподібному стані, що забезпечує можливість створення струменя і проникнення крапель в полум'я, а також утримання парів біля вогнища горіння. Низькі температури замерзання роблять можливим застосування їх при мінусових температурах. Хладони володіють також хорошими діелектричними властивостями, тому їх можна застосовувати для гасіння пожеж електрообладнання, що знаходиться під напругою.

Поряд з позитивними якостями суміші на основі хладонів мають і ряд недоліків. Ці речовини можуть надавати токсичну дію на людину. При цьому якщо самі хладони діють на організм людини як слабкі наркотичні отрути, то продукти їх термічного розкладання мають порівняно високу токсичність. Крім того, продукти, що утворюються при пожежогасінні хладонами характеризуються, як правило, високою корозійною активністю.

Механізм вогнегасної дії хладонів. Більшість дослідників вважає інгібування горіння галогенвуглеводнями (RX, де R - вуглеводневий радикал, X - атом галогену) радикальним процесом. Однак єдиного уявлення про конкретний механізм загибелі активних центрів немає. Ряд дослідників пов'язує вплив RX з їх попередніми піролізом, інші вважають, що початковим актом є крекінг RX атомарним воднем з утворенням бромистого водню. Немає ясності щодо того, в якій частині полум'я здійснюється інгібування. Зазвичай вважають, що гальмування відбувається безпосередньо в зоні, де світиться полум'я. Перетворення горючої речовини, окислення та інгібування відбуваються в низькотемпературній зоні, куди досягають атоми водню з гарячого фронту полум'я. Вогнегасні концентрації деяких хладонів наведено в табл. 1.15.

Таблиця 1.15 – Вогнегасні концентрації хладонів, об. %

Горюча речовина	114B2	13B1	12B1
Етанол	2,3	3,2	3,9
Бензин	2,12	3,0	3,6
Гептан	2,4	3,3	3,75
Діетиловий ефір	2,13	3,45	4,05
Толуол	1,4	1,85	2,25

Іонна теорія інгібування заснована на тому, що атоми брому легко відриваються від молекули галогенвуглеводню (хладону) і, маючи більший перетин захоплення електронів, ніж кисень, гальмують горіння, захоплюючи електрони, необхідні для активації кисню.

1.12.5 Гасіння порошками

Вогнегасні порошки являють собою подрібнені мінеральні солі з різними добавками, що перешкоджають злежуванню і грудкуванню. Порошки мають ряд переваг в порівнянні з іншими засобами. Вони характеризуються високою вогнегасною здатністю. Крім того, вони відрізняються універсальністю дії, забезпечуючи гасіння навіть таких матеріалів, які неможливо загасити водою та іншими засобами.

Порошки можна використовувати для різноманітних способів пожежогасіння, в тому числі для флегматизації і придушення вибухів.

До експлуатаційних властивостей вогнегасних порошків відносяться плинність, здатність чинити опір злежуванню і грудкуванню, зволоженню тощо.

Розрізняють порошки загального та спеціального призначення. Порошки загального призначення використовують для гасіння пожеж звичайних (органічних) горючих матеріалів: легкозаймистих (ЛЗР) і горючих (ГР) рідин, наприклад різних нафтопродуктів, розчинників, вуглеводневих скраплених

газів, твердих матеріалів - деревини, гум, пластиків тощо. Гасіння цих матеріалів досягається шляхом створення порошкової хмари, яка огортає осередок горіння.

Порошки спеціального призначення використовують для гасіння горючих речовин і матеріалів (наприклад, деяких металів), припинення горіння яких досягається шляхом ізоляції палаючої поверхні від навколишнього повітря. Вогнегасна здатність порошоків загального призначення підвищується із збільшенням їх дисперсності (зменшенням розміру частинок), порошоків спеціального призначення - майже не залежить від ступеня їх дисперсності.

Особливе місце займає склад СІ-2 – великопористий силікагель, насичений хладоном 114В2. Цей порошок ефективний при гасінні загорянь деяких пірофорних елементоорганічних сполук (алюмінійорганічних, гідридів деяких металів тощо). Цей склад має також високу вогнегасну здатність по відношенню до пожеж класу В (пожежі рідин).

Найбільш широко поширені порошки на основі бікарбонату натрію. Вони більше за інших стійкі проти злежування і володіють добрими експлуатаційними властивостями. Широке застосування знаходять також порошки на основі фосфорно-амонійних солей. До їх переваг відноситься здатність гасити тліючі матеріали.

Вогнегасні порошки є складними гетерогенними системами, тому вони мають специфічні властивості і особливості, від яких залежить їх вогнегасна здатність. Хімічний склад порошоків визначає їх вогнегасну дію та експлуатаційні властивості. Такі солі, як, наприклад, йодиди і броміди лужних металів, фосфат амонію, мають добрі вогнегасні властивості, але гігроскопічні і в сильній мірі схильні злежуванню. Інші солі, як, наприклад, фтору и металів, сульфат амонію, володіють добрими експлуатаційними властивостями, але нездатні ефективно гасити полум'я. При розробці вогнегасних порошоків підбирають солі, які задовольняють обом вимогам, або солі піддають спеціальній обробці. Ефективність використання порошоків залежить також від способу і умов їх подачі в осередок пожежі. В даний час домінує пневматичний спосіб подачі, що полягає у витісненні порошку з посудини стисненим газом.

Гасіння пожеж порошковими складами можна пояснити дією наступних факторів: розбавленням горючого середовища газоподібними продуктами розкладання порошку або безпосередньо порошковою хмарою; охолодженням зони горіння в результаті витрат тепла на нагрів частинок порошку, їх часткове випаровування і розкладання в полум'я; ефектом вогнеперешкоди, що досягається при проходженні полум'я через вузькі канали, як би створювані порошковою хмарою; інгібуванням хімічних реакцій, що обумовлюють розвиток процесу горіння, газоподібними продуктами випаровування і розкладання порошоків або гетерогенним обривом ланцюгів на поверхні порошоків або твердих продуктів їх розкладу.

Незважаючи на те що до теперішнього часу механізм вогнегасної дії порошоків ще недостатньо ясний, більшість дослідників вважають, що основну роль при гасінні відіграє здатність порошоків інгібувати полум'я. Вогнегасний

ефект, наприклад, порошоків на основі бікарбонату лужних металів значно перевищує ефект охолодження або розбавлення двооксидом вуглецю, що виділяється при розкладанні цих порошоків. Дійсно, бензин, палаючий на площі 1 м^2 , можна загасити 1 кг порошку типу ПСБ. Для гасіння цього вогнища пожежі розпорошеної водою або двооксидом вуглецю потрібно кілька кілограмів. При повному розкладанні 1 кг порошку утворюється лише 260 г двооксиду вуглецю, а витрачається на це розкладання кількість теплоти еквівалентно теплоті випаровування всього 300 г води.

Деякі дослідники вважають, що гасіння полум'я обумовлено гомогенним інгібуванням, що полягає у взаємодії з активними центрами газоподібних частинок, які утворюються при випаровуванні і розкладанні порошоків. Інша група фахівців пов'язує гасіння полум'я з гетерогенною рекомбінацією радикалів і атомарних частинок на поверхні порошоків.

Найбільш ефективні порошкові інгібітори - оксалат калію $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ і хлориди лужних металів KCl , NaCl .

РОЗДІЛ 2. ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

2.1 Практичне заняття №1. Температура горіння

Приклад 2.1. Знайти теоретичну температуру горіння речовини, якщо об'єм продуктів згорання – 9 м³/кг, їх склад: 70 об.% азоту, 20% CO₂ і 10% водяної пари. Нижча робоча теплота згорання складає 26 МДж/кг.

Рішення

Орієнтовно приймаємо температуру горіння 1500°C. З додатку 14 для цієї температурі маємо, кДж/м³К: C_{N₂} = 1,45; C_{CO₂}=2,34; C_{H₂O}=1,85. Теплоємність суміші газів, кДж/м³К:

$$C_c = 1,45 \cdot 0,7 + 2,34 \cdot 0,2 + 1,65 \cdot 0,1 = 1,648.$$

Температура горіння за формулою (1.2):

$$t_{\tau} = \frac{26000}{9 \cdot 1,648} = 1753^{\circ}\text{C}$$

Уточнюємо теплоємності продуктів згорання, кДж/м³К: C_{N₂}=1,47; C_{CO₂}=2,38; C_{H₂O}=1,91. Теплоємність суміші газів:

$$C_c = 1,47 \cdot 0,7 + 2,38 \cdot 0,2 + 1,91 \cdot 0,1 = 1,696 \text{ кДж/м}^3\text{К.}$$

Температура горіння у другому наближенні:

$$t_{\tau} = \frac{26000}{9 \cdot 1,696} = 1703^{\circ}\text{C}$$

В третьому наближенні: C_{N₂} = 1,46; C_{CO₂}=2,37; C_{H₂O}=1,90; C_c = 1,686; t_τ = 1713°C.

Задача 2.1. Визначити теоретичну температуру горіння твердого палива за наведеними у табл. 2.1 даними.

Таблиця 2.1 – Вихідні данні для задачі 2.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q_H^P , МДж/кг	18	20	22	23	24	25	29	30	35	40
V_c , м ³ /кг	7	6,5	8,8	9,2	8,4	9,3	9,5	10	10,5	11
N ₂ , %	80	76	77	75	82	74	70	67	65	64
CO ₂ , %	15	12	13	20	14	12	15	15	16	16
H ₂ O, %	5	12	10	5	4	14	15	18	19	20

Задача 2.2. Визначити теоретичну температуру горіння газоподібного палива за наведеними у табл. 2.2 даними.

Таблиця 2.2 - Вихідні данні для задачі 2.2

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q_H^P , МДж/м ³	8	16	24	32	24	25	33	34	36	38
V_c , м ³ /м ³	7	6,5	8,8	9,2	8,4	9,3	9,5	10	11	11,2
N ₂ , об.%	78	73	77	72	80	71	70	67	65	64
CO ₂ , %	15	12	10	18	14	12	14	15	16	16
H ₂ O, %	5	10	10	5	4	14	12	16	16	17
O ₂ , %	2	5	3	5	2	3	4	2	3	3

Задача 2.3. Розрахувати теплоту згорання твердого палива за наданими у табл. 2.3 адиабатичною температурою горіння і об'ємом продуктів згорання. Вважати, що димові гази складаються з 70 об. % азоту, 15 % CO₂, інше - водяна пара.

Таблиця 2.3 – Вихідні данні для задачі 2.3

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t , °C	1800	2000	220	2300	2400	2500	2190	3000	2350	1400
V_c , м ³ /кг	7	6,5	8,8	9,2	8,4	9,3	9,5	10	8,5	9

2.2 Практичне заняття №2. Температура спалаху

Приклад 2.2. Знайти температуру спалаху етанолу, якщо його температура кипіння 78,3°C.

Рішення

Формула етанолу C₂H₅OH. Звідси за формулою (1.6) коефіцієнт горючості $K = 12$. Застосовуючи рівняння (1.5), отримаємо:

$$t_c = 18,3 - 18\sqrt{12} = 15,9^\circ\text{C}$$

Розрахуємо тепер температуру спалаху етанолу за формулою (1.4), використовуючи додаток 5.

Зв'язок C=C: $a_1 = -0,28$; $l_1 = 1$. Зв'язок C-H: $a_2 = 1,105$; $l_2 = 5$. Зв'язок C-O: $a_3 = 2,47$; $l_3 = 1$. Зв'язок O-H: $a_4 = 23,9$; $l_4 = 1$.

Підставляючи ці значення у рівняння (1.4), маємо: $t_c = 10,1$ °C. Експериментальне значення (додаток 15) $t_c = 13$ °C.

Задача 2.4. Які з наведених речовин за звичайних умов є горючими, а які – ні?

- 1) CH_3Br ; 2) CH_2F_2 ; 3) $\text{CHBr}_2\text{CH}_2\text{SH}$; 4) $\text{CHCl}_2\text{OSO}_2\text{CH}_2\text{F}$; 5) $\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_4$;
6) $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4$; 7) $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_2\text{Cl}_2$; 8) $\text{C}_3\text{H}_2\text{Cl}_6$; 9) $\text{C}_3\text{H}_3\text{FCl}_2\text{Br}_2$; 10) HCOONa

Задача 2.5. Які з похідних етану $\text{C}_2\text{H}_n\text{G}_{6-n}$, де G – галоген (F, Cl, Br) за звичайних умов є горючими?

Задача 2.6. Знайти температуру спалаху наведених у табл. 2.4 рідин двома способами – за рівняннями (1.4) і (1.5). Порівняти з експериментальними значеннями, зробити висновок.

Таблиця 2.4 – Вихідні данні для задачі 2.6

Варіант	Речовина	Варіант	Речовина
1	Ацетон $\text{CH}_3\text{—C(O)—CH}_3$	6	Масляна кислота $\text{C}_4\text{H}_7\text{O}_2$
2	Бензол C_6H_6	7	Оцтова кислота CH_3COOH
3	Метанол CH_3OH	8	Гліцерин $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$
4	Мурашина кислота CHOH	9	Толуол $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$
5	Сірковуглець CS_2	10	Фенол $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$

Задача 2.7. Знайти температуру спалаху суміші двох рідин (дивись табл. 2.5) з об'ємними концентраціями 50%/50%.

Таблиця 2.5 – Вихідні данні для задачі 2.7

Варіант	Речовини	Варіант	Речовини
1	Ацетон, октан	6	Толуол, фенол
2	Бензол, пентан	7	Ацетон, етанол
3	Метанол, етанол	8	Ефір діетиловий, етанол
4	Мурашина і оцтова кислоти	9	Бензол, фенол
5	Октан, пентан	10	Метанол, фенол

Задача 2.8. Знайти температуру спалаху суміші бензолу і толуолу з мольною часткою бензолу $N/12$, де N – номер варіанту.

Задача 2.9. Розв'язати задачу 2.6 за умовами, якщо тиск відрізняється від атмосферного на значення, наведене в табл. 2.6.

Задача 2.10. За яким тиском температура спалаху етанолу буде дорівнювати заданій у табл. 2.7? Для розрахунку взяти експериментальне значення температури спалаху.

Таблиця 2.6 – Вихідні данні для задачі 2.9

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Надлишковий тиск, кПа	10	20	-8	-15	16	14	-25	33	7	-20

Таблиця 2.7 – Вихідні данні для задачі 2.10

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_c, ^\circ\text{C}$	15	18	11	10	9	8	0	-2	14	16

2.3 Практичне заняття №3. Температура займання

Задача 2.11. Знайти температуру займання рідини за умовами задачі 2.6. Використовувати формулу (1.11).

Задача 2.12. Знайти температуру займання насичених вуглеводнів наведених в табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Вихідні данні для задачі 2.12

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вуглеводень	бутан	пентан	гексан	гептан	октан	нонан	декан	ундекан	додекан	три-декан

2.4 Практичне заняття №4. Концентраційні межі займання

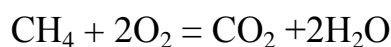
Приклад 2.3. Знайти концентраційні межі поширення полум'я для метану. Нижню концентраційну межу знайти двома способами.

Рішення

Визначаємо коефіцієнт горючості метану. За формулою (1.6) $K=8$. Тоді, використовуючи рівняння (1.17), маємо:

$$H = \frac{44}{8} = 5,5\%$$

Запишемо реакцію горіння метану:



Звідси $N = 4$. Використовуючи рівняння (1.12 та 1.13), маємо:

$$H = \frac{100}{4,76(4 - 1) + 1} = 6,54\%;$$

$$B = \frac{400}{4,76 \cdot 4 + 4} = 17,4\%;$$

Експериментальні значення: $H = 5,3\%$; $B = 14,1\%$.

Задача 2.13. Знайти концентраційні межі поширення полум'я для наданих у табл. 2.9 речовин. Нижню концентраційну межу знайти двома способами.

Таблиця 2.9 – Вихідні данні для задачі 2.13

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Речовина	C_2H_2	C_3H_2	CH_2O	$\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$	C_4H_8	CHOH	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	C_5H_{10}	CH_3Cl	CH_2Cl_2

Задача 2.14. Знайти концентраційні межі поширення полум'я для наданих у табл. 2.10 вуглеводнів.

Таблиця 2.10 – Вихідні данні для задачі 2.14

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вуглеводень	бутан	етилен	гексан	пропілен	октан	нонан	декан	бутадиєн	пентадиєн	тетра-декан

Задача 2.15. Знайти концентраційні межі поширення полум'я для суміші горючих газів (парів), наведеної в табл. 2.11, з однаковою об'ємною концентрацією компонентів (50%/50%).

Таблиця 2.11 – Вихідні данні для задачі 2.15

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1-й компонент	C ₂ H ₂	NH ₃	C ₆ H ₆	H ₂	C ₂ H ₄ Cl ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	H ₂ S	SiH ₄
2-й компонент	CO	H ₂	CH ₄	H ₂ S	C ₂ H ₆	C ₂ H ₅ OH	SiH ₄	NH ₃	CO	C ₅ H ₁₂

Задача 2.16. Надана суміш сірковуглецю і аміаку. Знайти концентрацію компонентів, при якій нижня концентраційна межа поширення полум'я буде дорівнювати заданій у таблиці 2.12.

Таблиця 2.12 – Вихідні данні для задачі 2.16

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H, %	3	4	5	7	8	9	10	2,5	6	11

Задача 2.17. Надана суміш октану і ацетилену. Знайти концентрацію компонентів, при якій верхня концентраційна межа поширення полум'я буде дорівнювати заданій у таблиці 2.13.

Таблиця 2.13 – Вихідні данні для задачі 2.17

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B, %	9	12	15	17	25	39	40	5,5	60	71

Задача 2.18. Вирішити задачу 2.13 для наданій у табл. 2.14 температури.

Таблиця 2.14 – Вихідні данні для задачі 2.18

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t, °C	40	55	0	14	60	-15	-8	12	48	70

Задача 2.19. Вирішити задачу 2.14 для наданій у табл. 2.15 температури.

Таблиця 2.15 – Вихідні данні для задачі 2.19

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t, °C	40	55	0	14	60	-15	-8	12	48	70

Задача 2.20. Вирішити задачу 2.15 для наданій у табл. 2.16 температури.

Таблиця 2.16 – Вихідні данні для задачі 2.20

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t, ^\circ\text{C}$	10	15	20	30	40	-5	-10	-12	-20	-30

Задача 2.21. Знайти концентраційні межі поширення полум'я для доменного газу наведеного у табл. 2.17 складу.

Таблиця 2.17 – Вихідні данні для задачі 2.21

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CO, %	25	22	23	26	21	20	19	24	25	20
H ₂	9	8	7	6	5	6	10	7	6	11
CH ₄	1	2	1	3	0	4	2	3	1	0
CO ₂ , %	15	16	17	14	15	13	14	15	12	15
H ₂ O	1	2	3	3	2	4	5	5	2	2

Залишок до 100% складає азот.

Задача 2.22. Знайти концентраційні межі поширення полум'я для суміші даного у табл. 2.18 газу і двооксиду вуглецю, якщо концентрація останнього складає 10 об.%.

Таблиця 2.18 – Вихідні данні для задачі 2.22

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	H ₂	CO	NH ₃	H ₂ S	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈

Задача 2.23. Знайти концентраційні межі поширення полум'я для суміші водню і азоту при заданій у табл. 2.19 концентрації останнього.

Таблиця 2.19 – Вихідні данні для задачі 2.23

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N ₂ , об %	5	8	9	10	11	12	13	14	15	20

Задача 2.24. Розв'язати задачу 2.23, якщо замість азоту в суміші буде:

- двооксид вуглецю;
- водяна пара.

Задача 2.25. Знайти мінімальну концентрацію флегматизатору у суміші двох газів (див. табл. 2.20), за якою суміш не буде спалахувати.

Таблиця 2.20 – Вихідні данні для задачі 2.25

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Горючий компонент	C ₂ H ₂	NH ₃	CO	H ₂	C ₂ H ₄	CH ₄	C ₂ H ₆	CO	H ₂	C ₃ H ₈
Флегматизатор	CO ₂	H ₂ O	N ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂	CO ₂	H ₂ O	N ₂	CO ₂

2.5 Практичне заняття №5. Температура самозаймання

Задача 2.26. Знайти температуру самозаймання вказаних у табл. 2.21 газів і парів.

Таблиця 2.21 – Вихідні данні для задачі 2.26

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Речовина	C ₂ H ₄	C ₂ H ₅ OH	CH ₂ O	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	C ₄ H ₈	СНООН	C ₆ H ₅ OH	C ₅ H ₁₀	CH ₃ Cl	CH ₂ Cl ₂

Задача 2.27. Знайти температуру самозаймання насичених вуглеводнів за умовами задачі 2.12.

Задача 2.28. Знайти температуру самозаймання ефірів (C_nH_{2n+1})-О-(C_nH_{2n+1}). Прийняти, що n дорівнює номеру варіанту.

2.6 Практичне заняття №6. Пожежо- і вибухонебезпечний пил

Приклад 2.4. Приміщення має розміри **10 × 6 × 3** м. Площа поверхні обладнання – 17 м². Поверхні покриті шаром вугільного пилу товщиною $h=1$ мм. Об'ємна вага пилу $d = 500$ кг/м³. Чи можливий вибух у цьому приміщенні, якщо пил перейде у зважений стан?

Рішення

Знаходимо площу поверхонь, що огороджують:

$$F_o = 2(10 \cdot 6 + 10 \cdot 3 + 6 \cdot 3) = 216 \text{ м}^2.$$

Загальна площа поверхонь, що вкриті пилом:

$$F = 216 + 17 = 233 \text{ м}^2.$$

Об'єм приміщення:

$$V = 10 \times 6 \times 3 = 180 \text{ м}^3.$$

За формулою (2.35) знаходимо концентрацію зваженого у повітрі пилу:

$$C = \frac{1 \cdot 233 \cdot 500}{180} = 647 \text{ г/м}^3.$$

З додатку 13 бачимо, що нижня концентраційна межа поширення полум'я для вугільного пилу складає 31...400 г/м³, що менше, ніж знайдена концентрація. Тому вибух пилу за наданих умов можливий.

Задача 2.29. Агрегат має внутрішні розміри $7 \times 3 \times 2$ м. Площа поверхні деталей всередині агрегату – 14 м². Поверхні покриті шаром пилу товщиною h (див. табл. 2.22). Об'ємна вага пилу d , кг/м³ (див. табл. 2.22). Чи можливий вибух у цьому приміщенні, якщо пил перейде у зважений стан?

Таблиця 2.22 – Вихідні данні для задачі 2.29

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h , мм	1	1,3	2	1,5	1,5	1,7	0,5	1	2	3
d , кг/м ³	2100	500	700	1000	400	500	550	2300	400	2400
Пил	Al	Амінопласт	Нафталін	Сірка	Камфора	Лігнін	Оргскло	Zn	Цукор	Ti

Задача 2.30. Порожнє приміщення має розміри $a \times b \times h$ (див. табл. 2.23). Підлога і стіни покриті шаром тирси, причому на стінах він учетверо тонший. Об'ємна вага тирси 450 кг/м³. Яка товщина шару тирси на підлозі може вважатися вибухонебезпечною?

Таблиця 2.23 – Вихідні данні для задачі 2.30

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a , м	6	7	8	9	10	5	4,5	4	7	8
b , м	5	5	6	6	5	3	4	3	4	3
h , м	3,2	3,5	3	2,75	4	2,5	2,4	2,6	3	3,5

Задача 2.31. У повітря виробничого приміщення виділяється мілкодисперсний пил епоксидної смоли у кількості G . Через який час можливий вибух, якщо вільний об'єм приміщення V ? Вихідні данні взяти з табл. 2.24.

Таблиця 2.24 – Вихідні данні для задачі 2.31

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
G , г/год.	120	45	13	400	230	55	270	50	500	730
V , м ³	100	80	50	200	150	70	240	400	1000	1500

Приклад 2.5. Пилинки текстильних матеріалів мають форму ниті. Нижня концентраційна межа поширення полум'я H залежить в основному від типу

матеріалу і довжини пилинок. При збільшенні довжини H спочатку знижується, а потім починає зростати. Визначити нижню концентраційну межу поширення полум'я вовняного пилу наданого у табл. 2.25 дисперсного складу.

Рішення

Для розрахунку можна використовувати емпіричну формулу:

$$H = al^2 - bl + c, \quad (2.1)$$

де l - довжина пилінки, мкм;

a, b, c – емпіричні коефіцієнти, що залежать від виду матеріалу (додаток 16).

Таблиця 2.25 – Вихідні данні для прикладу 2.5

Довжина пилінки, l , мкм	0...50	50...100	100...150	150...200
Вміст, %	25	50	20	5

Знаходимо середню довжину пилинок за фракціями, мкм:

$$\begin{aligned} l_1 &= 0,5(0+50) = 25; \\ l_2 &= 0,5(50+100) = 75; \\ l_3 &= 0,5(100+150) = 125; \\ l_4 &= 0,5(150+200) = 175. \end{aligned}$$

Середня довжина пилинок, мкм:

$$l_c = 0,01(25 \cdot 25 + 50 \cdot 75 + 20 \cdot 125 + 5 \cdot 175) = 77,5$$

З додатку 16 знаходимо коефіцієнти для вовни: $a = 0,0033$; $b = 1,188$; $c = 143,95$.

Підставив коефіцієнти у формулу (2.1), маємо: $H = 71,7 \text{ г/м}^3$.

Такий пил не вибухонебезпечний, але є пожежонебезпечним.

Задача 2.32. Визначити нижню концентраційну межу поширення полум'я наданого у табл.2.26 текстильного пилу.

Таблиця 2.26 – Вихідні данні для задачі 2.32

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Матеріал	вовна	бавовна	лен	віскоза	капрон	вовна	бавовна	лен	віскоза	капрон
Довжина пилінки, l , мкм	100	80	50	120	150	70	40	60	20	200

Задача 2.33. Визначити нижню концентраційну межу поширення полум'я текстильного пилу наданого у табл. 2.27 дисперсного складу.

Задача 2.34. Знайти мінімальну нижню концентраційну межу поширення полум'я наданого у табл. 2.28 текстильного пилу, а також відповідну довжину пилинок.

Таблиця 2.27 – Вихідні данні для задачі 2.33

Варіант	Вміст за фракціями, %, пилинок довжиною l , мкм				Матеріал
	0...40	40...75	75...125	125...200	
1	50	32	10	8	бавовна
2	45	35	11	9	вовна
3	40	40	13	7	віскоза
4	38	41	18	3	капрон
5	33	36	20	11	лен
6	30	35	25	10	бавовна
7	28	37	30	5	вовна
8	25	35	28	12	віскоза
9	20	30	34	16	капрон
10	15	27	38	20	лен

Таблиця 2.28 – Вихідні данні для задачі 2.34

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Матеріал	вовна	бавовна	лен	віскоза	капрон	вовна	бавовна	лен	віскоза	капрон

Задача 2.35. Знайти довжину пилинок текстильного пилу, за якої нижня концентраційна межа поширення полум'я буде відповідати заданої.

Таблиця 2.29 – Вихідні данні для задачі 2.35

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Матеріал	капрон	лен	бавовна	вовна	вовна	віскоза	віскоза	капрон	бавовна	лен
H , г/м ³	100	80	150	120	140	170	240	160	95	78

Задача 2.36. Знайти коефіцієнти у формулі (1.62) для пилу текстильного матеріалу, якщо відомі нижні концентраційні межі поширення полум'я для довжин пилинок: $l_1 = 25$ мкм; $l_2 = 50$ мкм; $l_3 = 100$ мкм.

Таблиця 2.30 – Вихідні данні для задачі 2.36

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H_1 , г/м ³	70	56	90	65	73	88	120	103	74	28
H_2 , г/м ³	65	43	72	50	74	84	87	95	44	14
H_3 , г/м ³	90	49	112	74	140	120	86	106	85	73

2.7 Практичне заняття №7. Самозагорання

Приклад 2.6. Знайти умови теплового самозагорання фрезерного торфу товщиною 0,5 м.

Рішення

З таблиці (1.8) знаходимо відповідні коефіцієнти для торфу: $A = 2,778$; $n = 0,264$; $B = 2,396$; $m = 0,180$.

З рівняння (1.36) розраховуємо критичну температуру:

$$t_o = 10^{A-nlgl};$$

$$t_o = 10^{2,778-0,264lg500} = 117^\circ\text{C}.$$

З формули (1.37) знаходимо час самозагорання (час індукції):

$$\tau = 10^{\frac{B-lgt_o}{m}};$$

$$\tau = 10^{\frac{2,396-lg117}{0,180}} = 66 \text{ год.}$$

Задача 2.37. Знайти умови теплового самозагорання шару наданого у табл. 2.31 матеріалу товщиною l .

Таблиця 2.31 – Вихідні данні для задачі 2.37

Варіант	Матеріал	$l, \text{ м}$
1	Повсть	0,2
2	Дерматин	0,5
3	ДВП	0,8
4	Картон	0,4
5	Торф фрезерний	1,0
6	Бавовна	1,5
7	Сіно	2,5
8	Силос	2,7
9	Торф фрезерний	0,8
10	Сіно	3,0

Задача 2.38. Знайти товщину матеріалу, при якій температура самозагорання буде дорівнювати t_o (див. табл. 2.32). Визначити час самозагорання.

Задача 2.39. Знайти товщину матеріалу, при якій час самозагорання буде дорівнювати τ (див. табл. 2.33). Визначити температуру самозагорання.

Таблиця 2.32 – Вихідні данні для задачі 2.38

Варіант	Матеріал	$t_o, ^\circ\text{C}$
1	Повсть	200
2	Дерматин	150
3	ДВП	180
4	Картон	160
5	Торф фрезерний	140
6	Бавовна	135
7	Сіно	125
8	Силос	100
9	Торф фрезерний	155
10	Сіно	110

Таблиця 2.33 – Вихідні данні для задачі 2.39

Варіант	Матеріал	$\tau, \text{год.}$
1	Повсть	2
2	Дерматин	1,50
3	ДВП	10
4	Картон	16
5	Торф фрезерний	1
6	Бавовна	3
7	Сіно	12
8	Силос	10
9	Торф фрезерний	15
10	Сіно	4

Задача 2.40. Визначити температуру і час самозагорання органічного порошку (сульфазолу), якщо:

- порошок покриває підлогу товщиною 2 см;
- знаходиться у цеберці циліндричної форми діаметром 25 см і висотою 40 см.

Коефіцієнти формул (1.38) і (1.39): $C = 2,059$; $p = 0,125$; $D = 2,134$; $q = -0,048$.

2.8 Практичне заняття №8. Вибух і детонація

Приклад 2.7. Знайти тиск у детонаційній хвилі, якщо початкова густина вибухової речовини $\rho_o = 2500 \text{ кг/м}^3$, швидкість детонації $D = 4,2 \text{ км/с}$, швидкість потоку продуктів реакції u за фронтом хвилі в 3,3 рази менша, ніж швидкість детонації.

Рішення

Швидкість потоку продуктів реакції:

$$u = 4200/3,3 = 1273 \text{ м/с.}$$

З формули (1.55) маємо:

$$p = \rho_o u D;$$

$$p = 2500 \cdot 1273 \cdot 4200 = 1,34 \cdot 10^{10} \text{ Па} = 13,4 \text{ ГПа.}$$

Приклад 2.8. Після вибуху 500 г вибухової речовини на відстані $r_1 = 4$ м була зруйнована цегляна кладка. На якій відстані r_2 вона буде зруйнована, якщо вибухне 1 кг речовини?

Рішення

З формули (1.56) маємо:

$$k = \frac{r_1}{\sqrt[3]{m_1}};$$

$$k = \frac{4}{\sqrt[3]{0,5}} = 5,04.$$

Відстань, що шукаємо:

$$r_2 = 5,04 \sqrt[3]{1} = 5,04 \text{ м.}$$

Задача 2.41. Знайти тиск у детонаційній хвилі, якщо початкова густина вибухової речовини ρ_o (див. табл. 2.34), швидкість детонації D , швидкість потоку продуктів реакції u за фронтом хвилі в n рази менша, ніж швидкість детонації.

Таблиця 2.34 – Вихідні данні для задачі 2.41

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ρ_o , кг/м ³	1700	5600	2900	1650	1,73	1,41	1,20	1030	3740	2800
D , км/с	6,5	4,3	7,2	5,0	2,4	1,4	1,7	5,5	4,4	7,4
n	2	2,1	2,3	2,4	2,7	2,8	3	3,2	3,5	3,9

Задача 2.42. Знайти швидкість детонації вибухової речовини за наведеними даними (швидкість потоку продуктів реакції u (див. табл. 2.34) за фронтом хвилі в n рази менша, ніж швидкість детонації). Необхідні вихідні дані наведено в таблиці 2.35.

Таблиця 2.35 – Вихідні данні для задачі 2.42

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ρ_0 , кг/м ³	1700	5600	2900	1650	1,73	1,41	1,20	1030	3740	2800
p , Гпа	22	23	16	35	0,003	0,0025	0,002	27	30	33
n	2	2,1	2,3	2,4	2,7	2,8	3	3,2	3,5	3,9

Задача 2.43. Після вибуху m_1 (див. табл. 2.36) вибухової речовини на відстані r_1 було зруйноване застакнення. На якій відстані воно буде зруйноване, якщо вибухне m_2 речовини?

Таблиця 2.36 – Вихідні данні для задачі 2.43

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m_1 , кг	1,7	5,6	2,9	1,5	1,7	1,4	1,2	3	3,7	2,8
m_2 , кг	2,2	13	10	3,5	12	15	4	30	20	33
r_1 , м	18	25	30	24	27	28	30	40	35	39

Задача 2.44. Після вибуху m_1 (див. табл. 2.37) вибухової речовини на відстані r_1 був роздрібнений кам'яний куб. Яку масу вибухової речовини треба застосувати, щоб цей ефект виявився на відстані r_2 ?

Таблиця 2.37 – Вихідні данні для задачі 2.44

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m_1 , кг	1,7	5,6	2,9	1,5	1,7	1,4	1,2	3	3,7	2,8
r_1 , м	5	13	10	3,5	12	7	4	8	11	9
r_2 , м	18	25	30	10	25	28	30	40	35	50

Задача 2.45. Знайти максимальний тиск вибуху для заданих у табл. 2.38 газів.

Таблиця 2.38 – Вихідні данні для задачі 2.45

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Газ	ацетилен	метан	етан	пропан	бутан	етилен	пропилен	CO	CH ₂ O	CH ₃ Cl

Задача 2.46. Знайти надлишковий тиск вибуху для газів за варіантами задачі 2.45. Початковий тиск 100 кПа, температура 20°C. Необхідні вихідні дані наведено в таблиці 2.39.

Задача 2.47. Знайти надлишковий тиск вибуху суміші газів (табл. 2.40), якщо початковий тиск 100 кПа, температура 25°C, $m = 10$ кг, $V = 100$ м³.

Таблиця 2.39 – Вихідні данні для задачі 2.46

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m , кг	1	3	4	5	8	10	15	20	25	30
V , м ³	20	40	50	60	100	150	200	400	500	600

Таблиця 2.40 – Вихідні данні для задачі 2.47

Варіант	Суміш
1	50% H ₂ + 50% CO
2	30%CH ₄ + 70%CH ₂ O
3	40%C ₂ H ₆ +60%H ₂ S
4	70%C ₃ H ₆ +20%N ₂ +10%O ₂
5	50% C ₄ H ₁₀ +20%H ₂ +30%N ₂
6	80% C ₂ H ₂ +10%CO+10% H ₂ S
7	50% C ₃ H ₄ +45%H ₂ +5%O ₂
8	45% C ₂ H ₄ + 55% H ₂
9	30% CH ₂ O+60%CO+10%H ₂ S
10	90% CH ₃ Cl+10%CH ₄

ДОДАТКИ

Додаток 1 - Нижча робоча теплота згорання деяких газів і парів

Речовина	$Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \text{МДж/ м}^3$	$Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \text{МДж/ кг}$
Ацетилен	56	47,8
Бутан	118	43,7
Водень	10,8	120,1
Доменний газ	3...4,5	2,37...3,55
Етан	63,75	47
Етилен	59,07	46,8
Коксовий газ	16	29
Метан	35,82	50
Пентан	146,1	45,3
Природний газ	32...36	44,4...50
Пропан	91,1	45,5
Пропилен	86,6	45,2
Оксид вуглецю	12,64	10,11
Сірководень	23,4	14
Формальдегід	25,48	19
Хлорметан	28,6	12,7

Додаток 2 - Температура адіабатичного горіння деяких матеріалів

Паливо	$t_{\text{г}}, ^\circ\text{C}$	Паливо	$t_{\text{г}}, ^\circ\text{C}$
Антрацит	2180	Етан	1955
Ацетилен	2500	Етилен	2284
Бутан	1970	Мазут	2102
Водень	2210	Метан	1950
Вугілля кам'яне	2170	Оксид вуглецю	2380
Гас	2093	Пропан	1980
Деревина	1980		

Додаток 3 - Пожежонебезпечні властивості деяких твердих горючих матеріалів і речовин

Матеріали і речовини	Температура займання, °С	Температура самозаймання, °С	Швидкість вигорання, кг/м²·хв.
Алюміній		640	
Амінопласт	725		
Антрацит	300	500	
Папір	230-240	365	0,5
Вініпласт	580	580	
Гетинакс	285	480	
Дерматин	165	165	
Деревина соснова	255	400	0,9 – 6,7
Калій	-	540	1,4
Каучук	129		0,8
Магній		600 – 650	
Борошно пшеничне	250	440	
Натрій		370	0,9
Нафталін	80	560	
Тирса	214 – 230	306 – 347	
Оргскло	260	460	0,06
Пінопласт ПВХ	426	501	
Полістирол	330	415	0,9
Поліетилен	340 – 365	350 – 420	0,6
Гума	270	400	0,67
Сірка		220	
Титан		320 -590	
Торф, вологість 40%	230	280	0,18
Вугілля марки Г	335 – 455	495 – 575	
Вугілля марки ОС	575	635	
Вугілля марки СС	515	535	
Феросиліцій		860	
Фосфор білий	34	44	
Бавовна	260	372	1,3
Целулоїд	100	150	70
Цинк		500	

Додаток 4 - Температура кипіння і густина деяких рідин

Рідина	$t_{\text{кип}},$ °C	$\rho,$ кг/м ³	Рідина	$t_{\text{кип}},$ °C	$\rho,$ кг/м ³
Ацетон	58,1	791	Метанол	64,9	792
Бензол	80	879	Мурашина кислота	100,7	1220
Бутан	-0,5	600	Нонан	150,8	718
Валеріанова кислота	186	940	Октан	125,7	703
Гексан	68,7	660	Оцтова кислота	118	1049
Гептан	98,4	684	Пентан	36	621
Гліцерин	290	1260	Пропіонова кислота	141	996
Декан	174	730	Сірковуглець	46	1292
Додекан	216	750	Стирол	145	909
Етанол	78,3	790	Толуол	110,6	866
Етиленгліколь	197	1113	Тридекан	235	757
Ефір діетиловий	34,6	714	Ундекан	196	740
Масляна кислота	164	960	Фенол	181,8	1071

Додаток 5 - Коефіцієнти для визначення температури спалаху

Зв'язок	a_i	Зв'язок	a_i	Зв'язок	a_i
C – C	- 2,03	C ≡ N	12,13	Si - H	11,00
C = C	- 0,28	C – S	2,09	Si - Cl	10,07
C ≡ C	1,72	C = S	- 11,91	N - H	5,83
C – H	1,105	C - F	3,33	O - H	23,9
C - O	2,47	C – Cl	15,11	S - H	5,64
C = O	11,66	C – Br	19,40	P - O	3,27
C - N	14,15	C - Si	-4,84	P = O	9,64

Додаток 6 - Коефіцієнти для визначення температури займання рідин

Зв'язок	a_i	Зв'язок	a_i	Зв'язок	a_i
C – C	0,027	C - O	-1,111	N - H	-0,261
C = C	- 8,980	C - N	-5,876	O - H	8,216
C – H	- 2,118	C = O	-0,826	C≡C	-2,069

Додаток 7 - Концентраційні межі поширення полум'я рідин, пари і газів об. %: нижній *H* і верхній *B*

Речовина	<i>H</i>	<i>B</i>	Речовина	<i>H</i>	<i>B</i>
Аміловий спирт	1,19	7,1	Метан	5,3	14,1
Амілацетат	2,2	10	Метанол	6	34,7
Аміак	16	27	Метилацетат	3,6	12,8
Ацетилен	3,5	82	Оксид вуглецю	12,8	75
Ацетон	2,2	13	Октан	0,9	6,2
Бензин	0,79	5,16	Пентан	1,47	7,7
Бензол	1,4	7,1	Природний газ		
Бензиловий спирт	1,0	15,5	Пропан	2,3	9,5
Бензилацетат	0,6	7,3	Пропіловий спирт	2,02	13,55
Бутан	1,6	8,5	Сірководень	4,3	45,5
Бутилацетат	2,27	14,7	Сірковуглець	1	50
Водень	4,15	75	Силан	1	100
Гексан	1,24	7,5	Скипидар	0,8	-
Гептан	1,07	6,7	Толуол	1,3	6,7
Гліцерин	3,3	-	Фенол	1,52	8,76
Діхлоретан	6,2	16	Етилен	3	34
Доменний газ	35	74	Етан	2,9	15
Гас	1,4	7,5	Етанол	3,6	19
Кислота оцтова	3,3	22	Етиленгліколь	4,3	-
Лігроїн	1,4	6	Ефір діетиловий	2,74	44,3

Додаток 8 - Температура самозаймання деяких газів

Газ	Температура самозаймання, °C	Газ	Температура самозаймання °C
Аміак	651	Пропилен	455
Ацетилен	335	Сірководень	510
Бутан	490	Силан	- 140
Водень	530	Формальдегід	430
Доменний газ	500... 600	Фосфін	41
Коксовий газ	640	Хлорметан	625
Метан	550	Хлоретан	510
Оксид вуглецю	610	Етан	530
Пропан	530	Етилен	540

Додаток 9 - Коефіцієнти для розрахунку меж поширення полум'я

Коефіцієнт	Флегматизатор		
	N ₂	H ₂ O	CO ₂
a_j	0,00865	0,00802	0,00736
b_j	1,256	0,78	0,584
c_j	2,800	2,236	2,02
d_C	2,528	1,651	1,292
d_H	0,759	0,527	0,427
d_O	0,197	0,446	0,570
d_N	-0,151	-0,147	-0,133
$d_{C\equiv C}$	1,500	1,500	1,500
e_C	5,946	5,000	4,642
e_H	1,486	1,250	1,160
e_O	-2,973	-2,500	-2,321
e_N	0	0	0
$e_{C\equiv C}$	0	0	0
C_j	0,988	1,247	1,59


Додаток 10 - Стандартна теплота утворення, кДж/моль

Речовина	ΔH_k	Речовина	ΔH_k
CH ₄	-74,85	н-С ₄ H ₁₀	-124,7
CO	-110,5	ізо- С ₄ H ₁₀	-131,6
H ₂	0	н-С ₅ H ₁₂	-146,4
H ₂ S	-20,2	C ₂ H ₄	52,3
NH ₃	-46,1	C ₂ H ₂	226,8
C ₂ H ₆	-84,7	C ₆ H ₆	82,9
C ₃ H ₈	-103,85	SiH ₄	34,7

Додаток 11 - Коефіцієнти флегматизації

Флегматизатор	C_{kf}		
	органічні речовини	H_2	CO
N_2	0,1	0,003	0,02
CO_2	0,19	0,018	0,096
H_2O	0,16	0,003	-

Додаток 12 - Значення коефіцієнтів для розрахунку температури самозаймання

Функціональна група	a	b	Примітка
- O -	16,5	-1	Для аліфатичних ефірів, в яких атом кисню з обох боків приєднаний до атомів вуглецю
- O -	10	-0,5	Для ефірів, в яких атом кисню з одного боку приєднаний до атому вуглецю
- O -	3,5	0	Для інших сполук
- OH	3	-0,5	
- O 	1	0	$r = 1$
- CO -	1,2	-0,4	
- COO -	1	0	$r = 1$
- NH_2	3	-0,2	
- NH -	2,5	0	
- $N<$	2,5	0	$r = 1$

Додаток 13 - Пожежонебезпечні властивості пилу: нижня концентраційна межа поширення полум'я H , температура займання t_3 , самозаймання t_{c3} , тління t_T .

Речовина	Аерозоль		Аерогель		
	H , г/м ³	t_{c3} , °C	t_T , °C	t_3 , °C	t_{c3} , °C
Алюміній	37,5	645	320	-	470
Амінопласт	40	550	264	-	559
Бавовна	44...90	407	205	260	372
Білок соняшника	26,3	-	193	212	458
Борошно	20...63	410	-	-	205
Борошно гороху	25	500	-	-	-
Вугілля	31...400	720	149	159	480
Елеваторний пил	227	400	-	-	-
Какао	45	420	245	-	-
Камфора	10,1	850	-	-	-
Крохмаль картопляний	40,3	430	Не тліє	-	-
Крохмаль кукурудзяний	32,5	410	Не тліє	-	-
Лігнін	30...35	775	-	-	300
Нафталін	2,5	275	Не тліє	-	-
Органічні фарбники	25...70	580	-	240	325
Сланцевий пил	58	830	-	-	225
Сірка	2,3	235	Не тліє	-	-
Скло органічне	12,6	579	Не тліє	-	300
Смола епоксидна	17,2	477	Не тліє	330	486
Смола фенольна	25	460	Не тліє	-	-
Титан	45	330	-	-	-
Тирса	11...70	430	-	-	255
Тютюн	68...101				
Фенопласт	36,8	491	227	-	485
Цинк	270...800				
Цирконій	40	253	-	-	190
Цукор	8,9	360	Не тліє	-	350
Чай	32,8	925	220	-	-

Додаток 14 - Середня об'ємна теплоємність газів при постійному тиску, кДж/м³ К [6]

<i>t</i> , °C	<i>O</i> ₂	<i>N</i> ₂	<i>CO</i>	<i>CO</i> ₂	<i>H</i> ₂ <i>O</i>	<i>SO</i> ₂	<i>Повітря</i>
0	1,3059	1,2946	1,2992	1,5998	1,493	1,733	1,2971
100	1,3176	1,2958	1,3017	1,7003	1,502	1,813	1,3004
200	1,3352	1,2996	1,3071	1,7873	1,5223	1,888	1,3071
300	1,3561	1,3067	1,3167	1,8627	1,5424	1,955	1,3172
400	1,3775	1,3163	1,3289	1,9297	1,5654	2,018	1,3289
500	1,398	1,3276	1,3427	1,9887	1,5897	2,068	1,3427
600	1,4168	1,3402	1,3574	2,0411	1,6148	2,114	1,3565
700	1,4344	1,3536	1,372	2,0884	1,6412	2,152	1,3708
800	1,4499	1,367	1,3862	2,1311	1,668	2,181	1,3842
900	1,4645	1,3796	1,3396	2,1692	1,6957	2,215	1,3976
1000	1,4775	1,3917	1,4126	2,2035	1,7229	2,236	1,4097
1100	1,4892	1,4034	1,4248	2,2349	1,7501	2,261	1,4214
1200	1,5005	1,4143	1,4361	2,2638	1,7769	2,278	1,4327
1300	1,5106	1,4252	1,4465	2,2898	1,8028	-	1,4432
1400	1,5202	1,4348	1,4566	2,3136	1,828	-	1,4528
1500	1,5294	1,444	1,4658	2,3354	1,8527	-	1,462
1600	1,5378	1,4528	1,4746	2,3555	1,8761	-	1,4708
1700	1,5462	1,4612	1,4825	2,3743	1,8996	-	1,4867
1800	1,5541	1,4687	1,4901	2,3915	1,9213	-	1,4867
1900	1,5617	1,4758	1,4972	2,4074	1,9423	-	1,4939
2000	1,5692	1,4825	1,5039	2,4221	1,9628	-	1,501
2100	1,5759	1,4955	1,5102	2,4359	1,9824	-	1,5072
2200	1,5830	1,5018	1,5160	2,4489	2,0009	-	1,5135
2300	1,5897	1,5072	1,5215	2,4602	2,0189	-	1,5194
2400	1,5964	1,5127	1,5269	2,4710	2,0365	-	1,5253
2500	1,6027	1,5177	1,5320	2,4811	2,0528	-	1,5303

Додаток 15 - Пожежонебезпечні властивості деяких рідин

Рідина	Температура спалаху, °С	Температура займання, °С	Температура самозаймання, °С
Амілацетат	25	30	379
Ацетон	- 18	- 13	465
Бензол	- 12	- 8	540
Бензин	- 39... - 27	- 35 ... - 22	255 ... 370
Гліцерин	198		400
Діхлоретан	12	17	525
Ізопентан	- 52	- 48	286
Гас	27...57	32 ... 62	250 ... 290
Кислота мурашина	60		600
Кислота оцтова	40		454
Мазут	60 ... 100		380
Масляна кислота	72	-	440
Мастила мінеральні	65 ... 310		300 ... 360
Метанол	8	12	464
Октан	14		215
Пентан	-34		286
Сірковуглець	- 43	- 40	90
Скипидар	34	39	
Толуол	4	9	536
Уайт-спирит	33		260
Фенол	48	52	595
Етанол	13	18	404
Ефір діетиловий	- 43	- 40	164

Додаток 16 - Коефіцієнти для розрахунку меж поширення полум'я текстильних матеріалів

Матеріал	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Вовна	0,0033	1,188	143,95
Бавовна	0,0006	0,216	63,27
Лен	0,0015	0,39	53,25
Віскоза	0,0034	1,224	152,0
Капрон	0,002	0,52	66,2

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Тарахно О. В.** Теоретичні основи пожежовибухонебезпеки [Текст]: підручник / О.В. Тарахно - Харків : АЦЗУ, 2006. – 395 с. – Бібліогр.: с. 384. – Предм. показ.: с. 387 – 392. - 500 прим.
2. **Тарахно О. В.** Теорія розвитку та припинення горіння [Електронний ресурс]: електронний підручник та методичне забезпечення / О.В. Тарахно, К.В. Жернокльов. - 80 Min / 700 MB. - Харків : УЦЗУ, 2007. - 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. - Сист. вим.: 32 Mb RAM ; Windows 98, 2000, XP.
3. **Корольченко А. Я.** Процессы горения и взрыва [Текст] / А.Я. Корольченко. – М. : Пожнаука, 2007. – 266 с, ил. – Библиогр.: с. 265. – 1000 экз. - ISBN 5-91444-212-9.
4. **Пожарная безопасность. Взрывобезопасность** [Текст]: справ. изд. / А.Н. Баратов, Е.И. Иванов, А.Я. Корольченко и др. - М. : Химия, 1987. – 272с. Библиогр.: с. 261. – Предм. указ.: с. 263 – 270. - 76 000 прим.
5. **Корольченко А. Я., Корольченко Д. А.** Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения [Текст]: справочник в 2-х ч. / А.Я. Корольченко и др. – 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Асс. Пожнаука, 2004. – ч.1 - 713 с.; ч.2 - 774 с. - Библиогр.: с. 744. – ISBN 5-901283-02-3.
6. **Корольченко А. Я.** Пожаровзрывоопасность промышленной пыли [Текст] / А.Я. Корольченко. - М. : Химия, 1986. – 216с., ил. - Библиогр.: с. 208. - 19000 экз.
7. **Расчет основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов** [Текст]: руководство / Ю.Н. Шебеко, В.Ю. Навценя, С.Н. Копылов, В.И. Горшков, И.А. Корольченко и др. - М. : ВНИИПО, 2002. – 77 с. - 1000 экз.
8. **Кусковець С.Л., Шаталов О.С.** Теорія горіння та вибуху. Практикум. [Електронний ресурс]: навчальний посібник – Рівне: НУВГП, 2012. – 213 с.

Методичне видання

В. Г. Рижков

к.т.н., доцент

Ю. В. Куріс

д.т.н., професор

І. О. Кутузова

асистент

ТЕОРІЯ ГОРІННЯ ТА ВИБУХУ

Навчально-методичний посібник

для студентів ЗДІА

напряму підготовки 6.170202 «Охорона праці»

Підписано до друку 17.03.2016р. Формат 60x84 1/32. Папір офсетний.

Умовн. друк. арк. 6,0. Наклад 3 прим.

Внутрішній договір № 18/16

Запорізька державна інженерна академія
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 2958 від 03.09.2007 р.

Віддруковано друкарнею
Запорізької державної інженерної академії
з оригінал-макету авторів

69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226

ЗДІА