



Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Шосткинський інститут

Тимофіїв С. В.

## **ПРИКЛАДНА ФІЗИКА ГОРІННЯ ТА ВИБУХУ**

Конспект лекцій

Суми  
Сумський державний університет  
2021

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Шосткинський інститут

## **ПРИКЛАДНА ФІЗИКА ГОРІННЯ ТА ВИБУХУ**

Конспект лекцій  
для студентів спеціальності  
161 «Хімічні технології та інженерія»  
освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр»  
денної та заочної форм навчання

Затверджено  
на засіданні кафедри хімічної  
технології високомолекулярних  
сполук як конспект лекцій  
із дисципліни «Прикладна фізика  
горіння та вибуху».  
Протокол № 5 від 26.12.2019.



Суми  
Сумський державний університет  
2021

Прикладна фізика горіння та вибуху : конспект лекцій / укладач С. В. Тимофіїв. – Суми : Сумський державний університет, 2021. – 141 с.

Кафедра хімічної технології високомолекулярних сполук  
ШІ СумДУ

## ЗМІСТ

	С.
Передмова .....	7
Вступ .....	8
1 Основні поняття фізики горіння та вибуху.....	9
2 Класифікація горючих речовин і матеріалів.....	12
3 Види палива.....	13
3.1 Загальна характеристика та класифікація палив.....	14
3.2 Склад палива.....	16
3.3 Витрата повітря .....	18
3.3.1 Розрахунок витрати повітря для спалювання твердого та рідкого палива.....	19
3.3.2 Розрахунок витрати повітря для спалювання газоподібного палива.....	21
3.4 Теоретичний об'єм продуктів згоряння твердого та рідкого палива.....	22
3.5 Теоретичний об'єм продуктів згоряння газоподібного палива.....	22
3.6 Об'єм і склад продуктів згоряння палива з надлишком повітря.....	23
3.7 Теплота згоряння палива.....	24
3.8 Температура згоряння палива.....	25
3.9 Порядок роботи з і-t-діаграмами.....	27
3.10 Приклад розрахунку складу продуктів і температури згоряння твердого палива.....	27
3.11 Приклад розрахунку складу продуктів і температури згоряння рідкого палива.....	30
3.12 Приклад розрахунку складу продуктів і температури згоряння газоподібного палива.....	34
4 Особливості вибухових речовин.....	37
4.1 Класифікація вибухових процесів.....	38
4.2 Класифікація ВР.....	39
4.2.1 Ініціювальні ВР.....	40
4.2.2 Бризантні ВР.....	40

4.2.3	Метальні ВР.....	41
4.2.4	Піротехнічні склади.....	41
4.3	Види густини.....	42
4.4	Кисневий баланс.....	43
4.5	Складання рівняння реакції вибухового перетворення.....	44
4.6	Теплота вибуху.....	45
5	Фізика горіння.....	47
5.1	Займання й самозаймання горючої речовини.....	47
5.2	Теорія теплового займання.....	50
5.3	Теорія теплового самозаймання .....	52
5.4	Горіння газів .....	54
5.4.1	Механізм поширення полум'я в газових сумішах .....	57
5.4.2	Область самозаймання .....	59
5.4.3	Період індукції .....	61
5.4.4	Межі поширення полум'я .....	62
5.4.4.1	Чинники, що впливають на концентраційні межі горючості .....	64
5.4.5	Вплив діаметра трубки на швидкість поширення полум'я .....	65
5.4.6	Горіння газу в пальнику .....	67
5.4.6.1	Кінетичне горіння .....	67
5.4.6.2	Дифузійне горіння .....	70
5.5	Горіння рідких палив .....	73
5.5.1	Горіння рідких палив із вільної поверхні .....	73
5.5.2	Горіння краплі рідкого палива .....	76
5.6	Горіння твердого палива .....	78
5.7	Особливості горіння вибухових речовин .....	80
5.7.1	Горіння в замкненому об'ємі без кисню повітря .....	80
5.7.1.1	Горіння летких ВР .....	80
5.7.1.2	Горіння ВР за наявності екзотермічної реакції в конденсованій фазі .....	82
5.7.2	Горіння ВР на повітрі .....	83
5.7.3	Граничні умови горіння конденсованих ВР .....	84
5.7.4	Нестійке горіння ВР .....	85

5.7.5 Газодинамічні умови стійкості горіння .....	86
5.7.6 Нестійке горіння порошкоподібних ВР .....	86
5.7.7 Фізична основа відмінності між ініціювальними, бризантними ВР та порохами .....	87
5.7.8 Прогресивна й дегресивна форма порохів .....	89
6 Фізика вибуху .....	91
6.1 Види вибухів .....	91
6.2 Умови перебігу хімічної реакції у формі вибуху .....	93
6.3 Форми вибухів .....	93
6.4 Ударні хвилі .....	94
6.5 Гідродинамічна теорія ударної хвилі .....	97
6.6 Основні рівняння гідродинамічної теорії ударної хвилі .....	99
6.7 Детонаційні хвилі .....	101
6.8 Детонація газів .....	103
6.9 Вибух пилоповітряної суміші .....	105
6.10 Детонація конденсованих ВР .....	106
7 Руйнівна дія вибуху .....	108
7.1 Основні чинники руйнівної дії ударних хвиль .....	110
7.2 Закон подібності під час вибуху, тротиловий еквівалент .	111
7.3 Відстані, безпечні за дією ударної хвилі .....	115
7.4 Ударні хвилі в ґрунті .....	116
7.5 Ударні хвилі у воді .....	119
7.6 Кумулятивний ефект .....	120
7.7 Робота вибуху .....	122
8 Засоби ініціювання .....	122
8.1 Засоби займання .....	123
8.1.1 Вогнепровідний шнур .....	123
8.1.2 Стопін .....	124
8.1.3 Капсуль-запальники .....	125
8.1.4 Електрозапальник .....	127
8.2 Засоби детонації .....	128
8.2.1 Капсуль-детонатор .....	128
8.2.2 Електродетонатори .....	129
8.2.3 Неелектрична система ініціювання .....	130

8.2.4 Електродетонатор з електронним уповільненням .....	132
8.2.5 Детонувальний шнур .....	133
8.2.6 Детонатор проміжний .....	134
Список літератури .....	136
ДОДАТОК А і-t-Діаграма для газів та їх сумішей при $Q_{н^p} > 12\,500$ кДж/м <sup>3</sup> .....	137
ДОДАТОК Б і-t-Діаграма для газів та їх сумішей при $8\,000 < Q_{н^p} < 12\,500$ кДж/м <sup>3</sup> , а також для мазуту, кам'яного вугілля, антрациту і коксу .....	138
ДОДАТОК В і-t-Діаграма для суміші доменного та коксового газів при $Q_{н^p} \leq 8\,000$ кДж/м <sup>3</sup> , а також для бурого вугілля і торфу .....	139
ДОДАТОК Г Середня теплоємність газів, кДж/(м <sup>3</sup> · К) .....	140

## ПЕРЕДМОВА

Цей конспект лекцій – курс дисципліни «Прикладна фізика горіння та вибуху» для студентів, які навчаються за напрямом 161 «Хімічні технології та інженерія», та спеціалізуються у галузі виробництва полімерних матеріалів, вибухових речовин, порохів і твердих ракетних палив.

У конспекті узагальнений і поданий у формі, доступній для освоєння студентами, матеріал із теорії горіння палив і горіння та вибуху вибухових речовин, методи розрахунків складу продуктів і температури згорання різних видів палива. З урахуванням науково-технічних досягнень подані відомості про сучасні засоби ініціювання. Матеріал викладений із урахуванням того, що студенти попередньо вивчають такі дисципліни, як «Фізика», «Органічна хімія», «Фізична хімія».

Конспект лекцій відповідає робочій програмі, що базується на підставі освітньо-кваліфікаційної характеристики та освітньо-професійної програми підготовки бакалаврів за напрямом 161 «Хімічні технології та інженерія».



## ВСТУП

Процеси горіння та вибуху мають велике значення в життєдіяльності людини. Горіння є першим технічним процесом, освоєним людиною.

Спочатку предки людини зберігали вогонь, що виникав від самозаймання або від блискавки. Далі – відкриття способу видобутку вогню, засноване на терті шматків дерева один про одного, пізніше – висікання іскор із кременю.

У зв'язку з розвитком металургії в XVII столітті виникла необхідність у розробленні теорії горіння.

М. В. Ломоносов уперше довів, що сутність процесу горіння полягає в хімічному поєднанні горючої речовини з повітрям. Французький вчений Лавуазьє в 1773 році довів, що окиснювачем є не все повітря, а лише кисень, що входить до його складу. Так, у другій половині XVIII століття було науково доведено, що горіння – це реакція окиснення. В кінці XIX століття А. Н. Бах розробив теорію автоокиснення й довів, що горіння є окремим випадком загальних процесів окиснення.

Основа теорії теплового прискорення реакції горіння, сформульована в 1884 р. Вант-Гоффом, була розвинена в 1928 р. М. М. Семеновим, за що він у 1956 р. був удостоєний Нобелівської премії. М. М. Семенов є також автором теорії ланцюгових реакцій горіння. Ці теорії дозволяють пояснити механізм переходу керованого процесу горіння в некерований (перехід звичайного горіння у вибуховий), а також кількісно оцінити газові вибухи.

Особливою формою горіння є вибух. Вибух – це процес надзвичайно швидкого перетворення речовини, що супроводжується виділенням великої кількості енергії. Характерною ознакою вибуху є формування ударної хвилі, що поширюється з надзвуковою швидкістю. Руйнування, викликані вибухом, обумовлені саме дією ударної хвилі. Джерелом вибуху може бути не лише хімічне перетворення, а й і будь-який

високоенергетичний процес – високий тиск пари в котлі, блискавка в атмосфері, електричний розряд, атомна реакція.

Процеси горіння та вибуху широко використовуються практично у всіх галузях сучасної техніки й технології. Найбільш важливу роль процеси горіння відіграють у теплоенергетиці. Теплові електростанції використовують енергію горіння вугілля, горючих газів і рідких вуглеводнів. У технології отримання чорних і кольорових металів, скла, кераміки, цементу та інших необхідних матеріалів також використовується енергія горіння для нагрівання й плавлення відповідних компонентів і сировини. Артилерія, стрілецька зброя та інші види озброєнь використовують як джерело енергії вибухові речовини різних класів. Велике народногосподарське значення мають вибухові технології, що застосовуються для видобутку вугілля та інших корисних копалин, під час будівельних робіт. Важливим напрямком у науці про горіння є екологічні аспекти горіння, які отримали великий розвиток останнім часом. До них відносяться технологія спалювання побутових відходів, вивчення механізмів утворення екологічно шкідливих продуктів згоряння. Ці дослідження дозволяють визначити умови, за яких концентрація токсичних речовин у викидах мінімальна.

З іншого боку неконтрольовані процеси горіння та вибуху часто призводять до катастрофічних наслідків. Тому для контролю, оцінювання характеристик і наслідків цих явищ необхідно знати основні закономірності процесів, що проходять під час горіння та вибуху різних речовин.

## **1 Основні поняття фізики горіння та вибуху**

Горіння – це складний фізико-хімічний процес, основою якого є хімічна реакція окиснення, що має швидкий перебіг, яка супроводжується виділенням значної кількості тепла і зазвичай яскравим свіченням (полум'ям). Хімічне перетворення під час горіння тісно пов'язане з низкою фізичних явищ – перенесенням

тепла і мас. Найбільш загальною властивістю горіння є здатність вогнища полум'я, що виникло пересуватися по всій горючій суміші шляхом передачі теплоти або шляхом дифузійного перенесення нагрітих частинок із зони горіння в свіжу суміш.

У процесі горіння беруть участь два основних компоненти – пальне й окиснювач. Причому для виникнення і проходження горіння пальне та окиснювач повинні перебувати в певному кількісному співвідношенні.

Із цієї точки зору речовини можуть горіти як в кисні, так і в інших газових середовищах. Наприклад, деякі метали горять у хлорі, оксиди натрію і барію горять у вуглекислому газі.

Як пальне, здатного взаємодіяти з окиснювачем, можуть бути багато речовин – більшість металів у вільному вигляді, сірка, оксид вуглецю II, водень і велика кількість органічних сполук.

Горіння речовин можливе лише за наявності горючої речовини, кисню повітря (або іншого окиснювача) і досягнення температури, здатної викликати процес горіння. Повітря та горюча речовина складають систему, здатну горіти, а температурні умови зумовлюють можливість самозаймання та горіння системи.

Під час з'єднання горючих речовин із киснем завжди виділяється теплота, але не всі ці реакції перебувають у вигляді горіння. Наприклад, окислення етилового спирту в оцтовий альдегід не можна назвати горінням. У цьому разі швидкість реакції невелика, і кількість виділеної теплоти недостатньо для нагрівання продуктів реакції до світіння. Якщо будь-яким способом збільшити швидкість реакції і, отже, виділення теплоти, то процес окиснення речовин може перейти в горіння. Отже, горіння належить до процесу окиснення і характеризується лише високою швидкістю реакцій і значним тепловим ефектом.

Надалі будемо розрізняти процеси окиснення та горіння за зовнішніми ознаками: окиснення – це процес з'єднання горючої речовини з киснем без виділення світла, тобто без полум'я або

розжарювання речовини, горіння – це процес окиснення з появою полум'я або розжарювання речовини.

Поява полум'я або розжарювання речовини в процесі окиснення завжди є результатом значного теплового ефекту реакції. Випромінювання світла в процесі горіння – це результат переходу хімічної енергії реагуючих речовин в теплову реакцію проміжних і кінцевих продуктів реакції.

Зі складових частин повітря в горінні бере участь лише кисень. Азот і рідкісні гази, що перебувають у повітрі, в цьому процесі не беруть участь. Змінюючи концентрацію кисню в повітрі, можна змінити швидкість горіння речовин. Найбільша швидкість горіння виходить під час горіння речовини в чистому кисні, найменша (припинення горіння) вмістом 14–15 % кисню.

Горіння речовин може відбуватися за рахунок кисню, що входить до складу інших речовин, здатних легко його віддавати. Такі речовини називаються окисниками. Наведемо найбільш відомі окисники:

Бертолетова сіль, хлорат калію ( $\text{KClO}_3$ ).

Калійна селітра, нітрат калію ( $\text{KNO}_3$ ).

Натрієва селітра, нітрат натрію ( $\text{NaNO}_3$ ).

Аміачна селітра, нітрат амонію ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ).

Перманганат калію ( $\text{KMnO}_4$ ).

Перхлорат амонію ( $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ ).

У складі окисників міститься кисень, який може бути виділений методом розкладання солі, наприклад:



Розкладання окисників відбувається під час нагрівання, а деяких із них навіть під впливом сильного удару. Для того щоб речовина горіла завдяки кисню окисника, необхідно як пальне, так і окисник подрібнити і ретельно перемішати для збільшення площі дотику речовин, що реагують. Горіння таких сумішей відбувається з великою швидкістю, так як кисень у момент виділення перебуває в атомарному стані. Приклад таких

сумішей – чорний порох, терміт, піротехнічні суміші, сумішеві тверді ракетні палива.

Для припинення горіння необхідно порушити умови, які його викликають. Так, під час гасіння водою відбувається охолодження речовини, яка горить і зменшення концентрації горючих газів завдяки утворенню водяної пари. Під час гасіння нафти піною припиняється подача теплоти від полум'я до нафти й ускладнюється її надходження в зону горіння.

## **2 Класифікація горючих речовин і матеріалів**

За горючістю (здатністю до горіння) речовини і матеріали поділяються на три групи:

- 1) негорючі – тобто нездатні до горіння в повітрі;
- 2) важкогорючі – здатні загорятися в повітрі від джерела запалювання, але нездатні самостійно горіти після його видалення;
- 3) горючі – здатні самозайматися, а також займатися від джерела запалювання та самостійно горіти після його видалення.

Серед горючих речовин виділяють легкозаймисті – здатні займатися від короткочасної (до 30 с) дії джерела запалювання з низькою енергією (полум'я сірника, тліюча сигарета, іскра).

Горюча речовина та окисник складають горючу систему. Горючі системи, в яких горюча речовина й окисник рівномірно перемішані один з одним (наприклад, суміші горючих газів, парів із повітрям), називаються хімічно однорідними. Горіння таких сумішей називають гомогенним. Горючі системи, в яких горюча речовина й окисник мають поверхню розподілу (тверда речовина, рідина) – хімічно неоднорідні. Горіння на поверхні таких речовин прийнято називати гетерогенним.

У процесі горіння спостерігаються дві стадії: створення молекулярного контакту між пальним та окисником (фізична) і взаємодія молекул з утворенням продуктів реакції (хімічна). Друга стадія настає лише за умови досягнення молекулами

енергетично або хімічно збудженого (активного) стану. Збудження, або активізація молекул під час горіння відбувається завдяки їх нагріванню.

Залежно від природи джерела тепла розрізняють займання (запалювання) і самозаймання горючої речовини. Під час займання частина горючої речовини нагрівається тепловим джерелом, привнесеним ззовні; під час самозаймання підвищення температури відбувається завдяки внутрішній енергії самої речовини.

Горіння будь-якого матеріалу відбувається в газовій або паровій фазі. Рідкі й тверді горючі матеріали під час нагрівання переходять в інший стан – газ або пар, після чого займаються. За сталого горіння зона реакції виконує роль джерела займання для решти горючого матеріалу.

Область газоподібного середовища, в якій інтенсивна хімічна реакція викликає світіння й тепловиділення, називається полум'ям. Полум'я є зовнішнім проявом інтенсивних реакцій окиснення речовини. Під час горіння твердих речовин наявність полум'я не обов'язкова.

Для процесів горіння характерна наявність критичних умов виникнення й поширення полум'я – фіксованих значень тиску, температури, розмірів системи, складу горючої суміші під час досягнення яких відбувається займання суміші, поширення полум'я або його згасання.

### **3 Види палива**

У разі, коли процес горіння використовується для одержання теплової енергії, горюча речовина називається паливом. Паливом називають речовини, що виділяють у результаті тих чи інших перетворень енергію, яка може бути технічно використана. У наш час людство володіє двома типами палива: ядерним і хімічним. Перше виділяє енергію під час ядерного розпаду, друге – в результаті хімічних реакцій окиснення.

До палива ставиться низка вимог:

- запаси палива повинні бути достатні для економічно вигідного його видобутку;
- продукти реакції повинні легко віддалятися з зони реагування;
- продукти реакції повинні бути нешкідливі для довкілля і пристроїв, де відбувається реагування;
- процес реакції повинен бути легко керованим.

Найкращим чином у наш час цим вимогам задовольняє хімічне паливо, в основі якого лежать органічні речовини, що містять атоми С, Н, О та їх з'єднання.

### **3.1 Загальна характеристика та класифікація палив**

Усі палива можна класифікувати за двома основними ознаками – за походженням і за агрегатним станом. За походженням палива можуть бути природними і штучними, а за агрегатним станом – твердими, рідкими й газоподібними. Особливості природного палива пов'язані з його походженням і геологічним віком. Штучні палива отримують або внаслідок перероблення природного палива, або як супутній продукт технологічного процесу.

До природних твердих палив належать деревина, торф, буре вугілля, кам'яне вугілля, антрацити, горючі сланці. Вважається, що всі тверді палива, крім деревини, являють собою різні стадії геологічного старіння первинних вуглеутворювачів рослинного походження від деревних порід до мохів і мулу. Рослинні організми складаються з целюлози, білків, лігнінів, восків і смол. У процесі геологічного старіння целюлоза і білки легко піддаються розкладанню й можуть вилучатися з органічної маси. Лігніни, воски та смоли залишаються в паливі й перетворюються на вугілля. Згодом до органічних залишків додаються неорганічні сполуки, які утворюють золу палива. Перехід від торфу до бурих, кам'яним вугіллям і антрацитів характеризується підвищенням вмісту карбону і зниженням вмісту гідрогену та кисню в паливі. З твердих палив виділяються так звані сапропелеві вугілля, що являють собою

продукт геологічного старіння мулу й планктону. Вони характеризуються зниженим вмістом кисню і підвищеним вмістом гідрогену.

Однією з особливостей твердого палива є виділення газоподібних летких компонентів під час нагрівання. Під час нагрівання твердого палива відбувається розкладання вуглеводнів з утворенням газоподібних продуктів ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  та інших), які одержали назву леткі речовини. Вихід летких речовин із твердого палива відбувається в інтервалі температур 110–1 100 °С. Після виділення летких залишається твердий залишок (кокс), який складається з вуглецю та золи. Найбільшим вмістом летких (до 85 %) володіє деревина. Під час переходу від торфу до антрациту вихід летких зменшується до 8–10 %.

Штучними видами твердого палива є кокс, який отримують методом нагрівання кам'яного коксівного вугілля, без доступу повітря до температури близько 1 000 °С, торф'яні брикети, вугільний пил.

Єдиним природним рідким паливом є нафта, але вона як паливо, що спалюється не застосовується, так як з неї отримують велику кількість інших видів рідкого палива, що є вже штучними – бензин, газ, соляріві масла, мазут та інші.

Процес утворення нафти досі не ясний. Є дві теорії походження нафти – органічна й мінеральна. За органічної теорії нафта утворилася з органічних залишків за герметичності (залишки розкладання целюлози і білків не видаляються), підвищеного тиску й температури. За мінеральної теорії вона утворювалася з різних елементів неорганічного походження, в ході хімічних реакцій, що відбувалися на великих глибинах під час високих температур і тиску.

Природне газоподібне паливо – це сухі природні гази (суто газових родовищ, містять більше 80 %  $\text{CH}_4$  і його гомологи) і жирні гази (попутні гази нафтових родовищ ( $\text{CH}_4 < 60$  %, його гомологи та інші вуглеводні). Попутні гази являють собою цінну хімічну сировину для отримання штучного каучуку, і не



використовуються як паливо. Сухі гази найчастіше використовуються як паливо. До природних належить також сланцевий газ (містить близько 100 % CH<sub>4</sub>).

До штучних видів газоподібного палива належать газові суміші, що одержуються в результаті технологічних процесів. Так, у процесі коксування вугілля попутно одержують коксовий газ, під час виробництва чавуну доменні печі виробляють велику кількість доменного газу, під час газифікації твердого палива одержують генераторний газ.

### 3.2 Склад палива

Будь-яке паливо можна розглядати як речовину, що складається з окремих хімічних елементів. Тому, кажучи про хімічний склад, часто застосовують термін «елементарний склад». Тверді й рідкі палива являють собою складні органічні сполуки. Однак ще Менделєєвим було відзначено, що тверді й рідкі палива складаються з одних і тих самих хімічних елементів, незважаючи на те, що вид їх хімічних сполук різний.

Елементарний хімічний склад палив не розкриває хімічної природи сполук, що входять до них, але він є найбільш важливою технічною характеристикою твердих і рідких палив.

Органічна частина твердих і рідких палив складається з великої кількості складних хімічних сполук, утворених п'ятьма хімічними елементами карбоном (С), воднем (Н), сульфуром (S), киснем (O) і азотом (N). Крім того паливо містить мінеральні домішки (A), які під час спалювання перетворюються на золу і вологу (W). Тому хімічний склад твердих і рідких палив визначається не за кількістю хімічних сполук, а за сумарною масою хімічних елементів у паливі у відсотках або в частках на один кілограм. Загальна маса палива, що включає суху масу і вологу, називається робочою масою

$$\begin{aligned} & C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100 \%, \\ \text{або} & C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 1. \end{aligned}$$

Горючими елементами твердого та рідкого палива є карбон, гідроген і сульфур.

Карбон є основним горючим елементом палива, має високу теплоту згоряння й становить більшу частину горючої маси палива. У паливі карбон перебуває зазвичай у вигляді сполук з іншими елементами, перш за все з гідрогеном. Ці сполуки називаються вуглеводні.

Гідроген – друга за важливістю горюча складова твердого та рідкого палива. За кількістю теплоти, що виділяється під час горіння, в 3,5 рази цінніше карбону, але його вміст у паливі невеликий.

Сульфур має невисоку теплоту згоряння, тому він не має цінності як горючий елемент. Але оскільки під час спалювання палива утворюється діоксид сульфуру ( $\text{SO}_2$ ), сірчистість палива є важливою характеристикою палива. У твердому паливі сульфур наявний у трьох видах: органічний ( $S_{\text{op}}$ ), колчеданний ( $S_{\text{к}}$ ) і сульфатний ( $S_{\text{с}}$ ). Загальний вміст сульфуру в паливі  $S = S_{\text{op}} + S_{\text{к}} + S_{\text{с}}$ . Органічний сульфур входить до складу складних високомолекулярних сполук палива. Колчеданний сульфур являє собою його сполуки з металами, найчастіше з залізом ( $\text{FeS}_2$  – залізний колчедан) і входить до мінеральної частини палива. Органічний і колчеданний сульфур під час горіння палива окиснюються з виділенням тепла й визначають вміст у паливі горючого сульфуру  $S_{\text{г}} = S_{\text{op}} + S_{\text{к}}$ .

Сульфатний сульфур входить у мінеральну частину палива у вигляді сульфатів ( $\text{CaSO}_4$  і  $\text{FeSO}_4$ ) і в процесі горіння в подальшому окислюванню не піддається. Сульфатні сполуки під час горіння переходять у золу. Вміст сульфуру в твердому паливі зазвичай до 0,5 %. Діоксид сульфуру ( $\text{SO}_2$ ) і особливо супутній йому тріоксид сульфуру ( $\text{SO}_3$ ), що утворюються під час горіння палива, викликають корозію металевих частин парогенераторів й отруюють довкілля.

Внаслідок низької теплоти згорання, наявність сульфуру зменшує теплоту згоряння палива. Тому сульфур є небажаною домішкою палива.

Оксиген і нітроген у паливі також є небажаними домішками, так як їх наявність зменшує вміст горючих елементів у паливі. Перебуваючи у вільному стані, кисень підвищує здатність палива до самозаймання. Вміст кисню великий у деревині й торфі. Нітроген під час спалювання палива в атмосфері повітря не окиснюється й переходить у продукти згоряння у вільному вигляді. Однак під час горіння в умовах високих температур, азот може вступати у взаємодію з вільним киснем, утворюючи оксиди нітрогену, що переходять у продукти згоряння і є речовинами, що виявляють шкідливий вплив на довкілля.

Мінеральні домішки також є небажаною складовою палива, що знижує частку горючих його частин.

Волога – небажана складова палива, оскільки не лише знижує вміст горючих компонентів, а й потребує значних витрат теплоти на її випаровування.

Газоподібне паливо являє собою суміш горючих і негорючих газів. Тому склад газоподібного палива прийнято визначати за об'ємним вмістом окремих його компонентів в об'ємних відсотках або частках об'єму:

$$\text{CH}_4 + \sum \text{C}_m\text{H}_n + \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 = 100 \%,$$

або  $\text{CH}_4 + \sum \text{C}_m\text{H}_n + \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 = 1.$

Горючими газами є метан  $\text{CH}_4$ , гомологи метану  $\sum \text{C}_m\text{H}_n$ , оксид карбону (II)  $\text{CO}$ , водень  $\text{H}_2$  і сульфід гідрогену  $\text{H}_2\text{S}$ . Негорючими газами є оксид карбону (IV)  $\text{CO}_2$ , азот  $\text{N}_2$  і кисень  $\text{O}_2$ . Склад газоподібного палива визначається в сухому стані, тому волога  $\text{H}_2\text{O}$  не враховується.

### 3.3 Витрата повітря

У процесі горіння палива відбувається окиснення органічної маси палива киснем повітря й утворення продуктів згоряння. Однією з найважливіших характеристик палива є кількість повітря, необхідного для повного спалювання одиниці палива.

Теоретично необхідним називається кількість повітря, яке потрібно для повного згоряння 1 кг твердого або рідкого палива,

або 1 м<sup>3</sup> газоподібного палива. Водночас вважають, що кисень палива витрачається на окиснення горючих елементів.

### 3.3.1 Розрахунок витрати повітря для спалювання твердого та рідкого палива

Витрату кисню обчислюють із стехіометричних рівнянь реакцій горіння, записаних для одного моля кожного горючого елемента. Повне окиснення горючих компонентів робочої маси твердого палива відбувається за реакціями:

1)  $C + O_2 = CO_2$ ;                      2)  $2H_2 + O_2 = 2H_2O$ ;  
3)  $S + O_2 = SO_2$ ;                      4)  $4 FeS_2 + 11O_2 = 2Fe_2O_3 + 8SO_2$ ,  
або в масових одиницях, враховуючи молекулярні маси компонентів:

1)  $12 + 32 = 44$ ;                      2)  $4 + 32 = 36$ ;  
3)  $32 + 32 = 64$ ;                      4)  $480 + 352 = 320 + 512$ .

На одиницю маси горючого компонента кількість кисню і продуктів реакції виходить:

1)  $1 + 8/3 = 11/3$ ;                      2)  $1 + 8 = 9$ ;  
3)  $1 + 1 = 2$ ;                          4)  $1,875 + 1,375 = 1,25 + 2$ .

Як видно з реакцій, на горіння органічного та колчеданного сульфуру потрібна різна кількість кисню. Але у зв'язку з малим вмістом сульфуру в паливі цією відмінністю нехтують і вважають горіння всього сульфуру як органічного.

Якщо склад робочої маси твердого або рідкого палива заданий у масових частках, зрозуміло, що за реакціями 1, 2 і 3 кількість кисню для спалювання одиниці маси палива можна визначити як

$$L_{O_2} = \frac{8}{3}(C^p) + 8H^p + S^p.$$

За наявності в паливі кисню робиться припущення, що кисень палива пов'язаний із водородом палива за реакцією 2. Тоді кількість вільного водороду палива, який вступає в реакцію з киснем повітря, відповідно зменшується на  $O^p/8$ :

$$L_{O_2} = \frac{8}{3}(C^p) + 8(H^p - O^p/8) + S^p = \frac{8}{3}(C^p) + 8H^p + (S^p - O^p).$$

Масовий вміст кисню в повітрі  $m_{O_2} = 0,232$ , а азоту –  $m_{N_2} = 0,768$ .

Маса повітря, необхідна для повного згоряння одиниці палива,

$$L^0 = \frac{\frac{8}{3}C + 8H + S - O}{0,232} \text{ кг пов./кг пал.}$$

У практичних розрахунках визначають об'ємну кількість повітря. Густина повітря за нормальних умов (температура  $0^\circ\text{C}$ , тиск 1 атмосфера)  $\rho = 1,293 \text{ кг/м}^3$ . Теоретичний об'єм повітря, необхідний для повного згоряння 1 кг твердого або рідкого палива, за умови, що склад палива заданий у масових частках, розраховується за формулою

$$V^0 = L^0/\rho = 8,89C^p + 26,7H^p + 3,3(S^p - O^p) \text{ м}^3\text{пов./кг пал.}$$

Якщо склад палива заданий у масових відсотках, то всі коефіцієнти в цій формулі потрібно поділити на 100:

$$V^0 = 0,0889C^p + 0,267H^p + 0,033(S^p - O^p) \text{ м}^3\text{ пов./кг пал.}$$

Під час виведення цих співвідношень передбачалося, що весь кисень повітря витрачається на окиснення горючих компонентів робочої маси палива. Однак у міру вигорання палива, кількість кисню зменшується, а кількість продуктів згоряння, які утворилися, збільшується. Це ускладнює доступ кисню до горючих компонентів. Може вийти, що на виході з пристрою для спалювання палива не всі горючі компоненти палива вступають у реакцію з киснем повітря. Тому для забезпечення повного згоряння палива доводиться подавати в топковий пристрій більшу кількість повітря.

Відношення дійсної кількості повітря, що подається для спалювання одиниці палива, до теоретично необхідної кількості називають коефіцієнтом надлишку повітря

$$\alpha = V_{\text{п}}/V^0.$$

Коефіцієнт надлишку повітря залежить від виду палива, способу його спалювання. Для газоподібного палива зазвичай  $\alpha = 1,05-1,1$ ; рідкого  $\alpha = 1,1-1,3$ ; твердого  $\alpha = 1,2-1,7$ .

### 3.3.2 Розрахунок витрати повітря для спалювання газоподібного палива

Склад газоподібного палива зазвичай задається в об'ємних відсотках. Запишемо реакції повного окиснення горючих компонентів газоподібного палива:

- 1)  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ ;
- 2)  $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$ ;
- 3)  $2\text{H}_2\text{S} + 3\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{SO}_2$ ;
- 4)  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ;
- 5)  $\text{C}_m\text{H}_n + (m+n/4)\text{O}_2 = m\text{CO}_2 + (n/2)\text{H}_2\text{O}$ , де  $\text{C}_m\text{H}_n$  – вищі гомологи метану.

Оскільки молярні та об'ємні частки газу в суміші однакові, тоді об'єм кисню, необхідний для повного згорання  $1 \text{ м}^3$  газу, можна розрахувати за формулою

$V_{\text{O}_2} = 0,5(\text{H}_2 + \text{CO}) + 2\text{CH}_4 + \sum(m + n/4)\text{C}_m\text{H}_n + 1,5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ,  
де  $\text{O}_2$  – кисень, що міститься в паливі.

В атмосфері повітря міститься 21 % кисню за об'ємом, а азоту 79 %. Переводимо відсотковий вміст кисню в частки і знаходимо кількість повітря, в якому міститься  $1 \text{ м}^3$  кисню:  
 $1/0,21 = 4,76$ .

Тоді теоретичний об'єм повітря, необхідний для згорання  $1 \text{ м}^3$  газоподібного палива, розраховують за формулою

$V^0 = 4,76[0,5(\text{H}_2 + \text{CO}) + 2\text{CH}_4 + \sum(m+n/4)\text{C}_m\text{H}_n + 1,5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2] \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

Однак у цьому рівнянні склад палива прийнятий в об'ємних частках. Якщо склад палива заданий у відсотках за об'ємом – це рівняння необхідно поділити на 100:

$V^0 = 0,0476[0,5(\text{H}_2 + \text{CO}) + 2\text{CH}_4 + \sum(m+n/4)\text{C}_m\text{H}_n + 1,5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2] \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

### 3.4 Теоретичний об'єм продуктів згоряння твердого та рідкого палива

Поряд із розрахунком повітря горіння, в процесі теплового розрахунку топкових пристроїв необхідно визначати і кількість продуктів згоряння, які утворилися.

Теоретичний об'єм продуктів згоряння (при  $\alpha = 1$ )

$$V_{\text{пс}}^0 = V_{RO_2} + V_{H_2O}^0 + V_{N_2}^0,$$

де  $V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2}$  – об'єм трьохатомних газів (не залежить від коефіцієнта надлишку повітря):

$$V_{RO_2} = 0,01868(C^{\text{п}} + 0,375S^{\text{п}}) \text{ м}^3/\text{кг};$$

$V_{H_2O}^0$  – теоретичний об'єм водяної пари:

$$V_{H_2O}^0 = 0,0124(9H^{\text{п}} + W^{\text{п}}) + 0,0161V^0 + 1,24G_{\text{ф}}, \text{ м}^3/\text{кг},$$

де  $0,0124(9H^{\text{п}} + W^{\text{п}})$  – об'єм вологи, що утворюється під час окиснення гідрогену палива і перехід вологи палива в газоподібний стан;  $0,0161V^0$  – об'єм вологи, що міститься в теоретичному об'ємі повітря;  $1,24G_{\text{ф}}$  – об'єм пари, що використовується для розпилення мазуту ( $G_{\text{ф}}$  – питома витрата пари на розпилення мазуту, використовується лише під час спалювання мазуту);

$V_{N_2}^0$  – теоретичний об'єм азоту:

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,008N^{\text{п}}, \text{ м}^3/\text{кг},$$

де  $0,79V^0$  – об'єм азоту, що міститься в теоретичному об'ємі повітря;  $0,008N^{\text{п}}$  – об'єм азоту, що міститься в паливі.

### 3.5 Теоретичний об'єм продуктів згоряння газоподібного палива

Об'єм продуктів згоряння газоподібного палива визначається за реакціями повного згоряння горючих компонентів

Теоретичний об'єм продуктів згоряння (при  $\alpha = 1$ ) складається з:

об'єму триатомних газів

$$V_{RO_2} = 0,01(CO + H_2S + CO_2 + CH_4 + \Sigma mC_mH_n),$$

де  $CO_2$  – негорючий компонент, що міститься в газоподібному паливі,  $\Sigma mC_mH_n$  – вищі гомологи метану;

теоретичного об'єму азоту

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,01N_2;$$

теоретичного об'єму водяної пари

$$V_{H_2O}^0 = 0,01(H_2 + H_2S + 2CH_4 + \Sigma \frac{n}{2} C_mH_n) + 0,00124d + 0,0161V^0,$$

де  $d$  – вологовміст газоподібного палива,  $г/м^3$ ,  $0,0161V^0$  – об'єм води, що міститься в теоретичному об'ємі повітря.

Теоретичний об'єм продуктів згоряння

$$V_{пс}^0 = V_{RO_2} + V_{H_2O}^0 + V_{N_2}^0.$$

### 3.6 Об'єм і склад продуктів згоряння палива з надлишком повітря

Під час спалювання твердого, рідкого та газоподібного палива з надлишком повітря дійсний об'єм продуктів згоряння

$$V_{пс} = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}.$$

Надлишкова кількість повітря призводить до збільшення в продуктах згоряння об'єму водяної пари:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0, м^3/кг,$$

де  $0,0161(\alpha - 1)V^0$  – об'єм води, що міститься в надлишковій кількості повітря;

об'єму азоту

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0,79(\alpha - 1)V^0, м^3/кг,$$

де  $0,79(\alpha - 1)V^0$  – об'єм азоту, що міститься в надлишковій кількості повітря;

крім того, в продуктах згоряння з'являється кисень, що міститься в надлишковій кількості повітря

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)V^0, м^3/кг.$$

Склад продуктів згоряння при  $\alpha > 1$

$$RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_{пс}} \cdot 100 \%; \quad H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{пс}} \cdot 100 \%;$$



$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{\text{пр}}} \cdot 100 \%;$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{\text{пр}}} \cdot 100 \%.$$

### 3.7 Теплота згоряння палива

Теплову цінність палива характеризує його теплота згоряння. Кількість тепла, що виділяється під час повного згоряння одиниці маси даного палива залежить від того, в паровому або рідкому стані перебуває волога в продуктах згоряння. Якщо водяна пара сконденсується і вода в продуктах згоряння буде перебувати в рідкому вигляді, то тепло пароутворення виділиться і тоді кількість тепла, що виділяється під час згоряння одиниці маси палива виходить більше на величину теплоти випаровування вологи палива та вологи, що утворюється під час горіння водню.

Розрізняють вищу і нижчу теплоти згоряння.

Тепловий ефект, який вимірюється за допомогою калориметра, відповідає вищій теплоті згоряння, так як водяна пара, що утворюється під час горіння в бомбі конденсується.

Тепловий ефект, який вимірюється в енергетичних установках відповідає нижчій теплоті згоряння, оскільки температура вихідних газів перевищує 100 °С, тому продукти згоряння залишають пристрій, несучи з собою не сконденсований пар.

Нижчу теплоту згоряння твердого й рідкого палива в робочому стані можна розрахувати за даними елементарного складу за формулою Менделєєва з емпірично підібраними коефіцієнтами:

$$Q_H^p = 339C^p + 1030H^p + 109(S^p - O^p) - 25W^p, \text{ кДж/кг.}$$

Нижча теплота згоряння газоподібного палива в сухому стані розраховується за формулою Менделєєва з емпірично підібраними коефіцієнтами, де склад палива заданий у відсотках за об'ємом:

$$Q_H^c = 108H_2 + 126CO + 359CH_4 + 637C_2H_6 + 913C_3H_8 + \\ + 1186C_4H_{10} + 1460C_5H_{12} + 234H_2S \text{ кДж/м}^3.$$

Для перерахунку нижчої теплоти згоряння газоподібного палива з сухого в робочий стан використовують формулу

$$Q_H^p = Q_H^c \frac{100 - W^p}{100} - 0,0251 W^p, \text{ МДж/м}^3,$$

$$W^p = \frac{0,124d}{1 + 0,00124d}, \%,$$

де  $d$  – вологовміст газоподібного палива, г/м<sup>3</sup>.

### 3.8 Температура згоряння палива

Розрізняють теоретичну та балансову температури горіння. Теоретичну температуру горіння можна розрахувати за формулою

$$t_a = \frac{Q_H^p + i_T + i_B - Q_d}{C_{nc} V_{nc}},$$

де  $Q_H^p$  – нижча теплота згоряння палива в робочому стані;  $i_T$  – ентальпія підігрітого палива;  $i_B$  – ентальпія підігрітого повітря;  $Q_d$  – теплота дисоціації продуктів згоряння;  $C_{nc}$  – теплоємність продуктів згоряння;  $V_{nc}$  – дійсний об'єм продуктів згоряння.

Якщо є хімічний і механічний недопал палива, то можна розрахувати балансову температуру горіння

$$t_b = \frac{Q_H^p + i_T + i_B - Q_3 - Q_4}{C_{nc} V_{nc}},$$

де  $Q_3$  і  $Q_4$  – відповідно теплоти хімічного і механічного недопалу.

Однак розрахунки за цими формулами сильно ускладнені, оскільки теплоємності продуктів згоряння самі залежать від температури. Тому розрахунки температур згоряння проводять із використанням  $i$ -діаграм. Ці діаграми побудовані в координатах температура – загальний тепловміст продуктів згоряння. Загальний тепловміст є добуток питомої теплоємності продуктів згоряння на температуру цих продуктів

$$i_{zar} = C_{nc} t.$$

Тоді в цих формулах можна розділити почленно чисельник на величину об'єму продуктів згоряння. У результаті виходять окремі складові загального тепловмісту продуктів згоряння:

хімічна ентальпія продуктів згоряння, кДж/м<sup>3</sup>:

$$i_x = \frac{Q_H^p}{V_{пс}};$$

ентальпія підігрітого палива, кДж/м<sup>3</sup>

$$i_T = \frac{C_T t_T}{V_{пс}},$$

де  $C_T$  – теплоємність підігрітого палива;  $t_T$  – температура підігрітого палива;

ентальпія підігрітого повітря, кДж/м<sup>3</sup>

$$i_B = \frac{C_B t_B V_B}{V_{пс}},$$

де  $C_B$  – теплоємність підігрітого повітря;  $t_B$  – температура підігрітого повітря;  $V_B$  – дійсний об'єм повітря.

Ентальпія хімічного і механічного недопалу палива має такий вигляд:

$$i_3 = \frac{Q_3}{V_{пс}}; \quad i_4 = \frac{Q_4}{V_{пс}}.$$

Значення  $Q_3$  і  $Q_4$  беруть у частках від  $Q_H^p$  залежно від виду палива та способу його спалювання.

Для визначення теоретичної температури горіння палива загальний тепловміст розраховується за формулою

$$i_{заг} = i_x + i_T + i_B$$

Для визначення балансової температури горіння палива загальний балансовий тепловміст розраховується за формулою

$$i_{заг}^б = i_{заг} - i_3 - i_4.$$

У довідниках наводяться три групи і-t-діаграм, кожна з яких належить до певної групи палив. До першої групи входять газоподібні палива з теплотою згоряння  $Q_H^p > 12\,000$  кДж/м<sup>3</sup>. Друга група палив включає суміші газів з  $Q_H^p = (8\,000 - 12\,000)$  кДж/м<sup>3</sup>, мазут, кам'яне вугілля, антрацит і кокс. У третю групу палив входять суміші газів з  $Q_H^p < 8\,000$  кДж/м<sup>3</sup>, буре вугілля і торф.

Кожна з діаграм являє собою набір суцільних і пунктирних кривих. За суцільними кривими визначають теоретичну температуру горіння, а за пунктирними – балансову температуру горіння. Кожній суцільній і пунктирній кривій на і-t-діаграмі відповідає параметр  $v$ , що встановлює залежність температури горіння від надлишкової кількості повітря в продуктах згорання. Цей параметр розраховують за формулою

$$v = \frac{V_B - V^o}{V_{nc}} \cdot 100 \% .$$

### 3.9 Порядок роботи з і-t-діаграмами

Спочатку розраховують загальний теоретичний і балансовий тепловміст, потім визначають параметр  $v$ . Залежно від виду палива і величини теплоти його згорання вибирають потрібну і-t-діаграму, на осі ординат якої відкладають значення загального тепловмісту і проводять горизонтальну лінію до суцільної кривої, що відповідає розрахованим значенням параметра  $v$ . З точки перетину опускають перпендикуляр на вісь абсцис і знаходять значення теоретичної температури горіння. Те саме проробляють під час визначення балансової температури горіння, з тією лише різницею, що на осі ординат відкладають величину загального балансового тепловмісту, а горизонталь проводять до відповідної пунктирної кривої.

### 3.10 Приклад розрахунку складу продуктів і температури згорання твердого палива

Заданий склад антрациту:  $C^p = 71,7 \%$ ,  $H^p = 1,4 \%$ ,  $S^p = 1,8 \%$ ,  $N^p = 0,8 \%$ ,  $O^p = 1,4 \%$ ,  $A^p = 16,9 \%$ ,  $W^p = 6 \%$ ,  $\alpha = 1,2$ ,  $t_b = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_3 = 2 \%$ ,  $Q_4 = 3 \%$ . Розрахувати склад продуктів згорання, теоретичну і балансову температуру згорання.

Теоретичний об'єм повітря  
 $V^0 = 0,0889C^p + 0,267H^p + 0,033(S^p - O^p) = 0,0889 \cdot 71,7 + 0,267 \cdot 1,4 + 0,033(1,8 - 1,4) = 6,76 \text{ м}^3/\text{кг}.$

Теоретичний об'єм продуктів згоряння:

$$V_{\text{пс}}^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + V_{\text{N}_2}^0;$$

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01868(C^{\text{п}} + 0,375S^{\text{п}}) = 0,01868 \cdot (71,7 + 0,375 \cdot 1,8) = 1,35 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,0124(9\text{H}^{\text{п}} + \text{W}^{\text{п}}) + 0,0161\text{V}^0 = 0,0124(9 \cdot 1,4 + 6) + 0,0161 \cdot 6,76 = 0,34 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79\text{V}^0 + 0,008\text{N}^{\text{п}} = 0,79 \cdot 6,76 + 0,008 \cdot 0,8 = 5,35 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{пс}}^0 = 1,35 + 0,34 + 5,35 = 7,04 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Дійсний об'єм продуктів згоряння:

$$V_{\text{пс}} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161(\alpha - 1)\text{V}^0 = 0,34 + 0,0161 \cdot (1,2 - 1) \cdot 6,76 = 0,36 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2}^0 + 0,79(\alpha - 1)\text{V}^0 = 5,35 + 0,79 \cdot (1,2 - 1) \cdot 6,76 = 6,42 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(\alpha - 1)\text{V}^0 = 0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 6,76 = 0,28 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{пс}} = 1,35 + 0,36 + 6,42 + 0,28 = 8,41 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Склад продуктів згоряння:

$$\text{RO}_2 = \frac{V_{\text{RO}_2}}{V_{\text{пс}}} \cdot 100 = \frac{1,35}{8,41} \cdot 100 = 16 \%;$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{пс}}} \cdot 100 = \frac{0,36}{8,41} \cdot 100 = 4,3 \%;$$

$$\text{O}_2 = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{пс}}} \cdot 100 = \frac{0,28}{8,41} \cdot 100 = 3,3 \%;$$

$$\text{N}_2 = 100 - 16 - 4,3 - 3,3 = 76,4 \%.$$

Нижча теплота згоряння

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 339C^{\text{п}} + 1030\text{H}^{\text{п}} + 109(S^{\text{п}} - \text{O}^{\text{п}}) - 25\text{W}^{\text{п}} = 339 \cdot 71,7 + 1030 \cdot 1,4 + 109 \cdot (1,8 - 1,4) - 25 \cdot 6 = 25641,9 \text{ кДж/кг}.$$

Загальний тепловміст

$$i_{\text{заг}} = i_{\text{х}} + i_{\text{т}} + i_{\text{в}}.$$

Хімічна ентальпія продуктів згоряння

$$i_{\text{х}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{V_{\text{пс}}} = \frac{25641,9}{8,41} = 3049 \text{ кДж/м}^3.$$

Тверде паливо не підігрівають, тому  $i_{\text{т}} = 0$ .

$$\text{Ентальпія підігрітого повітря } i_B = \frac{C_B t_B V_B}{V_{\text{пс}}}.$$

За таблицею додатка Г знаходимо теплоємність повітря за температури 300 °С:

$$C_B = 1,315 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Дійсний об'єм повітря:

$$V_B = \alpha V^0 = 1,2 \cdot 6,72 = 8,11 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$i_B = \frac{1,315 \cdot 300 \cdot 8,11}{8,41} = 380 \text{ кДж}/\text{м}^3;$$

$$i_{\text{заг}} = 3049 + 380 = 3429 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

Розраховуємо параметр  $v$ :

$$v = \frac{V_B - V^0}{V_{\text{пс}}} \cdot 100 = \frac{8,11 - 6,76}{8,41} \cdot 100 = 16 \approx 20 \% - \text{ працюємо з}$$

кривими номер 2 за діаграмою додаток Б (антрацит).

На осі ординат відкладаємо значення загального тепловмісту  $i_{\text{заг}} = 3429 \text{ кДж}/\text{м}^3$  і проводимо горизонтальну лінію до суцільної кривої номер 2 (рис. 1). З точки перетину опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис і знаходимо значення теоретичної температури горіння  $t_a = 1980 \text{ °С}$ .

Визначення балансової температури горіння здійснюється на підставі розрахунку загального балансового тепловмісту за формулою

$$i_{\text{заг}}^6 = i_{\text{заг}} - i_3 - i_4.$$

Розраховуємо ентальпії хімічного і механічного недопалу палива:

$$Q_3 = 0,02 Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 0,02 \cdot 25641,9 = 512 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$i_3 = \frac{Q_3}{V_{\text{пс}}} = \frac{512}{8,41} = 61 \text{ кДж}/\text{м}^3;$$

$$Q_4 = 0,03 Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 0,03 \cdot 25641,9 = 769 \text{ кДж}/\text{кг};$$

$$i_4 = \frac{Q_4}{V_{\text{пс}}} = \frac{769}{8,41} = 91 \text{ кДж}/\text{м}^3;$$

$$i_{\text{общ}}^6 = 3429 - 61 - 91 = 3277 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

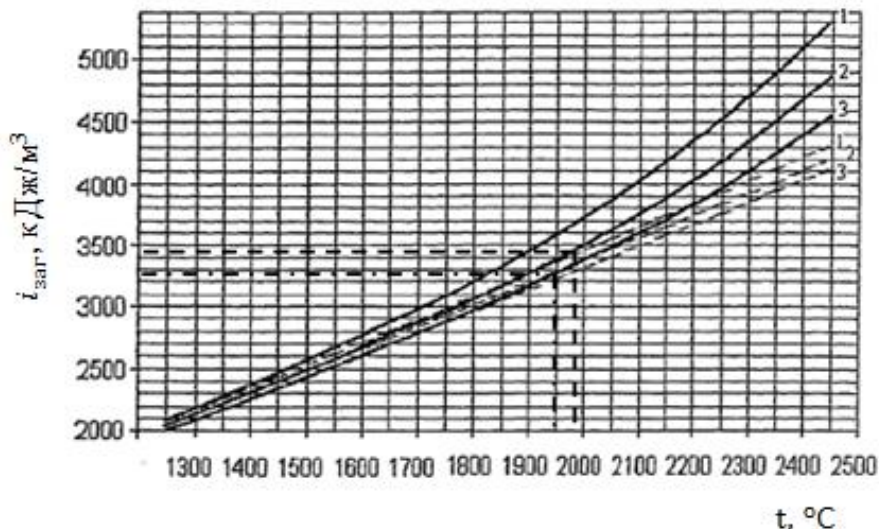


Рисунок 1 – Визначення теоретичної й балансової температур горіння антрациту

На осі ординат відкладаємо значення загального балансового тепловмісту  $i_{\text{заг}}^6 = 3\,277 \text{ кДж/м}^3$  і проводимо горизонтальну лінію до пунктирної кривої номер 2 (рис. 1). З точки перетину опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис і знаходимо значення балансової температури горіння  $t_6 = 1\,950 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3.11 Приклад розрахунку складу продуктів і температури згоряння рідкого палива

Заданий склад мазуту  $C^p = 87 \%$ ,  $H^p = 8,2 \%$ ,  $S^p = 0,8 \%$ ,  $N^p = 0,5 \%$ ,  $O^p = 0,4 \%$ ,  $A^p = 0,3 \%$ ,  $W^p = 2,8 \%$ ,  $\alpha = 1,3$ ,  $t_b = 240 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_r = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_3 = 2,5 \%$ ,  $Q_4 = 1,5 \%$ ,  $G = 0,3 \text{ кг/кг}$ ,  $C_T = 2,2 \text{ кДж/кг} \cdot \text{гр}$ . Розрахувати склад продуктів згоряння, теоретичну і балансову температури згоряння.

Теоретичний об'єм повітря

$$V^0 = 0,0889C^p + 0,267H^p + 0,033(S^p - O^p) = 0,0889 \cdot 87 + 0,267 \cdot 8,2 + 0,033(0,8 - 0,4) = 9,94 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретичний об'єм продуктів згоряння:

$$V_{\text{пс}}^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + V_{\text{N}_2}^0;$$

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01868(C^{\text{п}} + 0,375S^{\text{п}}) = 0,01868 \cdot (87 + 0,375 \cdot 0,8) = 1,63 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,0124(9\text{H}^{\text{п}} + \text{W}^{\text{п}}) + 0,0161V^0 + 1,24G = 0,0124 \cdot (9 \cdot 8,2 + 2,8) + 0,0161 \cdot 9,94 + 1,24 \cdot 0,3 = 1,48 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79V^0 + 0,008\text{N}^{\text{п}} = 0,79 \cdot 9,94 + 0,008 \cdot 0,5 = 7,86 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{пр}}^0 = 1,63 + 1,48 + 7,86 = 10,97 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Дійсний об'єм продуктів згоряння:

$$V_{\text{пс}} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0 = 1,48 + 0,0161 \cdot (1,3 - 1) \cdot 9,94 = 1,53 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2}^0 + 0,79(\alpha - 1)V^0 = 7,86 + 0,79 \cdot (1,3 - 1) \cdot 9,94 = 10,22 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(\alpha - 1)V^0 = 0,21 \cdot (1,3 - 1) \cdot 9,94 = 0,63 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{пс}} = 1,63 + 1,53 + 10,22 + 0,63 = 14,01 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Склад продуктів згоряння:

$$\text{RO}_2 = \frac{V_{\text{RO}_2}}{V_{\text{пр}}} \cdot 100 = \frac{1,63}{14,01} \cdot 100 = 11,6 \%;$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{пр}}} \cdot 100 = \frac{1,53}{14,01} \cdot 100 = 10,9 \%;$$

$$\text{O}_2 = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{пр}}} \cdot 100 = \frac{0,63}{14,01} \cdot 100 = 4,5 \%;$$

$$\text{N}_2 = 100 - 11,6 - 10,9 - 4,5 = 73 \%.$$

Нижча теплота згоряння:

$$Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 339C^{\text{п}} + 1030\text{H}^{\text{п}} + 109(S^{\text{п}} - \text{O}^{\text{п}}) - 25\text{W}^{\text{п}} = 339 \cdot 87 + 1030 \cdot 8,2 + 109 \cdot (0,8 - 0,4) - 25 \cdot 2,8 = 37912,6 \text{ кДж/кг}.$$

Загальний тепловміст:

$$i_{\text{заг}} = i_{\text{х}} + i_{\text{т}} + i_{\text{в}}.$$

Хімічна ентальпія продуктів згоряння:

$$i_{\text{х}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{V_{\text{пс}}} = \frac{37912,6}{14,01} = 2706,1 \text{ кДж/м}^3.$$



Ентальпія підігрітого палива:

$$i_T = \frac{C_T t_T}{V_{\text{пс}}} = \frac{2,2 \cdot 120}{14,01} = 18,8 \text{ кДж/м}^3.$$

Ентальпія підігрітого повітря  $i_B = \frac{C_B t_B V_B}{V_{\text{пс}}}$ . За умови задачі температура підігрітого повітря  $i_B = 240$  °С. За таблицею додатка Г значення теплоємності подані через 100 °С. Тому знаходимо теплоємності повітря при 200 °С і 300 °С:

$$t = 200 \text{ °С}, \quad C_B = 1,306 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)};$$

$$t = 300 \text{ °С}, \quad C_B = 1,315 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Складаємо пропорцію

$$300 - 200 = 100 \text{ °С}; \quad 1,315 - 1,306 = 0,009 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)};$$

$$240 - 200 = 40 \text{ °С};$$

$$100 \text{ °С} - 0,009 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$$

$$40 \text{ °С} - X;$$

$$X = 40 \cdot 0,009/100 = 0,0036.$$

За  $t = 240$  °С,  $C_B = 1,306 + 0,0036 = 1,3096 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$ .

Дійсний об'єм повітря:

$$V_B = \alpha V^0 = 1,3 \cdot 9,94 = 12,9 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$i_B = \frac{1,3096 \cdot 240 \cdot 12,9}{14,01} = 289,4 \text{ кДж/м}^3;$$

$$i_{\text{заг}} = 2706,1 + 18,8 + 289,4 = 3014,3 \text{ кДж/м}^3.$$

Розраховуємо параметр  $v$ :

$$v = \frac{V_B - V^0}{V_{\text{пс}}} \cdot 100 = \frac{12,9 - 9,94}{14,01} \cdot 100 = 21,1 \approx 20 \% - \text{працюємо з}$$

кривими (номер 2 по діаграмі додатка Б (мазут)).

На осі ординат відкладаємо значення загального тепловмісту  $i_{\text{заг}} = 3014,3 \text{ кДж/м}^3$  і проводимо горизонтальну лінію до суцільної кривої номер 2 (рис. 2).

З точки перетину опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис і знаходимо значення теоретичної температури горіння  $t_a = 1790$  °С.

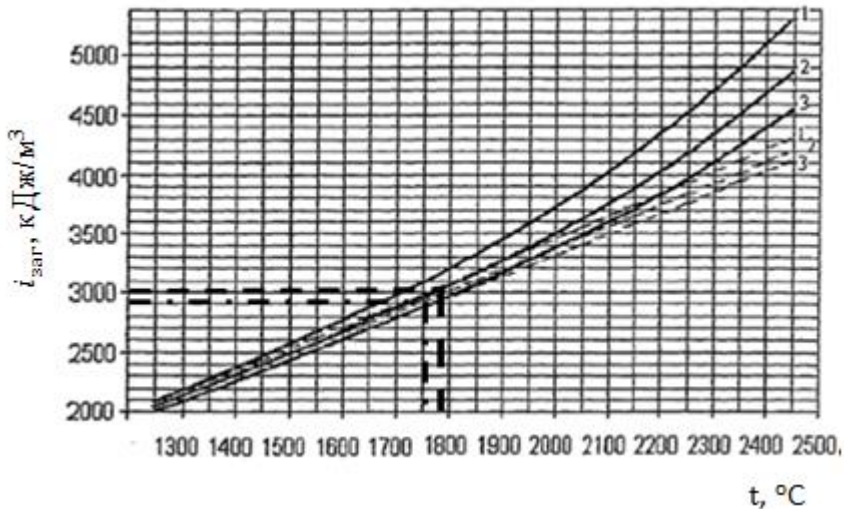


Рисунок 2 – Визначення теоретичної й балансової температур горіння мазуту

Розраховуємо ентальпії хімічного й механічного недопалу палива:

$$Q_3 = 0,025Q_H^p = 0,025 \cdot 37912,6 = 947,8 \text{ кДж/кг};$$

$$i_3 = \frac{Q_3}{V_{\text{пс}}} = \frac{947,8}{14,01} = 67,7 \text{ кДж/м}^3;$$

$$Q_4 = 0,015Q_H^p = 0,015 \cdot 37912,6 = 568,7 \text{ кДж/кг};$$

$$i_4 = \frac{Q_4}{V_{\text{пс}}} = \frac{568,7}{14,01} = 40,6 \text{ кДж/м}^3.$$

Загальний балансовий тепловміст

$$i_{\text{заг}}^6 = 3014,3 - 67,7 - 40,6 = 2906 \text{ кДж/м}^3.$$

На осі ординат відкладаємо значення загального балансового тепловмісту  $i_{\text{заг}}^6 = 2906 \text{ кДж/м}^3$  і проводимо горизонтальну лінію до пунктирної кривої номер 2 (рис. 2). З точки перетину опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис і знаходимо значення балансової температури горіння  $t_b = 1750 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3.12 Приклад розрахунку складу продуктів і температури згоряння газоподібного палива

Заданий склад природного газу  $H_2S = 1 \%$ ,  $CO_2 = 0,2 \%$ ,  $CH_4 = 76,7 \%$ ,  $C_2H_6 = 4,5 \%$ ,  $C_3H_8 = 1,7 \%$ ,  $C_4H_{10} = 0,8 \%$ ,  $C_5H_{12} = 0,6 \%$ ,  $N_2 = 14,5 \%$ , вологовміст  $d = 5 \text{ г/м}^3$ ,  $\alpha = 1,3$ ,  $t_b = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_r = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Q_3 = 2 \%$ . Розрахувати склад продуктів згоряння, теоретичну й балансову температури згоряння.

Теоретичний об'єм повітря:

$$V^0 = 0,0476[0,5(H_2 + CO) + 2CH_4 + \sum(m+n/4)C_mH_n + 1,5H_2S - O_2].$$

Перетворимо це рівняння для умов завдання:

$$V^0 = 0,0476(2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} + 8C_5H_{12} + 1,5H_2S) = 0,0476(2 \cdot 76,7 + 3,5 \cdot 4,5 + 5 \cdot 1,7 + 6,5 \cdot 0,8 + 8 \cdot 0,6 + 1,5 \cdot 1) = 9,0 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Об'єм триатомних газів:

$$V_{RO_2} = 0,01(CO + H_2S + CO_2 + CH_4 + \sum mC_mH_n).$$

Перетворимо це рівняння для умов завдання:

$$V_{RO_2} = 0,01(H_2S + CO_2 + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12}) = 0,01(1 + 0,2 + 76,7 + 2 \cdot 4,5 + 3 \cdot 1,7 + 4 \cdot 0,8 + 5 \cdot 0,6) = 0,98 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретичний об'єм азоту:

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,01N_2 = 0,79 \cdot 9 + 0,01 \cdot 14,5 = 7,26 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретичний об'єм водяної пари:

$$V_{H_2O}^0 = 0,01(H_2 + H_2S + 2CH_4 + \sum \frac{n}{2}C_mH_n) + 0,00124d + 0,0161V^0.$$

Перетворимо це рівняння для умов завдання:

$$V_{H_2O}^0 = 0,01(H_2S + 2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + 6C_5H_{12}) + 0,00124d + 0,0161V^0 = 0,01(1 + 2 \cdot 76,7 + 3 \cdot 4,5 + 4 \cdot 1,7 + 5 \cdot 0,8 + 6 \cdot 0,6) + 0,00124 \cdot 5 + 0,0161 \cdot 9 = 1,97 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Дійсний об'єм продуктів згоряння:

$$V_{\text{пс}} = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2};$$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0 = 1,97 + 0,0161 \cdot (1,3 - 1) \cdot 9 = 2,01 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + 0,79(\alpha - 1)V^0 = 7,26 + 0,79 \cdot (1,3 - 1) \cdot 9 = 9,39 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)V^0 = 0,21 \cdot (1,3 - 1) \cdot 9 = 0,57 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{пс}} = 0,98 + 2,01 + 9,39 + 0,57 = 12,95 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Склад продуктів згоряння:

$$RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_{\text{пс}}} \cdot 100 = \frac{0,98}{12,95} \cdot 100 = 7,6 \%;$$

$$H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_{\text{пс}}} \cdot 100 = \frac{2,01}{12,95} \cdot 100 = 15,5 \%;$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{\text{пс}}} \cdot 100 = \frac{0,57}{12,95} \cdot 100 = 4,4 \%;$$

$$N_2 = 100 - 7,6 - 15,5 - 4,4 = 72,5 \%.$$

Нижча теплота згоряння в сухому стані:

$$Q_H^c = 108H_2 + 126CO + 359CH_4 + 637C_2H_6 + 913C_3H_8 + \\ + 1\ 186C_4H_{10} + 1\ 460C_5H_{12} + 234H_2S.$$

Перетворимо це рівняння для умов завдання:

$$Q_H^c = 359CH_4 + 637C_2H_6 + 913C_3H_8 + 1\ 186C_4H_{10} + 1\ 460C_5H_{12} + \\ + 234H_2S = 359 \cdot 76,7 + 637 \cdot 4,5 + 913 \cdot 1,7 + 1\ 186 \cdot 0,8 + \\ + 1\ 460 \cdot 0,6 + 234 \cdot 1 = 34\ 012,7 \text{ кДж/м}^3 = 34,013 \text{ МДж/м}^3.$$

Перерахуємо нижчу теплоту згоряння з сухого в робочий стан:

$$W^p = \frac{0,124d}{1+0,00124d} = \frac{0,124 \cdot 5}{1+0,00124 \cdot 5} = 0,62 \%;$$

$$Q_H^p = Q_H^c \frac{100 - W^p}{100} - 0,0251W^p = 34,013 \cdot \frac{100 - 0,62}{100} - \\ - 0,0251 \cdot 0,62 = 33,787 \text{ МДж/м}^3 = 33\ 787 \text{ кДж/м}^3.$$

Хімічна ентальпія продуктів згоряння:

$$i_x = \frac{Q_H^p}{V_{\text{пс}}} = \frac{33787}{12,95} = 2\ 609 \text{ кДж/м}^3.$$

Теплоємність підігрітого палива:

$$C_T = 0,01 \sum (C_i X_i) = 0,01(C_i \cdot H_2S + C_i \cdot CO_2 + C_i \cdot CH_4 + C_i \cdot C_2H_6 + \\ + C_i \cdot C_3H_8 + C_i \cdot C_4H_{10} + C_i \cdot C_5H_{12} + C_i \cdot N_2).$$

За умовою завдання температура палива 100 °С. З таблиці середніх теплоємностей газів (додаток Г) беремо теплоємності відповідних газів при 100 °С і підставляємо в цю формулу:

$$C_T = 0,01(1,532 \cdot 1 + 1,7 \cdot 0,2 + 1,641 \cdot 76,7 + 2,495 \cdot 4,5 + 3,51 \cdot 1,7 + 4,705 \cdot 0,8 + 5,835 \cdot 0,6 + 1,298 \cdot 14,5) = 1,71 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Ентальпія підігрітого палива

$$i_T = \frac{C_T t_T}{V_{\text{пс}}} = \frac{1,71 \cdot 100}{12,95} = 13,2 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

За таблицею додатка Г знаходимо теплоємність повітря за температури 800 °С:

$$C_B = 1,382 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Дійсний об'єм повітря:

$$V_B = \alpha V^0 = 1,3 \cdot 9 = 11,7 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Ентальпія підігрітого повітря:

$$i_B = \frac{C_B t_B V_B}{V_{\text{пс}}} = \frac{1,382 \cdot 800 \cdot 11,7}{12,95} = 998,9 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

Загальний тепловміст:

$$i_{\text{заг}} = i_X + i_T + i_B = 2609 + 13,2 + 998,9 = 3\,621,1 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

Розраховуємо параметр  $v$ :

$$v = \frac{V_B - V^0}{V_{\text{пс}}} \cdot 100 = \frac{11,7 - 9}{12,95} \cdot 100 = 20,8 \approx 20 \% - \text{працюємо з}$$

кривими номер 2 на діаграмі додаток А (природний газ із  $Q_{\text{н}}^{\text{п}} > 12\,500 \text{ кДж}/\text{м}^3$ ).

На осі ординат відкладаємо значення загального тепловмісту  $i_{\text{заг}} = 3\,621,1 \text{ кДж}/\text{м}^3$  і проводимо горизонтальну лінію до суцільної кривої номер 2 (рис. 3).

З точки перетину опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис і знаходимо значення теоретичної температури горіння  $t_a = 2\,100 \text{ °С}$ .

Розраховуємо ентальпію хімічного недопалу палива:

$$Q_3 = 0,02 Q_{\text{н}}^{\text{п}} = 0,02 \cdot 33\,787 = 675,7 \text{ кДж}/\text{м}^3;$$

$$i_3 = \frac{Q_3}{V_{\text{пс}}} = \frac{675,7}{12,95} = 52,2 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

Механічного недопалу в газоподібних паливах немає.

Загальний балансовий тепловміст

$$i_{\text{заг}}^{\text{б}} = i_{\text{заг}} - i_3 = 3\,621,1 - 52,2 = 3\,568,9 \text{ кДж}/\text{м}^3.$$

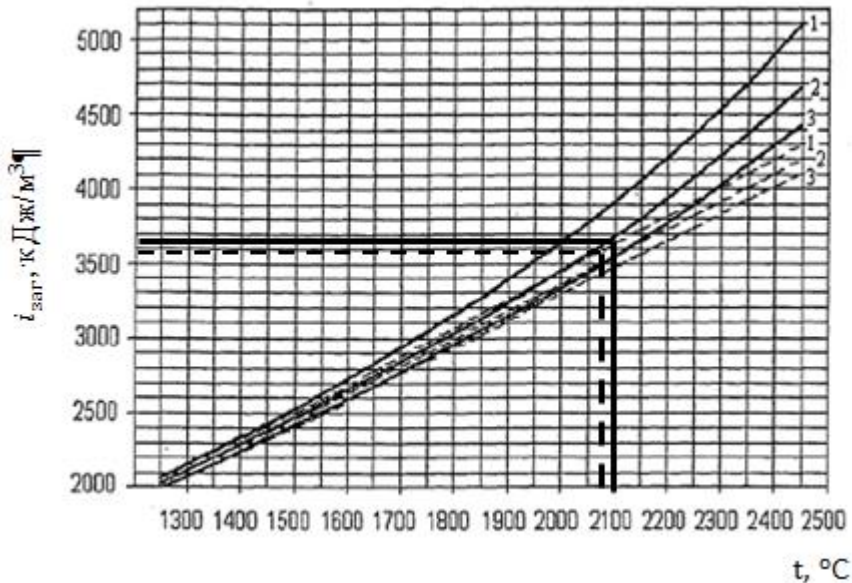


Рисунок 3 – Визначення теоретичної й балансової температур горіння природного газу

На осі ординат відкладаємо значення загального балансового тепловмісту  $i_{\text{заг}}^{\text{б}} = 3\,568,9 \text{ кДж/м}^3$  і проводимо горизонтальну лінію до пунктирної кривої номер 2 (рис. 3). З точки перетину опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис і знаходимо значення балансової температури горіння  $t_{\text{б}} = 2\,080 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 4 Особливості вибухових речовин

Вибуховою речовиною (ВР) може бути будь-яка суміш пального і окиснювача. Найстаріше ВР чорний порох є сумішшю горючих вугілля й сірки та окиснювача калієвої селітри.

Для того щоб із твердих окисника і пального отримати ВР, їх необхідно сильно подрібнити і ретельно змішати. Хімічна реакція спочатку відбувається лише на поверхні частинок і

проходить тим швидше, чим більше ця поверхня. Однак як би сильно не були подрібнені тверді складові частини суміші, неможливо домогтися такої рівномірності складу, за якої поряд із кожною молекулою пального перебувала б молекула окисника. Цей недолік відсутній в індивідуальних вибухових хімічних сполуках, у молекули яких входять і горючі елементи (вуглець і водень) і окисник (кисень). У молекулі ВР атоми кисню повинні бути з'єднані з атомами горючих елементів не прямо, а за посередництвом атомів таких елементів як азот або хлор, які інертні й до кисню й до вуглецю і водню. Зазвичай ВР складають переважно органічні речовини, що містять кілька груп  $\text{NO}_2$ .

Для горіння ВР не потрібен кисень повітря, тому вони можуть горіти в замкненому об'ємі.

#### **4.1 Класифікація вибухових процесів**

Залежно від умов збудження хімічної реакції, характеру ВР та інших чинників, процеси вибухового перетворення можуть поширюватися з різною швидкістю й володіти істотними відмінностями.

За характером і швидкістю поширення усі вибухові процеси поділяються на горіння, вибух і детонацію.

Горіння й детонація – це стаціонарні процеси, перебіг яких відбувається зі сталою швидкістю. З хімічної точки зору горіння й детонація – це однакові процеси окиснення ВР. Відмінність їх полягає в механізмі передачі теплоти від шару до шару ВР.

Під час горіння теплота, що виділяється в зоні реакції, передається відносно повільним шляхом теплопередачі від гарячих продуктів реакції до ближнього шару ВР, викликаючи в ньому в свою чергу інтенсивну хімічну реакцію. Швидкість процесу горіння залежить від зовнішніх умов, і в першу чергу від тиску в навколишньому просторі. Процес горіння ВР відбувається порівняно повільно, зі швидкостями, що не перевищують декількох метрів за 1 секунду.

Зі збільшенням тиску швидкість горіння зростає, а починаючи з деякого його значення, змінюється режим вибухового перетворення – виникає ударна хвиля. Швидкість ударної хвилі продовжує зростати до деякого граничного значення. Отже, горіння може в деяких випадках переходити у вибух (детонацію).

Під час детонації механізм поширення хімічного перетворення по ВР полягає в передачі енергії від шару до шару хвилею стиснення (ударною хвилею). У цьому разі хімічне перетворення поширюється по речовині зі сталою швидкістю, вимірюваною тисячами метрів за 1 секунду.

Вибух – це дуже швидкий фізичний або фізико-хімічний процес, що проходить із значним виділенням енергії в невеликому об'ємі за короткий проміжок часу і призводить до ударних, вібраційних і теплових впливів на довкілля внаслідок високошвидкісного розширення продуктів вибуху. Внаслідок вибухового перетворення в довкіллі виникає ударна хвиля. Вибух – це нестационарний процес, що поширюється зі змінною швидкістю.

## 4.2 Класифікація ВР

Із точки зору використання ВР їх класифікацію проводять за галузями застосування. В основу такої класифікації покладені три ознаки:

- 1) чутливість до зовнішніх впливів, що призводить до появи певної форми вибухового перетворення;
- 2) характерний, тобто відносно легко збуджуваний і стійкий режим вибухового перетворення;
- 3) значно виражений вид дії вибуху.

Відповідно до цих ознак ВР поділяють на чотири групи:

- 1-ша група – ініціювальні, або первинні ВР;
- 2-га група – бризантні, або вторинні ВР;
- 3-тя група – металеві ВР (порохи і тверді ракетні палива);
- 4-та група – піротехнічні склади.



Фізичною основою для поділу ВР на чотири групи є характеристика стійкості горіння та здатності переходу горіння в детонацію.

#### **4.2.1 Ініціювальні ВР**

Відмітною особливістю ініціювальних ВР (ІВР) є їх висока чутливість до простих зовнішніх впливів – полум'я, удару, наколювання, тертя. Характерним видом вибухового перетворення для індивідуальних ІВР є детонація. Їх горіння є нестійким навіть за атмосферного тиску і дуже легко й швидко переходить у детонацію. ІВР часто називають первинними, тому що вони служать для збудження детонації бризантних ВР.

ІВР застосовують для виготовлення двох типів засобів ініціювання: засобів збудження детонації та засобів збудження горіння. У засобах детонування використовують індивідуальні ІВР, а в засобах займання ІВР входять як компонент запалювальних складів, швидкість горіння яких уповільнюють і регулюють спеціальними добавками. Призначення запалювальних складів – одержання під час їх горіння променя полум'я, що служить для займання порохових зарядів, сповільнювачів у підричниках та інших.

#### **4.2.2 Бризантні ВР**

Відмітною особливістю типових бризантних ВР (БВР) є їх порівняно низька чутливість до збудження детонації за таких зовнішніх впливів, як слабкий удар, наколювання, тертя, іскра та промінь полум'я, але в той самий час висока здатність детонувати під дією вибуху детонатора, що містить невелику масу ІВР.

Характерним видом вибухового перетворення бризантних ВР (БВР) є детонація. Вони здатні також і горіти, але за деяких умов горіння може стати нестійким і перейти в детонацію. Для збудження детонації БВР застосовують ІВР, тому БВР ще

називають вторинними ВР. БВР застосовують в основному для спорядження боєприпасів і для промислових вибухових робіт.

### **4.2.3 Метальні ВР**

Для металевих ВР характерним видом вибухового перетворення є горіння, що не переходить у детонацію навіть за високого тиску, що розвивається в умовах пострілу. Ці речовини придатні для надання кулі або снаряду руху в каналі ствола зброї, а також руху ракетним снарядам. Для збудження горіння металевих ВР необхідна дія полум'я.

### **4.2.4 Піротехнічні склади**

До піротехнічних складів належать суміші, які під час горіння дають світлові, теплові, димові, реактивні й звукові ефекти. Ці речовини, по суті, не є вибуховими. Однак більшість піротехнічних складів можуть зазнавати вибухових перетворень, а деякі навіть детонувати із сильним бризантним ефектом, тому їх і відносять до ВР.

Піротехнічні склади складаються з окисників, горючих речовин і містять домішки, що повідомляють складам додаткові спеціальні властивості: забарвлюють полум'я, що утворюють кольоровий дим, зменшують чутливість складу (флегматизатори), збільшують чутливість (сенсibiliзатори), збільшують механічну міцність (зв'язувальні).

Як окисники застосовують нітрати, хлорати, перхлорати, оксиди і пероксиди металів. За горюче беруть як неорганічні, так і органічні речовини.

Із неорганічних горючих найчастіше застосовують алюміній, магній, кремній, а також деякі сплави.

Із органічних горючих застосовують дизельне паливо, мазут, скипидар, крохмаль, цукор, смоли.

Горючі обирають з урахуванням задачі одержання найбільшого спеціального ефекту, необхідного від даного

піротехнічного складу. Наприклад, у запалювальних, освітлювальних, трасуючих складах найкращий ефект досягається за високої температури горіння. Тому в них застосовують пальне з великою теплотою згорання (алюміній, магній). Навпаки в димових складах не потрібна висока температура. У них застосовуються горючі з малою теплотою згорання (вуглеводні, деревне вугілля). Під час горіння сповільнювальних складів у капсуль-детонаторах не повинно утворюватися багато газоподібних продуктів, так як вони повинні горіти строго з постійною швидкістю в замкненому просторі. У них як горюче часто використовують кремній і його сплави.

У піротехнічних складах застосовують, зазвичай, компоненти в тонко подрібненому вигляді. Однак у такому вигляді піротехнічний склад має погану сипучість. Тому склади гранулюють із додаванням у невеликих кількостях зв'язувальних. Отже, отримують міцні гранули, які у виробках ущільнюють пресуванням.

Однією з найважливіших характеристик піротехнічного складу є його густина, так як від неї залежить швидкість горіння.

### 4.3 Види густини

Необхідно розрізнати істинну, гадану, дійсну й гравіметричну густину.

Істинна густина або густина монокристала – це маса одиниці об'єму щільної без пір речовини (індивідуальні речовини).

Гадана густина – це маса гранули віднесена до її об'єму.

Гравіметрична або насипна густина – це відношення ваги складу до займаного ним об'єму за умови вільного насипання. Гравіметрична густина залежить від істинної густини компонентів та об'єму гранул.

Дійсна густина це відношення ваги складу до об'єму. Вона залежить від дійсної густини компонентів і ступеня запресовування.

#### 4.4 Кисневий баланс

Вибуховим речовинам для горіння або вибуху не потрібний кисень повітря, реакція вибухового перетворення здійснюється за рахунок кисню, що міститься в самій молекулі ВР або в твердому окиснику.

Під час вибухового перетворення в продуктах вибуху можуть міститися газоподібні та тверді речовини  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$  та інші. На склад продуктів вибуху ВР сильно впливає відносний вміст у ньому кисню. Для оцінювання цього змісту служить кисневий баланс.

Кисневий баланс характеризує співвідношення між вмістом у ВР горючих елементів і кисню. Обчислюють кисневий баланс як різницю між ваговою кількістю кисню, що міститься у ВР, і кількістю кисню, необхідного для повного окиснення горючих елементів, що входять до його складу. Горючими елементами органічних ВР є вуглець і водень, які окиснюються відповідно до  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ . Розрахунок проводять на 100 г ВР, відповідно до цього кисневий баланс виражається у відсотках. Якщо ВР містить саме стільки кисню, скільки потрібно для повного окиснення горючих елементів, що входять до його складу, то кисневий баланс дорівнює нулю. У тому разі, коли кисень міститься в надлишку, кисневий баланс позитивний, а за нестачі кисню – негативний.

Як приклад розрахуємо кисневий баланс бітетрилу  $\text{C}_{14}\text{H}_8\text{O}_{16}\text{N}_{10}$ . Обчислюємо молекулярну масу ВР:  
 $M = 14 \cdot 12 + 8 \cdot 1 + 16 \cdot 16 + 10 \cdot 14 = 572$  г.

Маємо кисню  $16 \cdot 16 = 256$  г.

На 100 г ВР маємо кисню  $\frac{256}{572} \cdot 100 = 44,7$  %.

Потрібно кисню для повного окиснення горючих елементів: у молекулі бітетрилу міститься 14 грам-атомів вуглецю та 8 грам-атомів водню. Записуємо реакції повного окиснення вуглецю та водню:



Для повного їх окиснення потрібно  $28 + 4 = 32$  грам-атомів кисню, або  $32 \cdot 16 = 512$  г кисню. На 100 г ВР потрібно кисню  $\frac{512}{572} 100 = 89,5 \%$ .

Кисневий баланс:  $44,7 - 89,5 = -44,8 \%$ .

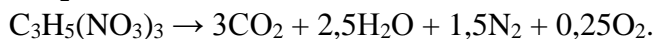
#### 4.5 Складання рівняння реакції вибухового перетворення

Під час складання рівняння реакції вибухового перетворення всі ВР прийнято поділяти на дві групи:

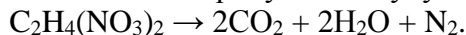
- 1-ша група – ВР із позитивним і нульовим кисневим балансом;
- 2-га група – ВР із негативним кисневим балансом.

Під час вибухового перетворення ВР із позитивним кисневим балансом користуються правилом: увесь вуглець окиснюється до  $\text{CO}_2$ , а водень – до  $\text{H}_2\text{O}$ , азот і надлишок кисню виділяються в елементарному вигляді. Для ВР із нульовим кисневим балансом вільний кисень у продуктах відсутній.

Наприклад, нітрогліцерин має позитивний кисневий баланс. Серед продуктів його вибухового перетворення будуть  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  та  $\text{O}_2$



Нітроетіленгліколь має нульовий кисневий баланс, отже вільного кисню в складі його продуктів вибуху не буде:



Під час вибуху ВР із негативним кисневим балансом серед продуктів вибуху можуть бути також продукти неповного згоряння  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}$ . Найбільш надійним у цьому разі є експериментальний метод визначення продуктів вибуху. А вже,

виходячи з експериментальних даних, складають рівняння вибухового перетворення.

#### 4.6 Теплота вибуху

Теплотою вибуху називають кількість теплової енергії, виділеної під час вибухового перетворення одного моля (молярна теплота вибуху) або одного кілограма ВР (питома теплота вибуху).

Теплоту вибухового перетворення розраховують на основі закону Гесса. Початковими даними є теплота утворення ВР і рівняння вибухового перетворення ВР. Введемо позначення:

стан 1 – елементи, складові ВР, у стандартних умовах;

стан 2 – ВР у стандартних умовах;

стан 3 – продукти вибуху у стандартних умовах.

Стандартними умовами є тиск 1 атмосфера і температура 18 °С. Теплота утворення елементів у стандартних умовах береться такою, що дорівнює нулю.

Звідси  $Q_{1-2}$  – теплота утворення ВР з елементів;  $Q_{2-3}$  – теплота вибухового перетворення;  $Q_{1-3}$  – теплота утворення продуктів вибуху з елементів. Тоді за законом Гесса:

$$Q_{1-2} + Q_{2-3} = Q_{1-3},$$

або  $Q_{2-3} = Q_{1-3} - Q_{1-2}$ .

$Q_{2-3}$  – це теплота вибуху за сталого тиску  $Q_p$ , тобто за такого об'єму газоподібних продуктів вибуху, який вони займають у стандартних умовах. Під час детонації реакція вибухового перетворення встигає завершитися до того, як її продукти істотно розширяться. В цьому разі вважають, що реакція відбувається без зміни об'єму, тобто продукти вибуху після закінчення реакції займають той об'єм, який мала конденсована ВР. Тому теплоту вибуху обчислюють за сталого об'єму  $Q_v$ . Теплота вибуху за сталого тиску менше теплоти вибуху за сталого об'єму, так як під час перебігу реакції за сталого об'єму не витрачається частина енергії на роботу розширення газів від об'єму ВР до об'єму газів за атмосферного тиску, тобто до

22,4 літра на кожен моль газу. Щоб перейти від теплоти вибуху за сталого тиску до теплоти вибуху за сталого об'єму, необхідно додати до  $Q_p$  величину  $0,58N$ :

$$Q_v = Q_p + 0,58N, \text{ ккал/моль,}$$

де  $N$  – кількість молів газоподібних продуктів вибуху, а множник  $0,58$  являє собою виражену в ккал роботу розширення за сталого тиску, що дорівнює  $1$  атм одного моля газів від початкового об'єму, прийнятого таким, що дорівнює нулю, до  $22,4$  л. Одержана теплота вибуху відноситься до  $1$  молю ВР.

Теплота вибуху  $1$  кг ВР, тобто питома теплота вибуху за сталого об'єму, розраховується за формулою:

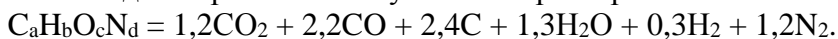
$$Q_v' = 1\,000 Q_v/M, \text{ ккал/кг,}$$

де  $M$  – молекулярна маса ВР.

#### Приклад розв'язання задачі

Склад продуктів вибухового перетворення ВР визначений експериментально:  $CO_2 = 1,2$ ;  $CO = 2,2$ ;  $C = 2,4$ ;  $H_2O = 1,3$ ;  $H_2 = 0,3$ ;  $N_2 = 1,2$  у моль ПВ/моль ВР. Теплота утворення ВР  $15$  ккал/моль. Розрахувати молярну й питому теплоту вибуху.

Складаємо рівняння вибухового перетворення:



Складаємо баланс вуглецю, водню, кисню та азоту:

$$a = 1,2 + 2,2 + 2,4 = 5,8;$$

$$b = 2 \cdot 1,3 + 2 \cdot 0,3 = 3,2;$$

$$c = 2 \cdot 1,2 + 2,2 + 1,3 = 5,9;$$

$$d = 2 \cdot 1,2 = 2,4.$$

Остаточне рівняння вибухового перетворення  $1$  моля ВР:



За довідковими даними [1] знаходимо теплоту утворення продуктів вибуху  $Q(CO) = 26,88$  ккал/моль,  $Q(CO_2) = 94,51$  ккал/моль,  $Q(H_2O_{(г)}) = 57,78$  ккал/моль. Теплота утворення окремих елементів у стандартних умовах береться такою, що дорівнює нулю, тому теплота утворення кисню,

вуглецю й азоту дорівнює нулю. Розраховуємо теплоту утворення продуктів вибуху з елементів:

$$Q_{1-3} = 2,2 \cdot 26,88 + 1,2 \cdot 94,51 + 1,3 \cdot 57,78 = 247,66 \text{ ккал/моль.}$$

Теплота утворення цієї ВР  $Q_{1-2} = 15$  ккал/моль. Теплота вибуху за сталого тиску:

$$Q_p = Q_{2-3} = 247,66 - 15 = 232,66 \text{ ккал/моль.}$$

Молярна теплота вибуху за сталого об'єму:

$$Q_v = 232,66 + 0,58(1,2 + 2,2 + 1,3 + 0,3 + 1,2) = 236,26 \text{ ккал/моль.}$$

Молекулярна маса цієї ВР:

$$M = 5,8 \cdot 12 + 3,2 \cdot 1 + 5,9 \cdot 16 + 2,4 \cdot 14 = 200,8 \text{ г/моль.}$$

Питома теплота вибуху:

$$Q_v' = 1000 \cdot 236,26/200,8 = 1176,6 \text{ ккал/кг.}$$

## 5 Фізика горіння

### 5.1 Займання та самозаймання горючої речовини

Займанням горючої речовини називається виникнення горіння під впливом зовнішнього джерела запалювання. Під джерелом запалювання розуміємо палаючий предмет або об'єкт, а також електричний розряд із запасом енергії і температурою, достатніми для виникнення горіння інших речовин.

Самозаймання – це процес виникнення горіння за відсутності джерела запалювання. Самозаймання спостерігається під час різкого збільшення швидкості екзотермічних реакцій в об'ємі речовини, коли швидкість виділення тепла перевищує швидкість його розсіювання. Самозаймання речовини спочатку відбувається в зоні максимальних температур або «гарячої» точки, потім горіння поширюється по всьому об'єму.

Процеси займання та самозаймання горючої речовини характеризуються відповідними температурами.

Температура займання – найменша температура горючої речовини, під час якої від стороннього джерела запалювання виникає стійке полум'яне горіння.



Температура самозаймання – найнижча температура горючої речовини, під час якої відбувається різке збільшення швидкості екзотермічних реакцій, що закінчується самовільним виникненням полум'яного горіння.

Необхідно також зазначити температуру спалаху – найменшу температуру речовини і матеріалу, за якої над її поверхнею утворюються пари (гази), здатні спалахувати в повітрі від зовнішнього джерела запалювання, водночас після згоряння частини або всього об'єму парогазоповітряної суміші горіння припиняється.

Знання зазначених температур важливо під час оцінювання в реальних умовах ступеня пожежної небезпеки теплового режиму оброблення різних матеріалів, умов зберігання, експлуатації. Водночас більш детально необхідно зупинитися на процесах самозаймання, так як вони можуть призвести до несподіваного спалаху горючих матеріалів і, як наслідок, до виникнення пожежі.

Розрізняють теплове, мікробіологічне та хімічне самозаймання залежно від причини виділення тепла в початковій фазі самонагрівання речовин і матеріалів.

Тепловим називається самозаймання, викликане тепловим самонагріванням, що виникло під впливом зовнішнього нагрівання речовини.

Серед горючих речовин і матеріалів, схильних до теплового самозаймання, виділяють групу речовин, що мають температуру самозаймання нижче 50 °С. Такі речовини називають пірофорними. Вони становлять велику пожежну небезпеку. Наприклад, алюмінієва пудра під час контакту з повітрям здатна окислюватися і при цьому самонагріватися до виникнення горіння за температури довкілля більше ніж 10 °С. Здатний до самозаймання скипидар, розподілений тонким шаром по поверхні волокнистих матеріалів. До пірофорних (в особливому стані) можна віднести відпрацьовані мінеральні олії (машинне, солярове, трансформаторне), рослинні олії (льняне,

соняшникове, конопляне, бавовняне та інші), в окремих випадках і жири, кам'яне вугілля і деякі хімічні речовини.

Необхідно зазначити, що мінеральні олії окиснюються в повітрі лише за високих температур. Відпрацьовані ж мінеральні масла здатні до самозаймання. Самозаймання олій часто є причиною пожеж. Вони можуть самозайматися за великої поверхні окиснення.

Олії, оліфи і жири, що зберігаються в ємностях, самозайматися не можуть, так як поверхня дотику їх з повітрям мала. Поверхня окиснення збільшується під час змочування олією, оліфою або жиром волокнистих і пористих речовин – вати, обтиральних кінців, ганчірок, паклі, стружок, тирси. Необхідно також, щоб поверхня окиснення значно перевищувала поверхню тепловіддачі. Такі умови створюються в разі, коли промаслені матеріали складені, наприклад, в купи.

Співвідношення матеріалів під час самозаймання визначається як властивостями просоченого матеріалу, так і властивостями олії, жиру. Так самозаймання бавовняної вати, просоченої оліфою, найбільш ймовірно під час співвідношення за масою 1 : 2. Найбільш низька температура, за якої зазначалося самозаймання промаслених матеріалів, становила 10–15 °С.

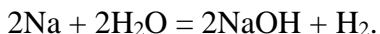
До самозаймання здатні також кам'яне та буре вугілля, складені і що зберігаються в купах і штабелях. Основними причинами самозаймання є здатність вугілля окиснюватися і адсорбувати пари і гази за низьких температур. Незважаючи на те, що процес окиснення йде повільно і тепла виділяється мало, у великих скупченнях вугілля, де тепловіддача в доквілля ускладнена, самозаймання все ж з часом відбувається. Для запобігання самозаймання вугілля рекомендується обмеження висоти штабелів і ущільнення вугілля в штабелях.

Мікробіологічним називається самозаймання в результаті самонагрівання, яке виникло в результаті життєдіяльності мікроорганізмів у об'ємі речовини. Здатність до самозаймання мають фрезерний торф, рослинні матеріали – сіно, листя,

бавовна та інші. Особливо схильні до самозаймання недосушені матеріали. Волога і тепло сприяють розмноженню мікроорганізмів. Відзначалися також випадки самозаймання тирси у великих купах.

Хімічним називається самозаймання, що виникає внаслідок хімічної взаємодії речовин. Наприклад, ціла група речовин самозаймається під час контакту з водою. До цієї групи відносять калій, натрій, рубідій, цезій, карбід кальцію і карбіди лужних металів, негашене вапно, гідросульфід натрію та інші.

Взаємодія лужних металів з водою супроводжується виділенням водню та великої кількості тепла



Водень, що виділяється, самозаймається і горить спільно з металом. Так само поводяться гідриди лужних і лужноземельних металів  $\text{KH}$ ,  $\text{NaN}$ ,  $\text{CaH}_2$ .

## 5.2 Теорія теплового займання

Теплове прискорення реакції аж до виникнення займання відбувається внаслідок підвищення температури реагуючої речовини за рахунок теплоти самої реакції, якщо ця реакція екзотермічна.

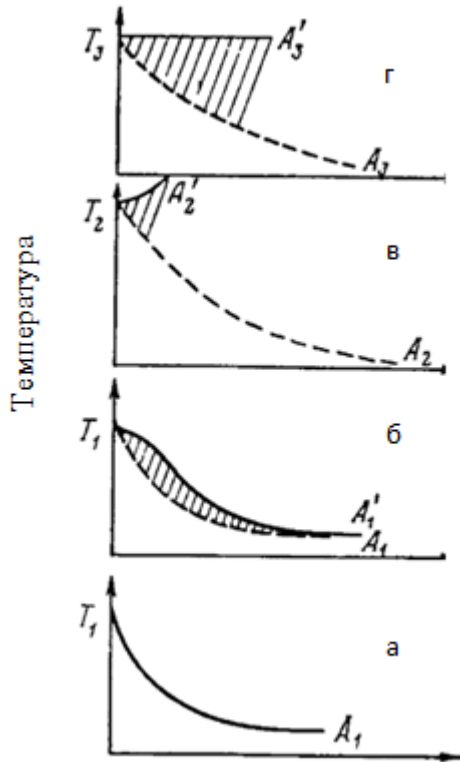
Якісна теорія теплового прискорення реакції та виникнення займання сформульована Вант-Гоффа.

Якщо в деякій точці інертної речовини викликати місцеве розігрівання, то тепло буде поширюватися від шару до шару, причому в кожному наступному шарі максимальна температура буде нижче, ніж в попередньому (рис. 3 а).

Якщо помірний розігрів викликали в речовині, здатній до екзотермічної реакції, то також буде спостерігатися падіння температури, але більш повільне, так як тепловтрати кожного шару деякою мірою будуть компенсуватися виділенням тепла внаслідок реакції (рис. 3 б).

За сильного розігрівання цієї речовини швидкість реакції може стати настільки великою, що за рахунок виділення тепла

реакції, температура від шару до шару буде не падати, а зростати і станеться займання (рис. 3 в).



Відстань від точки розігрівання

Рисунок 3 – Схема теплового займання за Вант-Гоффом

Мінімальна температура  $T_3$  (рис. 3 г), починаючи з якої це відбувається, є межею, що відокремлює область займання від області повільної загасаючої реакції. Це і є температура займання.

Якщо запалення виникає без підпалювання ззовні, а за рахунок підвищеної температури, до якої нагріта вся система, то говорять про самозаймання.

### 5.3 Теорія теплового самозаймання

Теорія теплового самозаймання була розроблена Семеновим, який виходив з уявлення, що повільна екзотермічна реакція, що проходить, прискорюється з підвищенням температури.

Розглянемо хімічну реакцію в горючій газовій суміші, поміщеній в посудину за поступового підвищення температури посудини, а разом з нею і температури горючої суміші.

За деякої температури суміші швидкість реакції стає помітною і далі все збільшується. Відповідно збільшується кількість тепла, що виділяється, що призводить до подальшого більш різкого підвищення температури суміші. Під дією різниці між температурою суміші та температурою посудини виникають теплові втрати з реакційного об'єму через стінку посудини в довкілля, які зі зростанням температури також збільшуються.

Отже, тепло, що виділяється під час хімічного реагування, витрачається на нагрівання суміші і на теплові втрати. Подальший перебіг процесу залежить від того, чи все тепло, що виділилося в довкілля у вигляді теплових втрат або тепловиділення, перевищує теплові втрати. У першому випадку настає тепла рівновага, і встановлюється стаціонарна температура, що дещо перевищує температуру довкілля. У другому випадку підвищення температури призводить до мимовільного прогресивного зростання швидкості реакції, бурхливого виділення тепла, що може закінчитися самозайманням.

Розглянемо залежність швидкості тепловиділення і швидкості тепловідведення від температури (рис. 4).

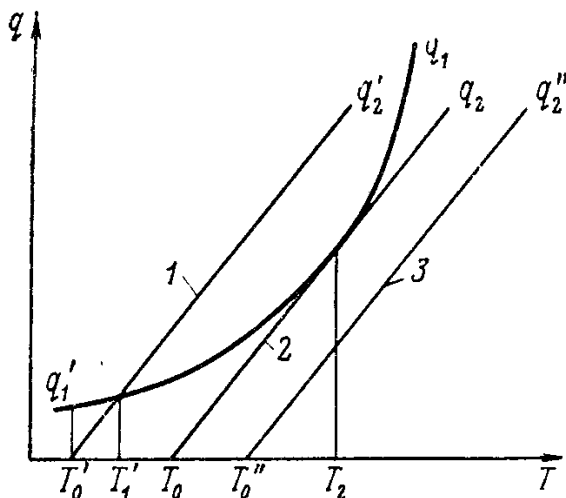


Рисунок 4 – Залежність швидкості тепловиділення ( $q_1$ ) та тепловідведення ( $q_2$ ) від температури

Швидкість тепловиділення описується кривою

$$q_1 = Qk_0 e^{-E/RT},$$

а швидкість тепловідведення – прямою

$$q_2 = \frac{\alpha S}{V}(T - T_0),$$

де  $Q$  – тепловий ефект реакції;  $k_0$  – передекспоненціальний множник;  $E$  – енергія активації;  $R$  – універсальна газова стала;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $S$  – площа поверхні посудини;  $V$  – об'єм посудини;  $T$  – температура газової суміші;  $T_0$  – початкова температура посудини.

Розглянемо як проходить реакція за різних початкових температур реакційної посудини. Холодний газ, впусканий у посудину за температури  $T'_0$ , нагріється до цієї температури. Так як за  $T'_0$  тепловідведення дорівнює нулю, а тепловиділення має значення  $q'_1$ , газ буде нагріватися до температури  $T'_1$ . За температури  $T'_1$  тепловиділення та тепловідведення рівні між собою. Ця рівновага є стійкою. Дійсно, якщо з якої-небудь причини температура газу підніметься вище  $T'_1$ , то

тепловідведення стане більшим ніж тепловиділення і температура буде падати до  $T'_1$ . Отже, реакція буде перебігати без прискорення за температури  $T'_1$ .

Якщо посудина має більш високу початкову температуру  $T''_0$ , то пряма тепловідведення (рис. 4, пряма 3) цілком лежить нижче кривої тепловиділення. Температура газу, що впущений у посудину, буде безупинно рости і закінчиться самозайманням.

Початкова температура посудини  $T_0$  – це межовий випадок між повільною реакцією і самозайманням. Пряма тепловідведення (рис. 4, пряма 2) в цьому разі лише торкається кривої тепловиділення, і вистачає дуже малого збільшення температури посудини, щоб відбулося самозаймання. Ця температура  $T_0$  і є мінімальною температурою, що призводить до самозаймання.

## 5.4 Горіння газів

Горюча газова система являє собою суміш, яка містить один або кілька горючих газів і повітря або кисень. Розглянемо випадок, коли горюча суміш постійного складу перебуває в спокої, тобто міститься в будь-якому об'ємі.

Якщо газоповітряну суміш помістити в трубку і запалити з одного кінця, то поступово з певною швидкістю горіння досягне іншого кінця трубки. Тепло, що виділилося під час займання в цьому місці, передається прилеглим шарам, викликаючи їх послідовне займання. Внаслідок горіння поширюється від шару до шару за всією довжиною трубки та сприймається як поширення полум'я.

Під час поширення полум'я хімічні реакції перебувають в дуже тонкому шарі, що відокремлює незгорілу суміш від продуктів згорання, який і називається полум'ям. Тепло, що виділяється при цьому, буде передаватися вихідною сумішшю, нагріваючи і запалюючи її. Внаслідок фронт полум'я почне переміщатися з певною швидкістю в бік незгорілої суміші.

Розрізняють швидкість поширення фронту полум'я і нормальну швидкість поширення полум'я.

Швидкістю поширення фронту полум'я  $U$  називають видиму швидкість руху фронту полум'я відносно початкової суміші.

Швидкістю нормального поширення полум'я  $U_n$  називають лінійну швидкість переміщення фронту полум'я відносно початкової суміші у напрямку нормалі до поверхні фронту полум'я в даному місці.

У суміші, що розміщена в горизонтально розташованій трубці, фронт полум'я має несиметричний вид щодо осі трубки (рис. 5).

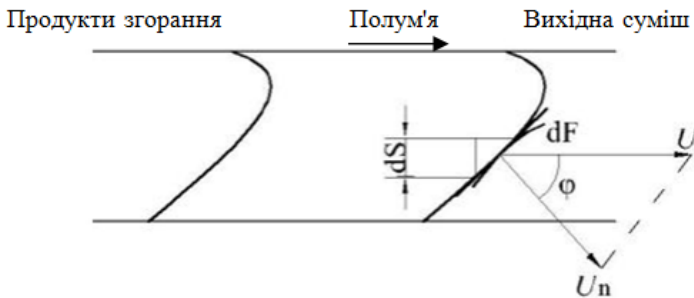


Рисунок 5 – Поширення полум'я горизонтальною трубкою

Зона горіння відокремлює вихідну суміш від продуктів згорання, густина яких менша за густину вихідної суміші. Вихідна суміш, як більш важка речовина, розтікається по нижній частині горизонтальної трубки, а більш легкі продукти згорання намагаються розміститися в її верхній частині. Таке переміщення вихідної суміші та продуктів згорання викривляє фронт полум'я і надає йому несиметричну форму. Крім того, внаслідок теплового розширення виникає рух газу, який викривляє і збільшує фронт полум'я. Під час викривлення фронту полум'я зона горіння не порушується, а його поверхня буде збільшуватися. Внаслідок цього швидкість нормального поширення полум'я і кількість газу, що згорає, на одиниці поверхні фронту полум'я мінятися не буде. Загальна ж кількість



газу, що згорає за одиницю часу, буде збільшуватися пропорційно збільшенню поверхні фронту полум'я.

Нормальна швидкість поширення полум'я дорівнює швидкості поширення фронту полум'я лише у випуклій точці фронту полум'я. У всіх інших точках фронту полум'я вона буде менша

$$U_n < U.$$

Нормальна швидкість поширення полум'я за цієї температури є постійною для даної горючої суміші і наводиться для різних сумішей у довідниках. Вона залежить лише від складу суміші, тиску й температури. Під час збільшення температури горіння нормальна швидкість поширення полум'я збільшується. Тиск не так однозначно впливає на нормальну швидкість поширення полум'я. Експериментально встановлено, що у повільно палаючих паливних сумішей ( $U_n < 0,5$  м/с) зростання тиску знижує нормальну швидкість поширення полум'я, а у швидко палаючих сумішей – збільшує.

Ще користуються масовою швидкістю поширення полум'я. Ця швидкість є кількість суміші, що згорає в одиницю часу на одиниці площі фронту полум'я. Масова швидкість горіння дорівнює добутку нормальної швидкості поширення полум'я на густину суміші,  $\text{г/см}^2 \cdot \text{с}$

$$U_m = U_n \cdot \rho.$$

У кожній точці викривленого фронту горіння, полум'я поширюється перпендикулярно його поверхні  $F$  зі швидкістю  $U_n$ . Тому об'єм суміші, що згорає, за одиницю часу буде дорівнювати

$$V = F \cdot U_n.$$

Цю саму кількість суміші можна виразити через швидкість поширення фронту полум'я  $U$  і площу поперечного перерізу трубки  $S$

$$V = S \cdot U.$$

Прирівнюючи ці рівняння, одержуємо закон площ

$$U = U_n \frac{F}{S}.$$

Відповідно до закону площ швидкість поширення фронту полум'я в стільки разів більше нормальної швидкості поширення полум'я, у скільки площа фронту полум'я більше поперечного перерізу трубки.

Якщо нормаль до елемента фронту полум'я становить кут  $\varphi$  із напрямком поширення полум'я (рис. 5), то поверхня цього елемента буде дорівнювати

$$dF = \frac{dS}{\cos \varphi} .$$

Отже, швидкість поширення фронту полум'я зростає обернено пропорційно  $\cos \varphi$ . Це рівняння називається законом Міхельсона або законом косинуса.

#### **5.4.1 Механізм поширення полум'я в газових сумішах**

У разі, коли не весь об'єм газової суміші рівномірно нагрітий, а в певному місці на нього діє джерело тепла високої температури, інтенсивна реакція виникає в тонкому шарі речовини, який зазнав впливу високої температури і відбувається займання. Від гарячих продуктів горіння цього шару теплова енергія шляхом теплопровідності передається ближньому шару газу і нагріває його. Це викликає інтенсивну реакцію в наступному шарі. Якщо при цьому теплота реакції нових шарів газу перевищує тепловтрати, то горіння поширюється від шару до шару. В іншому разі горіння не поширюється.

Поширення полум'я в газовій суміші відбувається завдяки передачі теплоти від шару до шару. В основному теплота передається шляхом теплопровідності. Другим важливим фізичним процесом під час поширення полум'я є взаємна дифузія компонентів горючої суміші і продуктів згорання.

Фронт полум'я або зона хімічних реакцій – це тонка зона, в якій відбувається перебіг реакції горіння. Розрахунки показують, що час перебування речовини в ній дуже малий (для

метано-повітряної суміші  $t = 10^{-3}$  с, для суміші кисню і водню  $t = 10^{-7}$  с).

Теплота хімічної реакції, перебіг якої відбувається на фронті полум'я, поширюється шляхом теплопровідності як в бік руху полум'я, нагріваючи вихідну суміш, так і в бік продуктів згоряння. Схема розподілу температур у зоні горіння наведена на рис. 6.

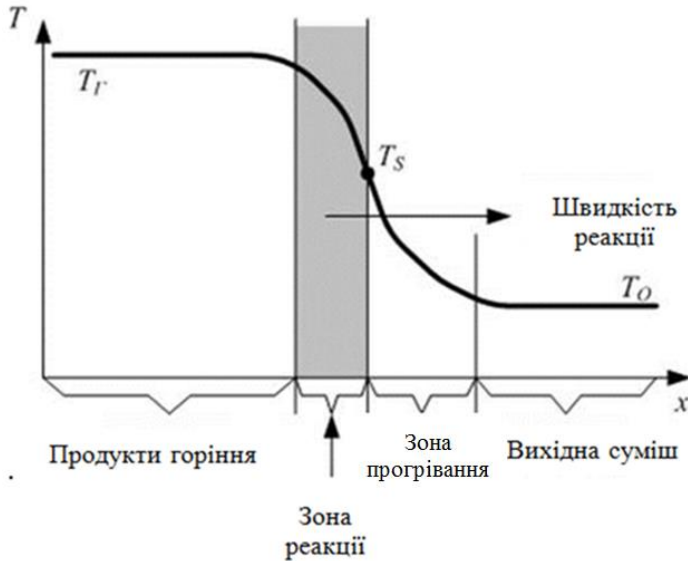


Рисунок 6 – Схема фронту полум'я

Вихідна суміш має температуру  $T_0$ . Через наближення до неї фронту полум'я вона нагрівається від  $T_0$  до температури самозаймання  $T_s$ . Розміри зони прогрівання залежать від теплопровідності суміші та швидкості поширення полум'я. Збільшення коефіцієнта теплопровідності розширює зону прогрівання, а збільшення швидкості полум'я – скорочує її.

У зоні реакції температура підвищується від  $T_s$  до температури горіння  $T_g$ . Крім явища теплопередачі, в зоні реакції відбуваються паралельно процеси дифузії. Дифузія викликана відмінністю парціальних тисків окремих компонентів

суміші в зоні реакції і у вихідній суміші. Наприклад, у зоні реакції парціальний тиск горючого компонента і кисню набагато нижчий, ніж у вихідній суміші (за рахунок витрачання цих компонентів у реакції горіння). Це призводить до того, що горючий компонент і кисень дифундують у зону горіння (рис. 7).

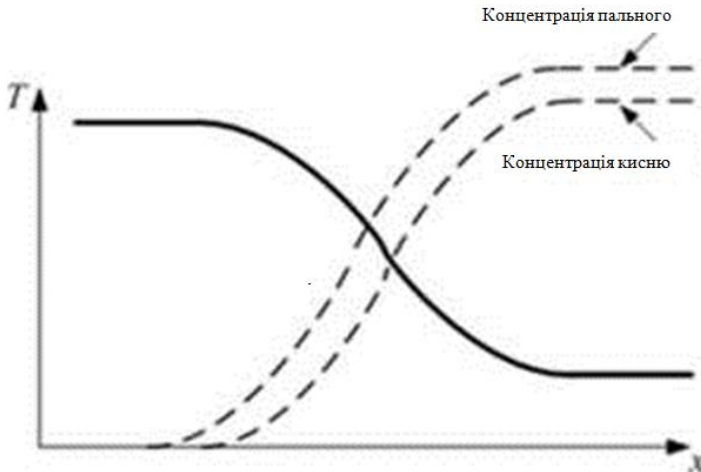


Рисунок 7 – Розподіл температури й концентрації компонентів за довжиною полум'я

### 5.4.2 Область самозаймання

Величина температури самозаймання  $T_S$  сильно залежить від тиску газів, що реагують. На рисунку 8 наведені межі області самозаймання суміші горючих газів із повітрям залежно від тиску середовища.

Для сумішей, параметри яких (тиск  $p$  і температура  $T$ ) лежать вище кривої ABCDEF, відбудеться самозаймання. Якщо параметри суміші  $p$ ,  $T$  лежать нижче кривої ABCDEF, то самозаймання не відбувається. Розглянемо зміну температури самозаймання  $T_S$  вуглеводневих сумішей під час підвищення та зниження тиску.

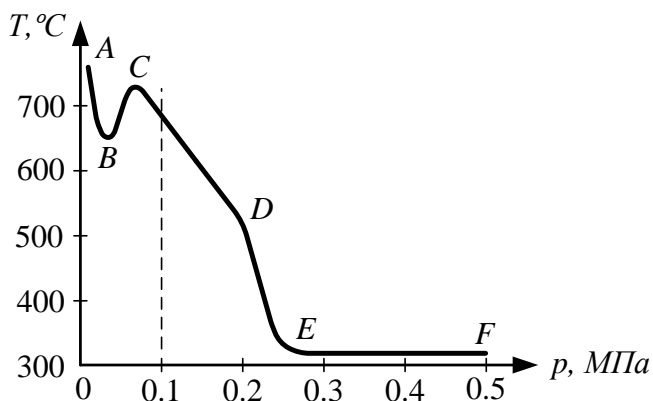


Рисунок 8 – Область самозаймання вуглеводнів залежно від тиску суміші

Під час підвищення тиску суміші вище за атмосферного ( $p > 0,1$  МПа) температура самозаймання  $T_s$  різко знижується, особливо при  $p > 0,2$  МПа (ділянка DE). При  $p > 0,3$  МПа величина температури самозаймання стає постійною (ділянка EF). За тисків нижче атмосферного величина температури самозаймання  $T_s$  спочатку різко підвищується, досягаючи максимуму (точка C), а потім знижується, утворюючи півострів ABC.

Крім параметрів доквілля, тобто тиску і температури, величина  $T_s$  залежить від складу горючої суміші. На рисунку 9 наведена залежність температури самозаймання  $T_s$  від відсоткового вмісту метану ( $\text{CH}_4$ ) в повітрі.

Як видно з графіка, найбільш низьке значення  $T_s$  відповідає суміші, що містить 6 % метану в повітрі, а найбільш високе значення  $T_s$  – суміші, що містить 14 % метану (верхня межа вибуху). Відзначимо, що залежність  $T_s$  від складу суміші завжди має мінімум. Водночас найменшу температуру самозаймання з сумішей горючих парів і газів з повітрям має стехіометрична суміш.

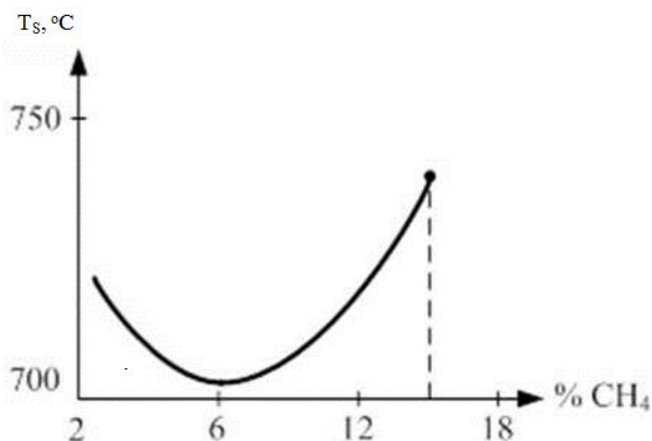


Рисунок 9 – Залежність температури самозаймання від вмісту метану в повітрі

### 5.4.3 Період індукції

Горюча речовина, введена в нагрітий посуд, займається не відразу, а через деякий проміжок часу. Час із моменту введення горючої речовини в нагрітий посуд до його самозаймання називається періодом індукції. Величина періоду індукції залежить від складу горючої суміші, а також змінюється залежно від кількості речовини, тиску, температури посудини, його розмірів та інших чинників.

На рисунку 10 наведена залежність періоду індукції суміші метану з киснем від тиску для різних значень температури посудини.

Як видно з наведеного графіка, період індукції різко зменшується зі збільшенням тиску. Для однакових значень тиску суміші величина періоду індукції тим більша, чим нижча температура посудини.

Крім термодинамічних параметрів середовища – температури й тиску, величина періоду індукції залежить і від складу газової суміші. Зі збільшенням вмісту горючого газу в суміші період індукції зростає.

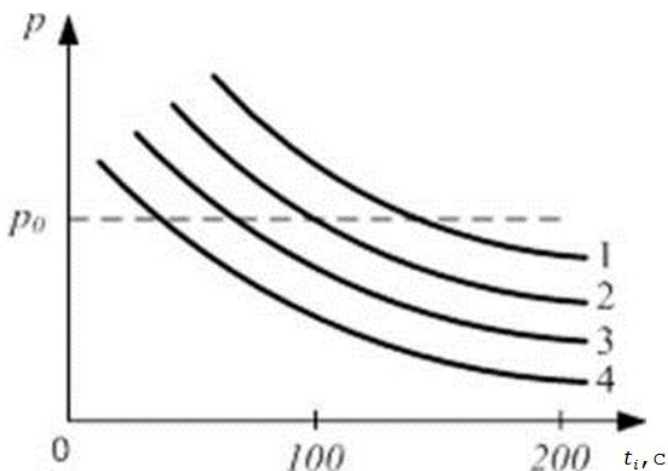


Рисунок 10 – Вплив температури на величину періоду індукції суміші( $\text{CH}_4 + \text{O}_2$ ):  
 1 –  $T = 730^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T = 750^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T = 780^\circ\text{C}$ ; 4 –  $T = 800^\circ\text{C}$

#### 5.4.4 Межі поширення полум'я

Горіння газових сумішей здатне поширюватися не за будь-якого співвідношення компонентів, а лише в певних межах складу, що називаються концентраційними межами горючості (рис. 11).

Мінімальний вміст горючого газу, за якого ще можливе горіння, називається нижньою концентраційною межею горючості (НКМГ).

Максимальний вміст горючого газу, за якого ще можливе горіння, називається верхньою концентраційною межею горючості (ВКМГ).

Нормальна швидкість поширення полум'я досягає максимуму за невеликого надлишку горючого (рис. 11), а не за стехіометричного співвідношення горючого та окисника.

Максимальна швидкість буде в суміші такого складу, в якій здійснюються оптимальні умови для швидкості виходу продуктів реакції.

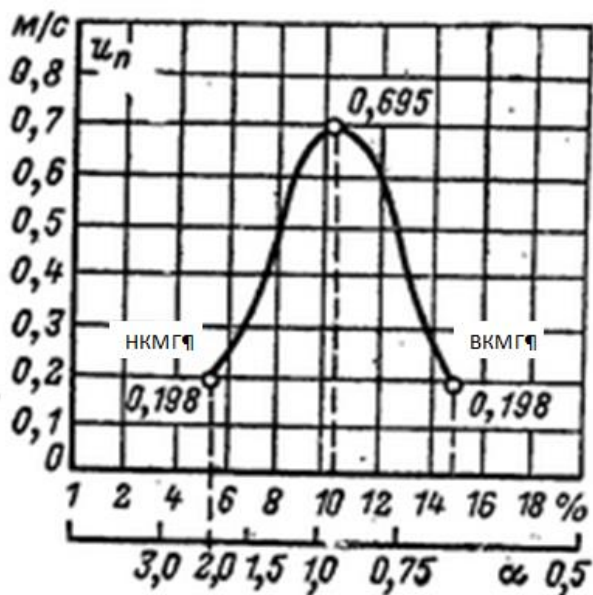


Рисунок-11 - Залежність нормальної швидкості поширення полум'я в повітряній суміші природного газу від його відсоткового вмісту в суміші,  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря

Максимальна температура горіння досягається в стехіометричній суміші (рис. 12).

Під час розведення суміші повітрям зменшується температура горіння, в результаті зменшується нормальна швидкість поширення полум'я в ній, і одночасно збільшуються теплові втрати, які за певної міри розведення призводять до припинення горіння. Подібний вплив здійснює великий надлишок пального. Це і визначає існування концентраційних меж горючості, всередині яких можливе поширення полум'я.

Експериментальні криві залежності нормальної швидкості поширення полум'я від складу суміші обриваються на краях на кінцевих величинах (рис. 11), що свідчить про існування межових швидкостей поширення полум'я.



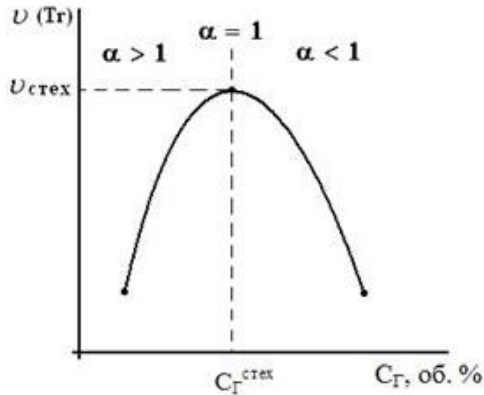


Рисунок 12 – Залежність температури горіння повітряної суміші природного газу від його відсоткового вмісту в суміші,  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря

Значення нижнього та верхнього концентраційних меж горючості для багатьох горючих газів у повітряних і кисневих сумішах наведені в довідниках.

Точне знання меж горючості для конкретних умов має велике практичне значення з точки зору техніки безпеки. Знаючи межі горючості (особливо нижню концентраційну межу), і таким чином, обмежуючи вміст горючого газу, можна запобігти можливості утворення небезпечних сумішей.

#### 5.4.4.1 Чинники, що впливають на концентраційні межі горючості

Додавання інертних газів звужує межі та в результаті робить суміш негорючою. Цей вплив є пропорційним теплоємності інертної добавки. Добавка, яка здатна реагувати з поглинанням тепла, виявляється ефективнішою щодо зниження горючості.

Підвищення температури розширює межі горючості.

Нижня концентраційна межа суміші з киснем та сама, що і суміші з повітрям. Верхня концентраційна межа для кисневої суміші завжди значно більша, ніж для повітряної суміші.

### 5.4.5 Вплив діаметра трубки на швидкість поширення полум'я

Горюча суміш постійного складу має різні швидкості поширення полум'я під час її горіння в трубках різного діаметра. Зі збільшенням діаметра нормальна швидкість поширення полум'я зростає нерівномірно. Під час збільшення діаметра трубки спочатку швидкість поширення полум'я зростає швидко. Під час подальшого збільшення діаметра вона повільно збільшується і при досягненні граничного значення швидкість поширення полум'я залишається постійною (рис. 13).

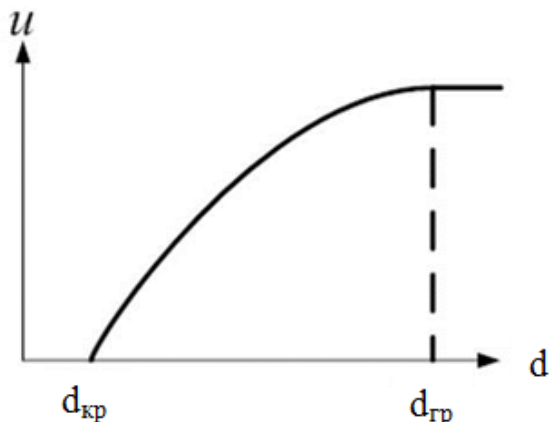


Рисунок 13 – Залежність швидкості поширення полум'я від діаметра трубки

Під час зменшення діаметра трубки швидкість поширення полум'я зменшується і під час досягнення деякого критичного значення полум'я в трубці не поширюється. Цей ефект можна пояснити збільшенням теплових втрат під час зменшення діаметра трубки.

Теплота із зони горіння витрачається на нагрівання суміші  $Q_1$ , нагрівання продуктів згорання  $Q_2$  і стінок трубки  $Q_3$  (рис. 14).

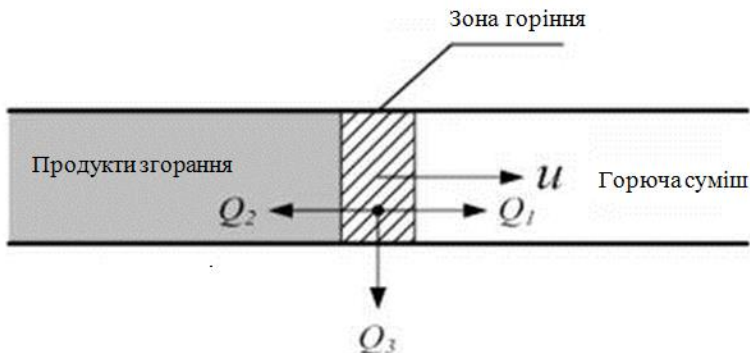


Рисунок 14 – Схема тепловідведення із зони горіння

Теплота  $Q_1$  повертається в зону реакції і тим самим відшкодовує тепловіддачу на нагрівання свіжої суміші. До тепловтрат відносяться лише  $Q_2$ ,  $Q_3$ . Ці втрати зростають зі зменшенням діаметра трубки за рахунок того, що збільшується відношення поверхні тепловіддачі до об'єму газу, що віддає теплоту.

Для циліндричної трубки радіусом  $R$  і довжиною  $L$  відношення її поверхні  $S$  до об'єму  $V$  дорівнює:

$$\frac{S}{V} = \frac{2\pi RL}{\pi R^2 L} = \frac{2}{R} = \frac{4}{d}.$$

Звідси видно, що зі зменшенням діаметра трубки збільшується відведення теплоти від одиниці об'єму газу, що перебуває в зонах прогріву і реакції, до стінок трубки. Збільшення тепловтрат знижує температуру горіння і швидкість поширення полум'я. Отже, для кожного значення діаметра трубки за незмінного складу суміші встановлюється певна температура горіння і швидкість поширення полум'я залежно від рівня теплових втрат. Зменшуючи діаметр трубки, можна досягти такої величини тепловтрат, за якої горіння в суміші припиняється. Такий діаметр називається критичним.

На принципі гасіння полум'я в вузьких трубках засновано ціла низка запобіжних пристроїв, що запобігають поширенню полум'я – вибухобезпечної електроапаратури, металеві сітки

для повільно палаючих сумішей (лампа Деві), вогнеперепинювачів у шахтах, засипки гравійних порошоків у системах зливу нафтопродуктів.

### 5.4.6 Горіння газу в пальнику

Розглянемо горіння газу, що безперервно надходить у пальник. Залежно від способу подачі повітря, необхідного для горіння можливі два крайніх випадки:

- 1) горіння газової суміші, коли спалюється попередньо підготовлена суміш горючого газу та повітря;
- 2) коли газ і повітря подаються окремо.

#### 5.4.6.1 Кінетичне горіння

У попередньо перемішаній суміші інтенсивність горіння залежить лише від кінетики (швидкості) самих хімічних реакцій, тому такий вид горіння називають кінетичним.

Розглянемо пальник, розміщений вертикально, в який подається суміш горючого газу та повітря. Під час ламінарного руху суміші швидкість руху окремих її шарів розподіляється в пальнику по параболі (рис. 15).

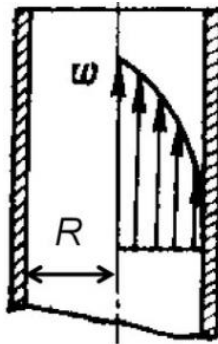


Рисунок 15 – Схема ламінарної течії

Такий самий розподіл швидкостей зберігається і на виході з пальника. Біля стін пальника швидкість буде мінімальною, а далі вона зростає і досягає максимального значення на осі пальника.

Під час запалення в гирлі пальника поблизу його обрізу в точках, де швидкість потоку  $W$  дорівнює швидкості нормального поширення полум'я  $W = -U_n$ , полум'я тримається стабільно, утворюючи запалююче кільце, яке забезпечує безперервне запалювання суміші, що надходить, по периферії струменя (рис. 16).

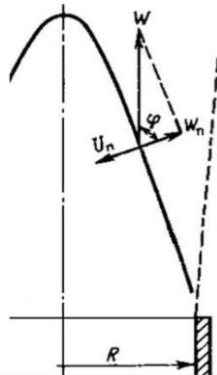


Рисунок 16 – Схема факела однорідної суміші

Біля стінок пальника, де швидкість подавання суміші менша за швидкість нормального поширення полум'я, полум'я не може проникнути в пальник. Кільцева зона запалювання утворюється внаслідок уповільненого руху по периферії пальника.

Полум'я в процесі поширення від периферії до центру пальника одночасно відноситься потоком, і в результаті цього досягає осі струменя на деякій відстані від гирла пальника, утворюючи конусоподібний факел. Тонка зона горіння, що утворює фронт полум'я, зазвичай має блакитний колір.

Горіння відбувається по поверхні конусоподібного факела, причому глибина зони горіння становить частини міліметра. Основний об'єм факела залишається інертним.

Фронт полум'я набуває стійкого положення за конусоподібною поверхнею, в кожній точці якої нормальна швидкість руху газу дорівнює нормальній швидкості поширення полум'я (рис. 16)

$$W_n = W \cos \varphi = -U_n,$$

де  $\varphi$  – кут між напрямом зовнішньої нормалі до фронту полум'я і швидкістю потоку в даному місці.

Із цього співвідношення видно, що швидкість потоку може значно перевищувати нормальну швидкість поширення полум'я, але не повинна бути менша за неї, щоб уникнути проскакування полум'я в пальник.

Отже, у вертикальному конусоподібному фронті полум'я в точках, що розміщені вище запалювального кільця, завдяки існуванню нижчих рівноважних точок фронту полум'я, встановлюється рівновага між швидкістю переміщення елемента фронту полум'я і швидкістю потоку. Стійкими точками фронту полум'я, здатними існувати без наявності нижчих місць із джерелом тепла, є точки по периферії пальника, в яких

$$W = -U_n.$$

Час, необхідний для поширення полум'я від периферії пальника до центру струменя

$$\tau = \frac{R}{U_n},$$

де  $R$  – радіус пальника.

За цей час центральні струмені, рухаючись із певною швидкістю  $W$ , проходять відстань  $L = W \cdot \tau$ , яка відповідає довжині факела. Звідси отримуємо вираз для довжини факела

$$L = \frac{W \cdot R}{U_n}.$$

За цього діаметра пальника форма факела та його розміри залежать від нормальної швидкості поширення полум'я і швидкості потоку. Чим більша нормальна швидкість поширення полум'я і менша швидкість потоку, тим коротший факел і навпаки. Зі збільшенням діаметра пальника довжина факела збільшується.

Під час зменшення швидкості витікання суміші з пальника конус полум'я коротшає і притуплюється. Коли швидкість витікання суміші стає однаковою або меншою за нормальну швидкість поширення полум'я, може статися проскакування полум'я в пальник.

Мінімально допустима швидкість витікання суміші з пальника, за якої не відбувається проскакування полум'я в пальник, називається нижньою межею стійкості полум'я за швидкістю подачі суміші.

Чим більший діаметр пальника, тим більша повинна бути швидкість подачі суміші для запобігання проскакування. Чим більша нормальна швидкість поширення полум'я, тим вища повинна бути нижня межа стійкості полум'я, тобто більша швидкість подачі суміші.

Зі збільшенням швидкості витікання суміші стійке положення фронту факела зберігається завдяки збільшенню висоти конуса полум'я. Подальше збільшення швидкості витікання суміші вище певної межі призводить до відриву і згасання факела.

Максимально допустима швидкість витікання суміші з пальника, за якої не відбувається відрив полум'я від пальника, називається верхньою межею стійкості полум'я за швидкістю подачі суміші.

Отже, стійкість запалювання факела обумовлюється утворенням запалювального кільця на виході з пальника, в якому  $W = -U_n$ . Проскакування і відрив полум'я відбуваються через порушення цієї умови поблизу гирла пальника.

### **5.4.6.2 Дифузійне горіння**

У разі, коли через пальник подається газ, який не містить у собі кисню, під час його підпалювання горіння відбувається за рахунок кисню повітря, що надходить за допомогою дифузії. Водночас швидкість горіння визначається інтенсивністю

змішування газу й повітря, тому таке горіння називається дифузійним.

Залежно від характеру руху газу розрізняють ламінарне та турбулентне дифузійне горіння.

Ламінарне дифузійне горіння відбувається за ламінарного режиму руху газу, що витікає з пальника. Кисень, необхідний для горіння, поступає з навколишньої атмосфери і змішується з горючим газом за допомогою дифузії. Отримана при цьому суміш під час підпалювання утворює факел, який набуває форму конуса, так як по мірі руху газ витрачається на горіння і зона горіння переміщується до осі струменя, доходячи до неї в вершині конуса (рис. 17).

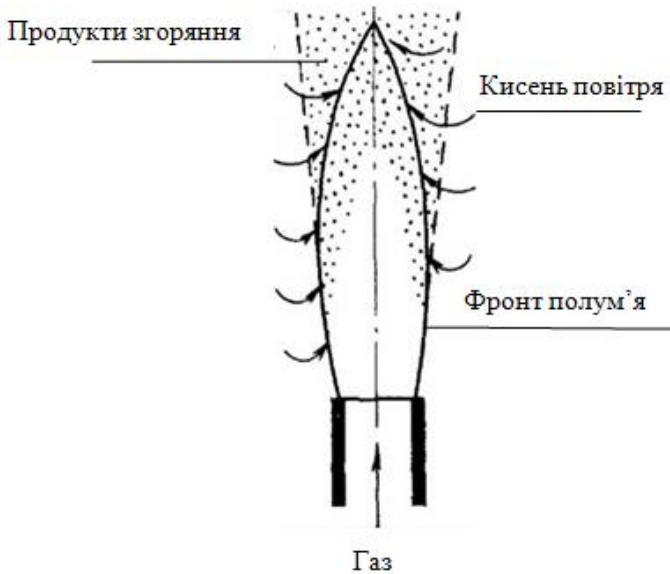


Рисунок 17 – Структура дифузійного факела

Ламінарний дифузний факел підтримується стаціонарно, так само як і під час горіння однорідної суміші, за рахунок існування кільцевої зони запалювання. У разі, коли в пальник подається лише газ, а повітря перебуває в спокої, біля кромки



пальника газ дифундує назовні і, змішуючись із повітрям, утворює суміш, яка в зоні малих швидкостей стійко згорає. Фронт полум'я встановлюється по поверхні, де суміш утворюється в стехіометричному співвідношенні для повного згорання. Усередині факел також інертний.

Завдяки утворенню більш багатой суміші в області запалювального кільця та її згорання в зоні малих швидкостей потоку, дифузійний факел володіє більшою стійкістю запалювання порівняно з факелом однорідної суміші.

Час дифузії повітря до осі пальника

$$\tau = \frac{R^2}{2D},$$

де  $R$  – радіус пальника;  $D$  – коефіцієнт молекулярної дифузії повітря.

Довжина ламінарного дифузійного факела розраховується як відстань, яку пройде газ за цей час

$$L = W \cdot \tau = \frac{WR^2}{2D}.$$

Отже, довжина ламінарного дифузійного факела прямо пропорційна швидкості витікання газу, квадрату радіуса пальника і обернено пропорційна коефіцієнту дифузії.

За однакової швидкості витікання газу довжина ламінарного дифузійного факела буде більшою, ніж довжина факела однорідної суміші.

Зі збільшенням теплоти згорання газу, внаслідок збільшення кількості повітря необхідного для горіння, довжина факела збільшується.

Під час дифузійного горіння також спостерігається явище відриву полум'я. Але проскакування полум'я в пальник виключається, так як у пальнику відсутній кисень.

Особливістю дифузійного горіння є наявність хімічної неповноти згорання. Газу, що містять вуглеводневі сполуки, є теплонестійкими. Під час їх нагрівання всередині факела за відсутності кисню відбувається їх розкладання з утворенням

вуглецю. Частина його не встигає згоряти й у вигляді сажі залишає факел.

Так як швидкість ламінарного дифузійного горіння визначається швидкістю молекулярної дифузії в ламінарно рухомому потоці, цей вид горіння не може бути інтенсивним, а можливий за малих швидкостей виходу горючого газу з пальника.

Інтенсивність дифузійного горіння залежить від інтенсивності сумішоутворення. Так як масообмін під час турбулентної течії відбувається у багато разів інтенсивніше, ніж під час ламінарного режиму, то для промислових цілей більш важливим є спосіб турбулентного спалювання не перемішаних газів.

Турбулентне дифузійне спалювання проводиться роздільною подачею газу і повітря через пальники в камеру згорання в середовище гарячих продуктів згорання. Повітря може подаватися через ті самі пальники або через окремі сопла.

## **5.5 Горіння рідких палив**

### **5.5.1 Горіння рідких палив із вільної поверхні**

Кожне рідке паливо, так само як будь-яка рідка речовина, за даної температури має певний тиск насиченої пари над своєю поверхнею, який збільшується з ростом температури.

Під час запалювання рідкого пального, що має вільну поверхню, запалюється його пара, що міститься в просторі над поверхнею, утворюючи палаючий факел. За рахунок тепла, що випромінюється факелом, випаровування різко збільшується. За сталого режиму теплообміну між факелом і дзеркалом рідини кількість пального, що випаровується, а отже, і згорає та досягає максимального значення й далі залишається постійним у часі.

Процес горіння рідких горючих із вільної поверхні відбувається так (рис. 18).

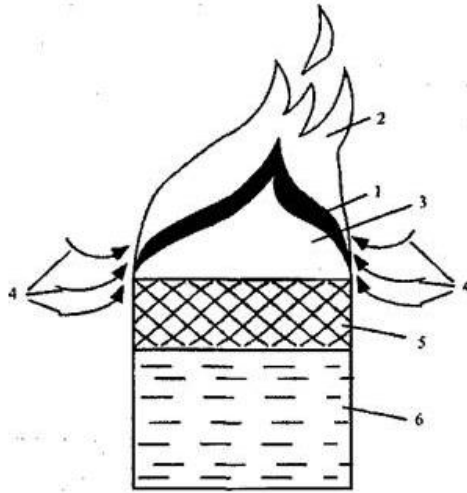


Рисунок 18 – Схема горіння рідини з вільної поверхні:  
 1 – зона горіння; 2 – зона догорання; 3 – пари рідини;  
 4 – кисень повітря; 5 – зона підігрівання рідини;  
 6 – рідина в резервуарі

За сталого режиму горіння за рахунок тепла, що випромінюється факелом, рідке паливо випаровується. У висхідний потік пального, що перебуває в паровій фазі, за допомогою дифузії проникає повітря з навколишнього простору. Отримана таким чином суміш утворює палаючий факел у вигляді конуса, віддаленого від поверхні рідини на деякій відстані, і добре видно темну смужку, яка відокремлює факел від рідини. Стійке горіння відбувається на поверхні, де суміш досягає пропорції, відповідної стехіометричному співвідношенню горючого й повітря.

Інтенсивність випромінювання зони горіння на дзеркало випаровування не залежить від його форми і величини, а залежить лише від фізико-хімічних властивостей горючого і є характерною константою для кожного рідкого горючого.

Температура рідкого горючого, за якої пари над його поверхнею утворюють з повітрям суміш, здатну зайнятися під

час піднесення джерела запалювання, називається температурою спалаху.

Оскільки рідкі горючі згорають у паровій фазі, то швидкість горіння визначається швидкістю випаровування рідини, швидкістю хімічної реакції і швидкістю дифузії кисню.

Найбільш повільним процесом є випаровування, швидкість якого і визначає швидкість горіння рідкого палива.

Хімічна реакція відбувається в дуже тонкому шарі фронту факела, товщина якого не перевищує декількох часток міліметра. Об'єм, що займає факел, зоною горіння ділиться на дві частини: всередині факела розміщені пари горючої рідини і продукти згорання, а поза зоною горіння – суміш продуктів горіння з повітрям.

Горіння висхідних усередині факела парів рідких палив складається з двох стадій: дифузійного підведення кисню до зони горіння й самої хімічної реакції, що проходить у фронті полум'я. Швидкості цих двох стадій не однакові. Хімічна реакція за високих температур проходить дуже швидко, тоді як дифузійне підведення кисню є повільним процесом, що обмежує загальну швидкість горіння. Отже, в цьому разі горіння відбувається в дифузійній області, а швидкість горіння визначається швидкістю дифузії кисню в зону горіння.

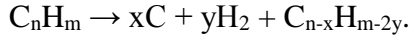
Під час горіння рідких палив температура займання вища за температуру кипіння окремих фракцій, що входять до складу рідкого палива. Тому спочатку відбувається випаровування палива з поверхні, а потім пари палива змішуються з повітрям, підігріваються до температури спалаху й горять.

Так як умови підведення кисню до зони горіння під час спалювання різних рідких горючих із вільної поверхні приблизно однакові, то швидкість їх горіння, віднесена до фронту полум'я, тобто до бічної поверхні факела, також однакова, а довжина факела буде тим більша, чим більша швидкість випаровування.

Специфічною особливістю горіння рідких горючих з вільної поверхні є великий хімічний недопал. Кожне пальне, що являє

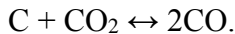
собою вуглеводневу сполуку під час спалювання з вільної поверхні, має властиву йому величину хімічного недопалу.

Виникнення хімічного недопалу можна подати так. Пароподібні вуглеводні під час руху всередині конусоподібного факела до фронту полум'я, під час знаходження в області високих температур за відсутності кисню, піддаються термічному розкладанню аж до утворення вільного вуглецю



Світіння полум'я обумовлюється знаходженням у ньому частинок вільного вуглецю. Вони розжарюються за рахунок тепла, що виділяється під час горіння, і випромінюють яскраве світло. Частина вільного вуглецю не встигає згоряти й у вигляді сажі виноситься продуктами згорання, утворюючи факел, що димить.

Крім того, наявність вуглецю та висока температура спричиняє утворення CO:



Вільний вуглець і CO в продуктах згорання обумовлюють величину хімічного недопалу. Чим більший вміст вуглецю в рідкому паливі і чим менше він насичений воднем, тим більше утворення чистого вуглецю, яскравіший факел, більший хімічний недопал.

### **5.5.2 Горіння краплі рідкого палива**

Так як горіння рідких палив відбувається після їх випаровування в паровій фазі, то його інтенсифікація пов'язана з інтенсифікацією випаровування і сумішоутворення. Це досягається за рахунок збільшення поверхні випаровування шляхом розпилення рідкого палива на дрібні крапельки і хорошого змішування пари, що утворилася з повітрям під час рівномірного розподілу високодисперсного палива в ньому.

Ці два завдання виконують, застосовуючи пальники з форсунками, якими розпилюють рідке паливо в потоках повітря,

що подаються в камерну топку через апарати пальників, що направляють повітря.

Крапля рідкого палива оточена атмосферою, насиченою парами цього горючого (рис. 19).

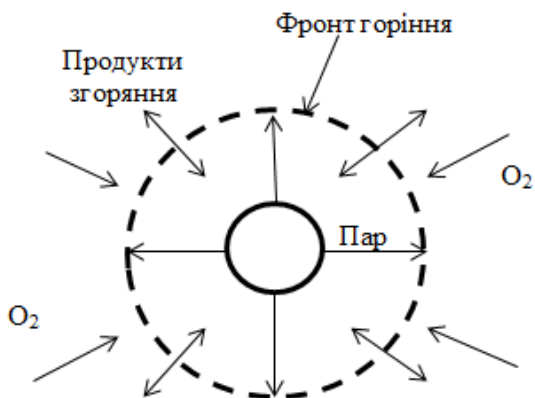


Рисунок 19 – Схема горіння краплі рідини

Навколо краплі утворюється хмара пари, яка дифундує в довкілля. Навпроти відбувається дифузія кисню. На деякій відстані від краплі встановлюється стехіометричне співвідношення між горючими парами й киснем. Тут і відбувається фронт горіння парів палива, який утворює сферу навколо краплі.

Швидкість горіння краплі рідини визначається найбільш повільною стадією – швидкістю випаровування горючого.

У просторі між краплею і зоною горіння розміщені пари рідкого палива та продукти згорання. У просторі поза зоною горіння – повітря й продукти згорання.

Кількість кисню, що дифундує до кульової поверхні за інших рівних умов, пропорційна квадрату її діаметра, тому встановлення зони горіння на деякому віддаленні від краплі обумовлює велику швидкість її горіння порівняно з такою самою частинкою твердого палива, під час горіння якої хімічна реакція практично перебігає на самій поверхні.

## 5.6 Горіння твердого палива

Для процесу горіння твердого палива дуже важливим є те, що будь-яке тверде паливо містить речовини, які під час нагрівання розкладаються та утворюють горючу парогазову суміш. Їх називають леткими. Частина палива, що залишилася після виділення летких, називається коксовим залишком, становить для більшості твердих палив значну частку горючої маси палива і складається з твердого вуглецю й мінеральних домішок.

Подвійна природа горючої частини твердого палива дозволяє виділити дві характерні стадії процесу горіння палива: горіння летких і горіння коксового залишку.

Помістимо шматок вугілля в топку з температурою 950 °С і простежимо за температурою вугілля й послідовністю процесів, які з ним відбуваються (рис. 20).

Спочатку відбувається нагрівання шматка вугілля до температури 100 °С. За цієї температури відбувається випаровування води. Далі шматок вугілля нагрівається і за температури 300 °С починається виділення летких та їх займання. Шматок вугілля огортається полум'ям, яке яскраво світиться.

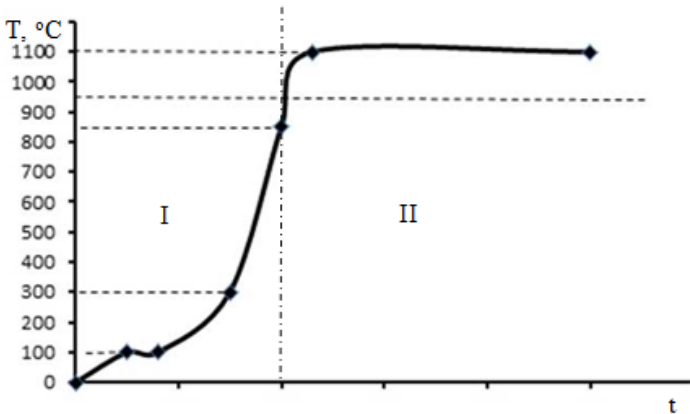
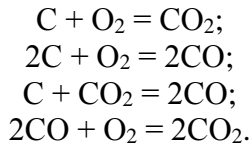


Рисунок 20 – Схематична залежність температури шматка вугілля від часу його перебування в топці

Полум'я існує лише деякий, не надто тривалий час, і потім поступово зникає, а температура вугілля досягає 850 °С. Сам шматок вугілля при цьому весь час залишається чорним. Момент закінчення виходу летких характеризує кінець першої стадії процесу горіння. Це означає, що шматок вугілля весь прогрівся до температури, коли вихід основної маси летких закінчився.

Другою стадією процесу горіння, що займає основний час, є горіння коксу. Ця стадія починається безпосередньо після закінчення виходу летких і характеризується швидким розжарюванням решти маси шматка вугілля до температури близько 1100 °С, яка більша за температуру топки. Ця температура залишається практично незмінною до кінця процесу горіння й підтримується завдяки інтенсивному виділенню тепла реакції. Горіння на цій стадії відбувається практично безполумєним чином і займає до 90 % загального часу згоряння шматка вугілля, а також дає основний тепловий ефект від горіння.

Горіння вуглецю коксу описується чотирма реакціями:



Займання летких не є початком горіння коксу, хоча і може сприяти горінню.

Під час горіння деревини, яка містить велику кількість летких, процес горіння часто обмежується першою стадією. Поширення полум'я по деревині відбуватиметься в тому разі, якщо тепловиділення від горіння одного шару буде більше витратити тепла на підігрівання, випаровування вологи й вихід летких сусіднього шару. Горіння коксового залишку можливе лише за наявності високої температури – маси вугілля, що горить.

У теплоенергетиці тверде паливо спалюється в пилоподібному стані у факелі, розміщеного в топці. Для



перетворення великих шматків вологого палива в придатну для спалювання сухий вугільний пил, тверде паливо проходить процес підготовки, що полягає в попередньому подрібненні, підсушуванні і розмелюванні твердого палива. В результаті отримуємо вугільний пил необхідного помелу.

## **5.7 Особливості горіння вибухових речовин**

ВР містять кисень у своєму складі й здатні горіти без кисню повітря в замкненому об'ємі. У цьому разі відбувається безполуменеве горіння. Вони здатні горіти й у відкритому об'ємі з використанням кисню повітря. У такому разі спостерігається полуменеве горіння.

### **5.7.1 Горіння в замкненому об'ємі без кисню повітря**

Розрізняють два механізми горіння ВР у замкненому об'ємі: горіння ВР, що мають леткість, і горіння ВР за наявності екзотермічної реакції в конденсованій фазі.

#### **5.7.1.1 Горіння летких ВР**

Під час нагрівання ВР джерелом теплоти відбуваються плавлення й випаровування тонкого шару речовини, нагрівання пари, що утворилася, до температури самозаймання з подальшою інтенсивною хімічною реакцією. Продукти горіння нагрівають наступний шар ВР і зазнають тих самих фізичних процесів і хімічних реакцій.

Розглянемо схему розподілу температури й перебігу реакції горіння летких ВР (рис. 21).

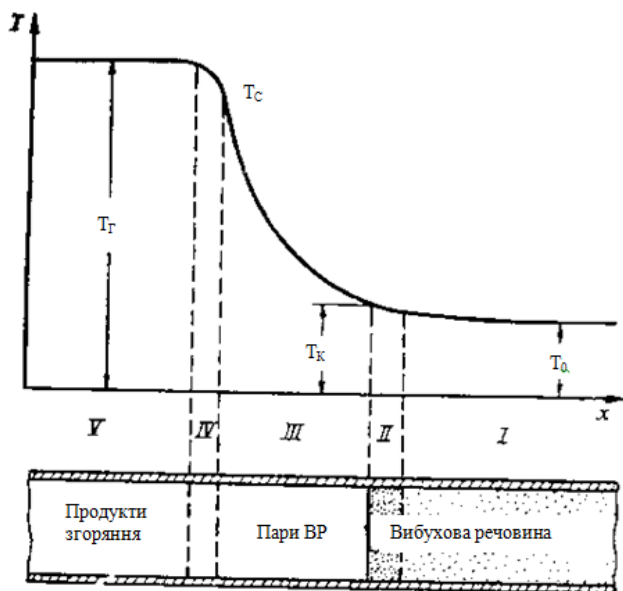


Рисунок 21 – Схема розподілу температури та перебігу реакції горіння летких ВР

Основною стадією процесу є поширення екзотермічної хімічної реакції в парах (зона IV). Це вузька зона, в якій відбувається безполуменеве горіння. Продукти горіння містять горючі гази, здатні догоряти за наявності кисню повітря. Тепло, передане від зони реакції до поверхні ВР, змушує його випаровуватися зі швидкістю, що визначається швидкістю підведення тепла. У конденсованій фазі хімічні реакції не відбуваються, а спостерігається лише нагрівання речовини від її початкової температури до температури кипіння (зона II). Під час горіння ВР енергія передається конденсованій фазі методом теплопровідності через шар пари (зона III), що готується до реакції. Пари, що утворилися внаслідок випаровування конденсованої фази, спалахують не відразу, а лише через деякий час, який необхідний для їх прогрівання від температури кипіння до температури самозаймання.

За сталого режиму горіння кількість речовини, що випарувалася за 1 с на 1 см<sup>2</sup> поперечного перерізу заряду ВР, дорівнює кількості речовини, згорілої за 1 с на 1 см<sup>2</sup>.

Механізм горіння парової фази ідентичний механізму горіння газоподібних речовин.

Від густини конденсованої ВР швидкість реакції в газовій фазі не залежить. Тому масова швидкість горіння не змінюється під час зміни густини ВР. Звідси випливає, що лінійна швидкість горіння зменшується зі збільшенням густини ВР

$$v = \frac{m_c}{\rho},$$

де  $m_c$  – масова швидкість горіння, г/(с · см<sup>2</sup>);  $\rho$  – густина ВР, г/см<sup>3</sup>.

### **5.7.1.2 Горіння ВР за наявності екзотермічної реакції в конденсованій фазі**

Таке горіння спостерігається у випадку ВР, що не мають леткості (нітроцелюлоза), а також ВР, що мають леткість, але відбувається воно за дуже високого тиску.

Такий процес можна подати так (рис. 22).

Під час прогрівання заряду ВР у прогрітому поверхневому шарі (зона 1, рис. 22) виникають слабоекзотермічні реакції розкладання з утворенням високореакційних продуктів. Ці продукти реакції вступають у взаємодію один з одним (зона 2, рис. 22). Водночас виділяється основна кількість тепла, а також утворюються горючі гази, здатні догоряти за наявності кисню повітря (зона 3, рис. 22). Температура в зоні безполуменевого горіння вища, ніж у конденсованій фазі. Зона безполуменевих реакцій досить розтягнута на відміну від механізму горіння летких ВР.

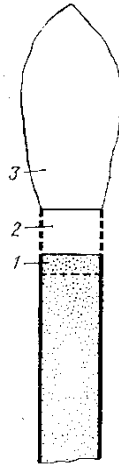


Рисунок 22 – Схема горіння ВР за наявності екзотермічної реакції в конденсованій фазі:  
1 – зона екзотермічних реакцій в конденсованій фазі,  
2 – зона безполуменового горіння,  
3 – зона полум'я

За таким механізмом можливе горіння й летких ВР, але за великих тисків. Зі збільшенням тиску зростає температура кипіння. Чим вищий тиск, за яким відбувається горіння леткої ВР, тим до більш високої температури нагрівається шар речовини, що прилягає до поверхні. Коли тиск досить великий, температура прогрітого шару може піднятися настільки, що швидкість реакції розкладання ВР у конденсованій фазі перевищить швидкість випаровування. Це призводить до збільшення швидкості горіння, оскільки тепло, що виділяється в конденсованій фазі, передаватиметься сусіднім шарам безпосередньо по твердому тілу, а не через шар парів.

### 5.7.2 Горіння ВР на повітрі

Говорячи про горіння ВР, необхідно розрізняти два явища: поширення горіння всередині суцільної маси ВР і поверхневе

поширення горіння. Під час горіння ВР на повітрі (летких і нелетких) виникає поверхневе полум'яне горіння, в якому відбувається догорання горючих продуктів неповного згорання за рахунок кисню повітря. Ця взаємодія відбувається на кордоні, де стикаються ВР, продукти горіння й кисень повітря (лінія АБ, рис. 23).



Рисунок 23 – Схема горіння ВР на повітрі:  
1 – полум'я; 2 – ВР

Це призводить до підвищення температури й викликає прискорене поширення горіння по поверхні заряду. Внаслідок цього торець підпаленого зверху циліндричного стовпчика ВР набирає форми конуса.

### 5.7.3 Граничні умови горіння конденсованих ВР

Під час запалювання з торця ВР, вміщеної в циліндричну трубку, рівномірне стійке горіння буде лише в тому разі, якщо діаметр заряду перевищує деяке мінімальне значення, що має назву критичний діаметр. Критичний діаметр залежить від умов горіння – тиску й початкової температури ВР. Чим вищі тиск і температура, тим менша за інших однакових умов величина критичного діаметра. З іншого боку, для цього діаметра існують граничні значення тиску й температури, нижче за які горіння загасає. Отже, критичне значення одного з трьох параметрів за

сталого значення двох інших може служити порівняльною характеристикою здатності ВР до горіння.

Горіння відбувається внаслідок передачі сусідньому шару тепла, що виділилося в реагуючому шарі. Одночасно з виділенням тепла відбуваються втрати його в довкілля через стінки трубки. Горіння відбувається стаціонарно лише в тому разі, якщо кількість тепла, що віддається сусідньому шару, і тепловтрати врівноважуються теплонадходженням завдяки реакції. Якщо сумарна тепловіддача стає більшою, ніж теплонадходження, то горіння виявляється неможливим.

Під час зменшення діаметра заряду кількість тепла, що виділяється за одиницю часу, зменшується пропорційно площі, тобто квадрату діаметра. Тепловіддача також зменшується, але повільніше. Вона пропорційна периметру, тобто першому ступеню діаметра. За деякого значення діаметра теплонадходження не може компенсувати тепловтрат, і горіння загасає. Якщо за такого діаметра підвищити тиск або температуру, то швидкість хімічної реакції зросте, а тепловтрати не зміняться, і горіння знову стає можливим.

#### **5.7.4 Нестійке горіння ВР**

Горіння бризантних ВР зберігає рівномірний характер і сталу швидкість лише за певних умов. Наприклад, рівномірність горіння порошкоподібної ВР малої щільності порушується за умов підвищення тиску. Починаючи з деякого тиску, що залежить від щільності та властивостей ВР, горіння різко прискорюється, стає пульсуючим і може перейти в детонацію. Особливо здатні до нестійкого горіння з переходом у детонацію ініціювальні ВР.

Під час горіння ВР перетворюється в газ. Густина газів, особливо за високих температур горіння, дуже мала порівняно з густиною твердої речовини. Продукти горіння сильно розширюються і набувають руху, що призводить до підвищення тиску над поверхнею ВР, що горить. Виникнення підвищеного

тиску призводить до збільшення швидкості горіння, що, у свою чергу, прискорює рух газів.

### **5.7.5 Газодинамічні умови стійкості горіння**

Під час горіння ВР у циліндричній трубці газу, що утворюються, відходять у напрямку, протилежному поширенню горіння. У результаті тиск над поверхнею ВР зростає. Тиск над поверхнею ВР залежатиме від співвідношення між швидкістю газоприпливу, що залежить від швидкості горіння ВР і швидкості газостоку. Швидкості газоприпливу та газостоку зростають зі збільшенням тиску, але швидкості їх зростання можуть бути різними. Співвідношення між газоприпливом і газостоком залежить від характеру горіння за даного зовнішнього тиску і його зміни зі зростанням тиску.

Залежно від властивостей ВР та умов, за яких відбувається горіння, можливі два крайні випадки.

1 Швидкість стоку газів дорівнює швидкості їх утворення. У цьому разі маємо стаціонарний процес горіння зі сталою швидкістю.

2 Швидкість газоприпливу більша за швидкість газостоку. У цьому разі тиск у фронті горіння буде безупинно підвищуватись, і швидкість горіння зростати.

### **5.7.6 Нестійке горіння порошкоподібних ВР**

Горіння твердих порошкоподібних ВР відбувається рівномірно і стійко не за всіх умов. Якщо тиск перевищує деяку межу, величина якої залежить насамперед від щільності, то залежність швидкості горіння від тиску змінюється. Зміна режиму горіння під час збільшення тиску обумовлена проникненням газоподібних продуктів горіння в товщу порошку. Наслідки цього явища залежать від швидкості проникнення газів. Якщо швидкість проникнення газів не перевищує швидкості горіння, то вплив проникнення газів

обмежується лише деяким збільшенням поверхні горіння, без порушення його рівномірності. За великої швидкості та глибини проникнення газу випереджають фронт горіння й охоплюють шар порошку великої товщини. Цей шар потім швидко згорає, оскільки частинки ВР перед займанням встигли прогрітися. Таке згорання супроводжується підвищенням тиску, що підсилює проникнення газів углиб порошку. Розвиток цього процесу може призвести до виникнення детонації.

### **5.7.7 Фізична основа відмінності між ініціювальними, бризантними ВР та порохами**

Різниця в поведінці бризантних та ініціювальних ВР обумовлена тим, що швидкість горіння ініціювальних ВР така велика, що у разі вільного горіння за атмосферного тиску підвищення тиску біля поверхні палаючої ВР достатнє для того, щоб газу могли проникнути в пори і стійке горіння стало неможливим. Швидкість горіння бризантних ВР за атмосферного тиску для цього недостатня, і такий ефект не спостерігається. Він проявляється під час горіння під зростаючим або під постійним, однак досить високим тиском.

Отже, поняття «ініціювальні» і «бризантні» ВР є умовними. Основним параметром для розподілу цих класів ВР є швидкість горіння за атмосферного тиску. Якщо ця швидкість досить мала, щоб ефект проникнення вглиб речовини був відсутній, то таку речовину відносять до бризантних. Навпаки, якщо це проникнення виражене так сильно, що горіння дуже швидко переходить у детонацію, то речовину відносять до ініціювальних. Цим також пояснюється явище перепресування деяких ініціювальних ВР, що полягає у втраті ними здатності давати швидкий перехід горіння в детонацію. Тому ініціювальні ВР пресують під набагато менших тисків, ніж бризантні ВР.

Порохи за своєю хімічною природою – бризантні ВР, але такої фізичної структури, що стійкість їх горіння значно вища,



ніж бризантних ВР у їх звичайному стані рідини або кристалічного порошку.

Бризантні ВР повинні горіти стійко, без переходу горіння в детонацію. Однак, якщо бризантна ВР пориста або рідка, то за певних умов під час підвищення тиску виникає можливість прискорення горіння внаслідок збільшення ефективної поверхні. За рахунок цього прискорення горіння може стати нестійким. Щоб забезпечити максимальну стійкість горіння, потрібно усунути обидві можливі причини прискорення, обумовлені рідким агрегатним станом і пористістю.

Розглянемо нітрогліцириновий порох, що складається з нітрогліцирину й нітроцелюлози. Обидві ці речовини є самі по собі типовими бризантними ВР, у поєднанні дають типовий порох, що стійко горить і важко детонує. Нітроцелюлоза є твердою пористою речовиною. Нітрогліцирин є рідкою речовиною. У нітрогліцириновому поросі, непористому і нерідкому обидва зазначені механізми прискорення горіння неможливі й перехід горіння в детонацію не спостерігається.

Під час горіння під зростаючим тиском у замкненому об'ємі стійке горіння можливе лише в тому разі, якщо під впливом різкого підняття тиску й температури порушується суцільність речовини. Кристалічні ВР відрізняються малою механічною міцністю і за таких умов горіння можуть руйнуватися. Руйнування суцільної структури призводить до збільшення поверхні горіння і може давати перехід горіння в детонацію. Тому бризантні ВР за допомогою високомолекулярних полімерів переводять в аморфний стан, в якому вони набувають великої механічної міцності, а головне – втрачають здатність дробитися під час впливу швидко зростаючого тиску і різких перепадів температури і зберігають первісну форму своїх частинок. У такому стані бризантні ВР є порохами.

Збереження частинками порошу своєї форми під час горіння дозволяє на основі одного й того самого складу виготовляти заряди з різною тривалістю горіння. Надаючи частинкам порошу

різної форми, можна забезпечити різні зміни їх поверхні в процесі горіння, а отже, й швидкість горіння.

### 5.7.8 Прогресивна й дегресивна форма порохів

Закони горіння порохів встановлюють, що кількість порохових газів і швидкість газоутворення для одних і тих самих порохів залежать від форми і розмірів порохових зерен. Основним фактором, що впливає на швидкість наростання тиску газів під час пострілу, є характер зміни площі поверхні порохового зерна.

Якщо під час горіння пороху в кожную наступну одиницю часу палаюча поверхня зерна зменшується, то горіння пороху називається дегресивним. Під час його горіння в кожную наступну частку часу утворюється все менша кількість газів. До таких порохів належать заряди пістолетних, карабінних і гвинтівкових патронів, зерна яких мають форму пластинок, а також порохів у формі стрічок, куба, прямокутника, трубки, сфери (рис. 24).

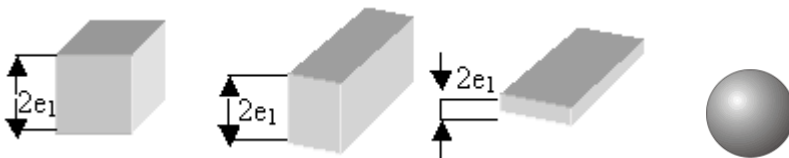


Рисунок 24 – Форми порохів дегресивного горіння, де  $2e_1$  – товщина палаючого зводу

Якщо під час горіння пороху в кожную наступну одиницю часу горіння поверхня зерна залишається постійною, то горіння називають постійним. У кожную наступну частку часу при цьому утворюється майже однакова кількість газів. Прикладом такого пороху можуть бути зерна трубчастої форми з одним каналом.

Таку форму має, наприклад, порох 7,62-мм патрона і зарядів багатьох гарматних систем. Під час горіння такого зерна зовнішня поверхня зменшується, а внутрішня відповідно

збільшується, і надходження газів виходить приблизно постійним (рис. 25 б).

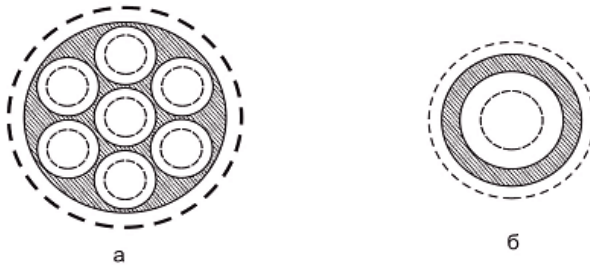


Рисунок 25 – Схематичне зображення горіння порохів:  
а) з сімома каналами; б) з одним каналом

Якщо під час горіння пороху в кожен наступний одиницю часу палаюча поверхню зерна збільшується, то горіння називається прогресивним. У кожен наступний частку часу при цьому утворюється більша кількість газів. Прикладом такого пороху може бути зерно у формі багатоканальної трубки. Таку форму має порох 14,5-мм патрона, гаубичних зарядів і зарядів деяких гармат. Під час горіння такого зерна поверхня горіння збільшується до моменту розпаду трубки на частки неправильної форми, які вже догоряють дегресивним шляхом (рис. 25 а).

Прогресивно палаючий порох забезпечує найбільш раціональне використання енергії бойового заряду під час пострілу, так як дає можливість одержати найбільшу початкову швидкість снаряда за найменшого максимального тиску газів у стовбурі.

Збільшення прогресивності пороху може досягатися:

- раціональним підбором геометричної форми порохового зерна (трубка з 7 каналами дає, наприклад, на 80 % прогресивне горіння);
- флегматизацією пороху, тобто введенням у зовнішні шари зерна речовин, що уповільнюють горіння.

Застосування тієї чи іншої форми пороху залежить від виду вогнепальної зброї та її конструктивних особливостей.

Форма порохів, що застосовуються для вогнепальної зброї, більшою мірою залежить від довжини ствола.

Для довгоствольної зброї (гармати, гвинтівки, кулемети) застосовуються флегматизовані піроксилінові пороху циліндричної форми з одним або декількома каналами.

Для короткоствольної зброї (пістолети, пістолети-кулемети) застосовують тонкі пластинки, що забезпечують швидке горіння й створення в короткий проміжок часу різкого наростання тиску.

Для мінометів використовують також пластинчасті нітрогліцеринові пороху.

## **6 Фізика вибуху**

### **6.1 Види вибухів**

Вибух – це фізичне або хімічне перетворення речовини, що супроводжується вкрай швидким переходом її енергії в енергію стиснення й руху вихідної речовини або продуктів її перетворення і довкілля.

Явище вибуху має дві стадії:

- 1) стадію перетворення енергії того чи іншого виду в енергію сильно стисненої речовини;
- 2) стадію розширення стисненої речовини.

У процесі розширення потенційна енергія стиснення зазвичай переходить у механічну роботу. Ця робота призводить навколишнє середовище в рух, який може викликати її руйнування, якщо виникло напруження, що перевершує межу міцності.

Отже, основною ознакою вибуху є вкрай швидкий прояв дії великого тиску.

Можуть бути різні види вихідної енергії вибуху:

- 1) енергія стислих газів – вибухи балонів із стисненими газами і парових котлів під час руйнування стінок котла або оболонки балона;
- 2) електрична енергія – вибух під час потужного іскрового розряду або під час пропускання електричного струму високої напруги через тонкий металевий дріт. Прикладом подібного роду вибуху в природі є блискавка. Під час потужних іскрових розрядів різниця потенціалів вирівнюється за дуже короткі проміжки часу  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  с, у результаті чого в зоні розряду досягається висока температура до 40 000 °С, що призводить до різкого підйому тиску повітря в місці вибуху і поширення інтенсивного збурення в довкіллі. Вибухи дротиків під дією струму високої напруги пов'язані з швидким переходом металу в газоподібний стан. Водночас досягається температура близько 20 000 °С;
- 3) кінетична енергія тіл, що рухаються – під час зіткненнях тіл, що рухаються з великими швидкостями, може раптово виділитися теплова енергія, достатня для перетворення частини речовини в нагрітий стиснений газ, що призводить до вибуху. Подібного роду вибухи виникають під час падіння великих метеоритів;
- 4) атомна енергія – ядерний вибух відбувається внаслідок ланцюгової реакції швидкого ділення атомних ядер деяких важких металів. Так як питома енергія (енергія на одиницю ваги) під час ядерних вибухів в  $10^7$ – $10^8$  разів вища за питому хімічну енергію, то й сила вибуху відповідно набагато більша;
- 5) хімічна енергія – вибух відбувається за рахунок потенційної хімічної енергії, яка перетворюється в енергію стислих газів у результаті швидкого перебігу хімічної реакції. Речовини, здатні в певних умовах до вибухового перетворення, називаються вибуховими речовинами (ВР).

## 6.2 Умови перебігу хімічної реакції у формі вибуху

Можливість хімічного вибуху визначається чотирма основними умовами, які повинна задовольняти хімічна реакція для того, щоб вона могла проходити у формі вибуху:

- 1) екзотермічність реакції;
- 2) наявність газоподібних речовин у продуктах хімічного перетворення;
- 3) велика швидкість хімічної реакції;
- 4) здатність до самопоширення.

Усі ці умови не є абсолютними та незалежними одна від одної. Чотири умови в своєму поєднанні визначають не лише можливість самопоширення хімічної реакції у формі вибуху.

## 6.3 Форми вибухів

Вибух ВР може перебувати в двох різних формах – гомогенній й перетворення, що самопоширюється.

Якщо поступово нагрівати посуд, наповнений ВР, то під час підвищення температури ВР швидкість реакції його перетворення буде зростати. Якщо перетворення відбувається з виділенням тепла, то температура ВР буде підвищуватися не лише завдяки зовнішньому розігріванню, а й завдяки теплоти реакції. Це саморозігрівання, за певних умов, стає таким, що самоприскорюється, що в свою чергу призводить до різкого прискорення реакції, в результаті якої ВР швидко перетворюється в сильно стислі гази й відбувається вибух.

Гомогенний вибух відбувається тоді, коли за одночасного і рівномірного нагрівання всієї маси ВР і по досягненню певної температури виникає вибухове перетворення одночасно у всій масі речовини.

Вибух, що самопоширюється, відбувається тоді, коли в невеликої частини заряду ВР шляхом сильного розігрівання викликана швидка хімічна реакція. За певних умов ця реакція буде мимовільно поширюватися з великою швидкістю від місця

її збудження до меж заряду. Характерною особливістю такого вибухового перетворення, що самопоширюється, є наявність фронту перетворення – вузької зони інтенсивної хімічної реакції, яка відділяє в кожен даний момент продукти реакції від вихідної речовини, яка ще не прореагувала. Відстань, на яку переміщується фронт реакції в одиницю часу, характеризує швидкість поширення вибухового перетворення.

Внаслідок швидкості, з якою реакція проходить по ВР, газу, що утворюються навіть за відсутності оболонки, мають високий тиск і здійснюють сильний удар по довкіллю, руйнують і розкидають його, а також викликають у ньому ударні хвилі.

## 6.4 Ударні хвилі

У теорії вибуху ударна хвиля – це область стиснення з різким стрибком тиску, густини й температури на передньому фронті, що поширюється в середовищі з надзвуковою швидкістю.

Ударні хвилі, що виникають під час вибуху, можуть поширюватися в будь-яких середовищах: повітрі, воді, ґрунті, бетоні, металі. Найбільш важливим практично і тому найбільш вивченим є випадок ударної хвилі в повітрі. Повітряну ударну хвилю іноді називають також вибуховою хвилею.

Припустимо, що в необмеженому повітряному середовищі є заряд ВР. Під час вибуху цього заряду ВР переходить в газоподібні продукти вибуху, які в перший момент часу займають об'єм, що дорівнює об'єму конденсованого заряду, перебуваючи під дуже високим тиском. Так як тиск у навколишньому повітряному середовищі у багато разів менший за тиск продуктів вибуху, то останні, розширюючись, наносять різкий удар по прилеглим шарам. Завдяки цьому повітря стискається, різко піднімається його тиск, збільшуються густина і температура (рис. 26).

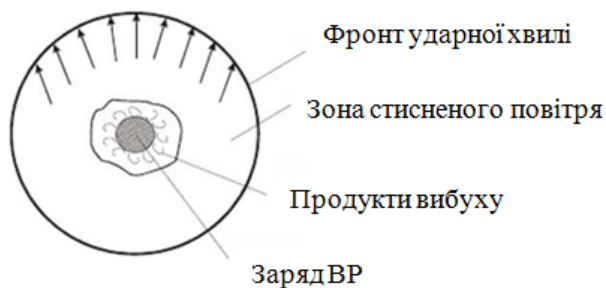


Рисунок 26 – Схема утворення повітряної ударної хвилі

Маса продуктів вибуху, розширюючись, витісняє навколишнє повітря й утворює навколо себе зону стисненого повітря. Ця зона впливає на навколишнє, ще не стиснене повітря і стискає його. Отже, стиснення передається все далі й далі від місця вибуху.

Зовнішня межа стисненого шару повітря являє собою фронт повітряної ударної хвилі, що переміщується з надзвуковою швидкістю від місця вибуху. Отже, під час розширення продуктів вибуху вони зустрічають і витісняють повітря, що оточує заряд.

Під час вибуху в повітрі на критичній відстані  $R_k$  маса продуктів вибуху витісняє в усі сторони рівну собі масу повітря

$$R_k \approx (11-12)r_0,$$

де  $r_0$  – радіус заряду ВР.

На відстані  $R_k$ , тиск продуктів вибуху досягає атмосферного. До цього моменту вибухова хвиля відривається від продуктів вибуху і самостійно поширюється далі в довікклі. Ударна хвиля, що поширюється, втягує в рух все більше частинок середовища. Водночас амплітуда хвилі зменшується з відстанню, в зв'язку з чим зменшується руйнівна дія і вона переходить у звукову хвилю.

Характерною особливістю ударної хвилі є рухомий за нею потік повітряного середовища, спрямований в ту саму сторону, що і ударна хвиля.



Розглянемо зміну тиску в часі в певній точці простору під час проходження ударної хвилі, викликаної вибухом (рис. 27).

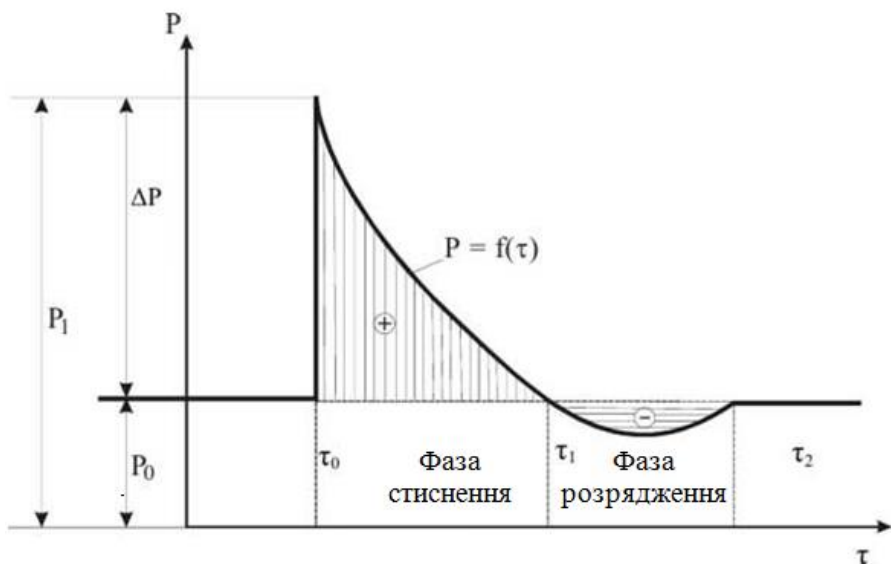


Рисунок 27 – Зміна тиску в часі під час проходження ударної хвилі

У момент приходу ударної хвилі  $\tau_0$  в дану точку простору тиск стрибком підвищується до тиску  $P_1$  на величину  $\Delta P$ . Цей стрибок тиску відбувається миттєво і тому є надзвичайно різким. За фронтом ударної хвилі тиск швидко падає і на моменту часу  $\tau_1$  стає таким, що дорівнює  $P_0$ . Проміжок часу між  $\tau_0$  і  $\tau_1$  називається фазою стиснення. За цією фазою відбувається фаза розрядження, в якій тиск середовища в даній точці простору стає нижчим ніж  $P_0$ , а потім знову зростає до  $P_0$ .

Утворення ударної хвилі можна подати за такою схемою (рис. 28).

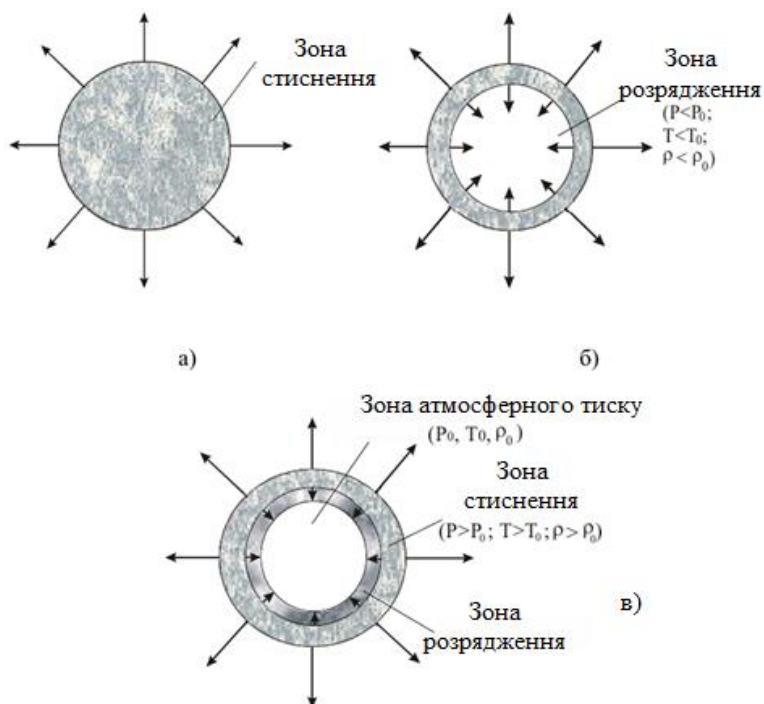


Рисунок 28 – Схема утворення ударної хвилі, зони стиснення, розрядження, атмосферного тиску:

- ударна хвиля в момент її утворення;
- утворення зони розрядження;
- утворення зони атмосферного тиску

## 6.5 Гідродинамічна теорія ударної хвилі

Ударна хвиля формується під час поширення хвиль тиску. Виникнення й поширення ударної хвилі в повітрі можна подати на прикладі простої моделі з поршнем (рис. 29).

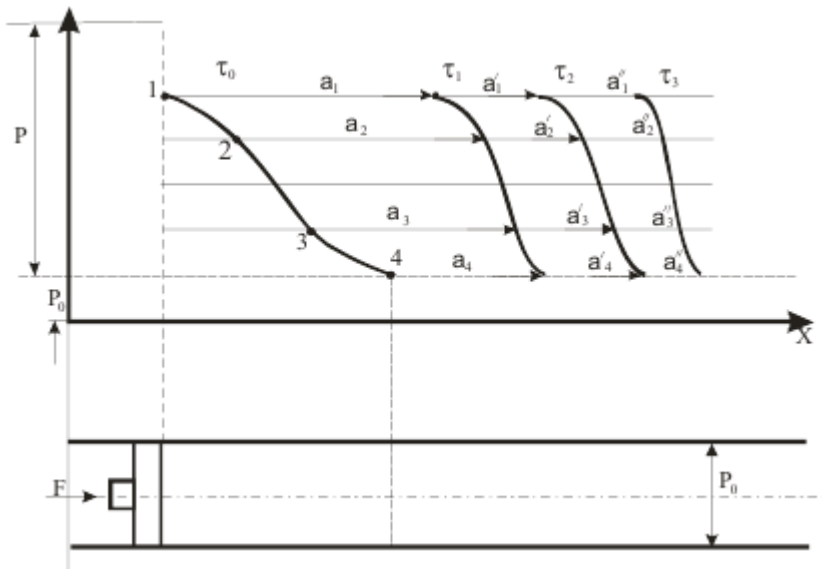


Рисунок 29 – Схема утворення ударної хвилі поршнем, що рухається

У циліндричну трубу з одного кінця поміщений поршень, інший її кінець відкритий. У початковий момент часу тиск у трубі дорівнює атмосферному. Якщо поршень різко перемістити вправо, то повітря в трубі ущільниться. У самого поршня тиск буде найбільшим, а через наближення до відкритого кінця він буде падати до атмосферного. Крива розподілу тисків, зафіксованих в один і той самий момент часу, позначена цифрами 1, 2, 3, 4. Ця хвиля тиску буде поширюватися до відкритого кінця труби. Швидкість поширення такого стиснення дорівнює місцевій швидкості звуку. Під час стиснення газ нагрівається, і швидкість звуку в ньому стає більша. У місцях найбільшого стиснення температура повітря буде найвищою ( $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$ ), відповідно  $a_1 > a_2 > a_3 > a_4$  і, поєднуючи їх кінці, одержимо форму фронту хвилі, яку він матиме в момент часу  $\tau_1$ . Хвиля стає більш крутою. Продовжуючи таку побудову далі, бачимо, що хвиля перетвориться в поверхню розриву, що

розділяє області з істотно різними тисками. Отже, хвиля тиску, поширюючись у просторі, перетворюється на ударну хвилю.

Для того щоб рухомий поршень міг створити ударну хвилю, швидкість його повинна бути досить великою, але необов'язково надзвуковою.

Розглянута схема утворення ударної хвилі рухомим поршнем може бути застосована і до механізму утворення ударної хвилі під час вибуху. Стиснені до високого тиску газоподібні продукти вибуху відіграють роль своєрідного поршня, що впливає на довкілля в усіх напрямках і створює в ньому ударну хвилю.

### 6.6 Основні рівняння гідродинамічної теорії ударної хвилі

Розглянемо схему з поршнем, що рухається (рис. 30).

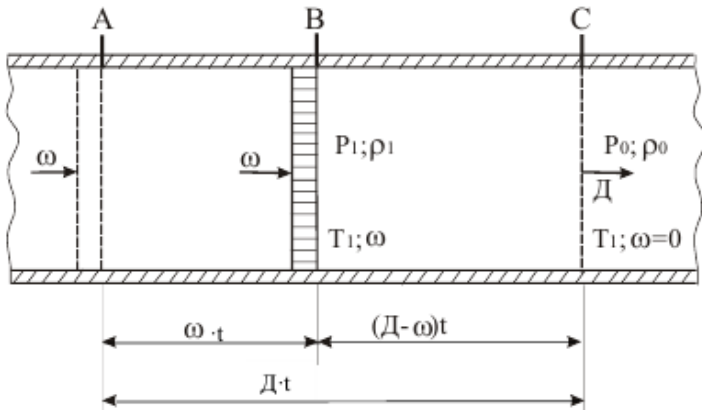


Рисунок 30 – Схема до виведення основних рівнянь гідродинамічної теорії ударної хвилі

Припустимо, що в трубі перетином  $S$ , заповненої газом, рухається поршень зі сталою швидкістю. Під дією поршня в газі виникає ударна хвиля – область стиснення, що поширюється в незбурений газ.

На передньому фронті ударної хвилі відбувається стрибкоподібна зміна тиску, густини й температури газу. Стиснений поршнем газ буде рухатися зі швидкістю поршня  $\omega$ , фронт ударної хвилі буде поширюватися в незбурений газ зі швидкістю  $D$ , більшою ніж  $\omega$ .

Припустимо, що в початковий момент поршень розміщений у площині  $A$ , через проміжок часу  $t$  поршень буде перебувати в площині  $B$ . Фронт ударної хвилі в початковий момент також розміщений у площині  $A$ , а в момент  $t$  він буде перебувати в площині  $C$ . Позначимо через  $P_0, \rho_0, T_0$  відповідно тиск, густину й температуру газу в початковому стані, а через  $P_1, \rho_1$  і  $T_1$  – тиск, густину й температуру газу, стисненого ударною хвилею. З рисунка 30 випливає, якщо за час  $t$  поршень пройшов відстань  $\omega t$ , то ударна хвиля пройде відстань  $Dt$ , відстань між поршнем і переднім фронтом ударної хвилі буде  $(D - \omega) \cdot t$ . Звідси об'єм стисненого газу дорівнює  $(D - \omega) \cdot t \cdot S$ , а первинний об'єм тієї самої кількості газу був  $D \cdot t \cdot S$ . Маса стисненого газу дорівнює  $\rho_1 \cdot (D - \omega) \cdot t \cdot S$ , а маса газу перед стисненням  $\rho_0 \cdot D \cdot t \cdot S$ . Оскільки в процесі стиснення маса речовини не змінюється, то  $\rho_0 \cdot D \cdot t \cdot S = \rho_1 \cdot (D - \omega) \cdot t \cdot S$ , або рівняння збереження маси під час стиснення:

$$\rho_0 D = \rho_1 (D - \omega).$$

Стиснений газ рухається зі швидкістю  $\omega$  і, отже, під час стиснення маси  $\rho_0 D \cdot t \cdot S$  набуває кількість руху  $\rho_0 D \cdot t \cdot S \cdot \omega$ .

За другим законом Ньютона зміна кількості руху дорівнює імпульсу сили, тобто добутку сили на час її дії. Результуюча сила, що діє на газ між поршнем і площиною  $C$  дорівнює  $(P_1 - P_0) \cdot S$ , а її імпульс за час  $t$  дорівнює  $(P_1 - P_0) \cdot S \cdot t$ . Прирівнюючи зміну кількості руху до величини імпульсу, одержимо:

$$(P_1 - P_0) S t = \rho_0 \cdot D \cdot t \cdot S \cdot \omega,$$

або рівняння збереження кількості руху під час стиснення газу

$$P_1 - P_0 = \rho_0 \cdot D \cdot \omega.$$

## 6.7 Детонаційні хвилі

Два основні режими вибухового перетворення горіння і детонація відрізняються, насамперед, механізмом передачі енергії реакції від шару до шару. Процес горіння поширюється зі швидкістю, значно меншою, ніж швидкість звуку, тому тиск у всьому об'ємі, де перебуває ВР, залишається практично сталим. Детонаційний режим вибухового перетворення пов'язаний із проходженням вибуховою системою різкого стрибка тиску – ударної хвилі. Водночас черговий шар ВР піддається дуже різкому удару з боку продуктів розкладання попереднього шару, що мають дуже високий тиск. Швидке й сильне стиснення викликає нагрівання ВР до високої температури, за якої реакція її розкладання відбувається з великою швидкістю. Теплота, що виділяється під час цієї реакції, обумовлює підтримання енергії ударної хвилі, що стискає наступний шар ВР. Оскільки передача енергії шляхом ударного стиснення відбувається набагато швидше, ніж шляхом теплопередачі, то процес у цьому разі поширюється зі швидкістю, у багато разів більшою, ніж під час горіння. Швидкість поширення детонації ВР визначається швидкістю ударної хвилі в даній речовині і становить кілька кілометрів за 1 секунду.

Детонація в конденсованих ВР буде виникати й поширюватися у тому разі, якщо реакція в охопленому ударною хвилею шарі відбувається зі швидкістю, достатньою для того, щоб її енергія могла підтримувати поширення ударної хвилі. Інтенсивність ударної хвилі, що виникає під час детонації шару ВР, повинна бути достатньою, щоб викликати такий самий процес у сусідньому шарі.

Детонаційна хвиля на відміну від ударної не згасає з відстанню, а поширюється по ВР зі сталою швидкістю.

Для детонаційної хвилі  $P_1 \gg P_0$ , тому значенням  $P_0$  можна знехтувати. Тоді для детонації одержуємо

$$P_1 = \rho_0 \cdot D \cdot U,$$

де  $P_1$  – тиск у фронті детонаційної хвилі;  $\rho_0$  – густина ВР;  $D$  – швидкість детонації;  $U$  – швидкість руху продуктів детонації.

Для детонації маємо співвідношення

$$D - U = C,$$

де  $C$  – швидкість звуку в продуктах детонації.

Величина  $D - U$  є швидкість, з якою поширюється детонаційна хвиля щодо продуктів вибуху, які самі рухаються в той самий бік зі швидкістю  $U$ . Отже, швидкість поширення детонації щодо продуктів детонації дорівнює швидкості звуку в продуктах детонації.

Умова  $D - U = C$  означає, що на практиці здійснюється найменша можлива швидкість детонації для даної ВР. Після детонаційної хвилі йде хвиля розрядження, яка поширюється зі швидкістю звуку в даному середовищі. Хвиля розрядження поширюється по продуктам детонації з тією самою швидкістю, що і детонаційна хвиля щодо продуктів. Це означає, що навіть якщо за допомогою дуже сильного ініціатора вдасться створити в ВР детонаційну хвилю, а отже, і хвилю розрядження, що поширюються зі швидкістю більше, ніж властива цьому ВР стійка швидкість детонації, то хвиля розрядження наздожене детонаційну хвилю, послабить її, зменшить тиск і відповідно зменшить швидкість її поширення.

Для наближеного розрахунку параметрів детонаційної хвилі ( $P$  – тиск у фронті детонаційної хвилі, кПа;  $D$  – швидкість детонації, м/с;  $U$  – швидкість поширення продуктів детонації, м/с;  $\rho$  – щільність продуктів детонації, г/см<sup>3</sup>) за початкової щільності ВР  $\rho_0 = (1 - 1,8)$  г/см<sup>3</sup> використовуються такі формули:

$$P = \rho_0 D^2 / 4, \quad U = D / 4, \quad \rho = 4 \rho_0 / 3.$$

## 6.8 Детонація газів

Повільне рівномірне горіння стійке лише в тому разі, якщо воно не супроводжується підвищенням тиску. Коли горіння відбувається в замкненому просторі або вихід газів ускладнений, продукти реакції не лише нагрівають прилеглий до фронту полум'я шар незгорілого газу методом теплопровідності, а й розширюються завдяки високій температурі й призводять незгорілий газ у рух. Гальмування шару газу, який прилягає до стінок, веде до нерівномірності швидкості руху по перерізу трубки. Полум'я розтягується в напрямку поширення, збільшується поверхня фронту горіння і кількість газу, що згорає в одиницю часу. Прискорення поширення полум'я посилює стиснення незгорілого газу перед фронтом полум'я. Це стиснення поширюється по незгорілому газу у вигляді послідовних слабких ударних хвиль. Кожна наступна хвиля йде зі швидкістю більшою, ніж попередня, і відповідно наздоганяє її. На деякій відстані перед фронтом полум'я сукупність слабких ударних хвиль з'єднується в одну потужну ударну хвилю. Виникнення такої хвилі призводить до сильного стискання й розігрівання газу. Коли температура в ударній хвилі стане досить високою, виникає новий стійкий режим поширення реакції – детонація.

Виникнення детонаційної хвилі відбувається на деякій відстані перед фронтом полум'я, раніше, ніж полум'я підійде до цієї точки.

Розглянемо шлях полум'я, що прискорюється (рис. 31) в координатах «час – відстань» уздовж осі трубки, який представлений кривою OD. Слабкі ударні хвилі, що послідовно відходять, показані лініями OA, N<sub>1</sub>A, N<sub>2</sub>A, N<sub>3</sub>A.

Детонація виникає в точці A тоді, коли фронт полум'я розміщений у точці E. Вправо від точки A поширюється детонаційна хвиля AB, вліво – також детонаційна хвиля AD, що перетворюється після зустрічі з фронтом полум'я в ударну (так



звану ретонаційну) хвилю DC, що поширюється продуктами горіння.

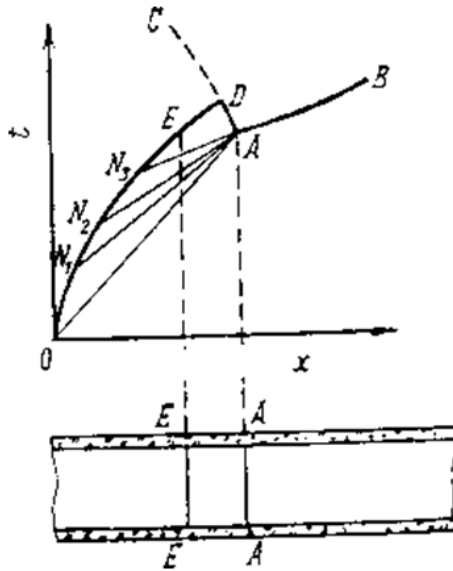


Рисунок 31 – Схема поширення ударних хвиль під час горіння, що прискорюється, і виникнення детонації

Однією з характеристик схильності горіння газової суміші до переходу в детонацію є величина переддетонаційної ділянки – відстані від місця займання до місця виникнення детонації.

Існують критичні значення складу і тиску, що обмежують область, поза якою мимовільний перехід горіння в детонацію неможливий. Інтервал між цими концентраційними межами коротший, ніж інтервал горючості.

Зі збільшенням діаметра трубки виникнення детонації газових сумішей ускладнюється.

Шорсткість стінок трубки сильно скорочує переддетонаційну ділянку і розширює концентраційні межі переходу горіння в детонацію.

На довжину переддетонаційної ділянки істотно впливає характер початкового імпульсу. Від вибуху капсуль-детонатора детонація газів починається практично миттєво. Під час запалення електричною іскрою виникає горіння, яке лише після порівняно великої ділянки розгону може перейти в детонацію.

Під час зміни складу газової суміші швидкість детонації змінюється. Для кожної суміші існує деякий склад, що дає максимальну швидкість детонації.

Інертні домішки зменшують швидкість детонації газових сумішей, так як вони знижують температуру, що досягається під час детонації. Однак, коли наявність домішок зменшує середню молекулярну масу продуктів вибуху, швидкість детонації зростає. Наприклад, хімічно інертні гази аргон і гелій, які мають однакову теплоємність, надають під час невеликого вмісту різну дію на швидкість детонації суміші водню з киснем. У цій реакції продуктом детонації є вода (молекулярна маса 18 г/моль). Аргон (молекулярна маса 39 г/моль) зменшує швидкість детонації, а гелій (молекулярна маса 4 г/моль) збільшує. За великого вмісту інертної домішки швидкість детонації зменшується як за наявності аргону так і гелію.

Підвищення тиску збільшує швидкість детонації газів.

## **6.9 Вибух пилоповітряної суміші**

Практично будь-який горючий матеріал, розпилений у повітрі в тонкоподрібненому вигляді, може дати під час підпалювання пиловий вибух. Відомі вибухи, в яких у вигляді пилу брали участь матеріали від вугілля й сажі до крохмалю, борошна та вовни.

Швидкість поширення пилових вибухів зазвичай менша, ніж газових, так як поверхня контакту реагентів менша і внаслідок цього теплові втрати більші.

Тиск, що досягається під час пилових вибухів, такого самого порядку, що і під час газових вибухів, так як теплота горіння на одиницю об'єму пилоповітряної суміші більша, ніж газової.

Як і в разі газових сумішей, існують нижня і верхня межі горючості пилоповітряних сумішей за концентрацією.

Під час зменшення вмісту кисню в газовій фазі, температура займання пилоповітряної суміші зростає й сприйнятливість до вибуху зменшується.

Під час зменшення розмірів частинок нижня концентраційна межа знижується, а максимальний тиск і швидкість його наростання зростають. За дуже дрібних частинок подальше зменшення їх розмірів не тягне за собою збільшення тиску.

Вибухонебезпечність вугільного пилу зростає зі збільшенням вмісту летких речовин у вугіллі.

Відносна вибухонебезпечність пилу різних матеріалів характеризується мінімальною кількістю інертного пилу, яку потрібно додати до горючого пилу, щоб запобігти поширенню полум'я за певних умов займання. Чим інтенсивніше запальник, тим більше необхідна добавка інертного пилу.

Для боротьби з поширенням пилових вибухів у вугільних шахтах використовують влаштування заслонів з інертного пилу (тальк, слюда), які розміщуються в ємностях, що легко перекидаються, на шляху можливого поширення вибуху. Хмара інертного пилу припиняє поширення вибуху.

## **6.10 Детонація конденсованих ВР**

Детонація в конденсованих ВР буде виникати й поширюватися у тому разі, якщо реакція в охопленому ударною хвилею шарі відбувається зі швидкістю, достатньою для того, щоб її енергія могла підтримувати поширення ударної хвилі. Інтенсивність ударної хвилі, що виникає під час детонації шару ВР, повинна бути достатньою, щоб викликати такий самий процес у сусідньому шарі. Швидкість поширення детонації не залежить від інтенсивності початкового імпульсу, якщо ця інтенсивність достатня для збудження стійкої реакції.

У конденсованих ВР можливі два різні механізми збудження реакцій вибухового перетворення. Реакція може, як і в газах,

виникати внаслідок підняття температури в шарі речовини, стисненої ударною хвилею. Однак, зважаючи на малу стисненість конденсованих ВР порівняно із газами, розігрівання, достатнє для досягнення швидкості реакції, може виникнути лише за швидкості детонації близько 6–8 км/с. У разі ВР, що детонують із меншою швидкістю, розігрівання за рахунок стиснення виявляється недостатнім, щоб реакція розкладання мала велику швидкість.

Детонація порошкоподібних ВР – це своєрідне вибухове горіння окремих частинок ВР. Ці частинки спалахують унаслідок стиснення газових включень (бульбашок газу), що розміщені між частинками ВР або струменями гарячих продуктів вибуху, що проникають у пори порошкоподібної речовини й охоплюють частинки ВР полум'ям. Під час займання цих частинок вони згорають під великим тиском із великою швидкістю, достатньою для підтримання інтенсивної ударної хвилі.

Швидкість детонації цієї ВР за виконання певних умов є її константою. Для заряду циліндричної форми, детонація якого збуджується з одного з торців, такими умовами є максимальна щільність і діаметр, що перевищує певну величину, так званий граничний діаметр  $d_{гр}$ .

Розглянемо залежність швидкості детонації заряду ВР від його діаметра (рис. 32).

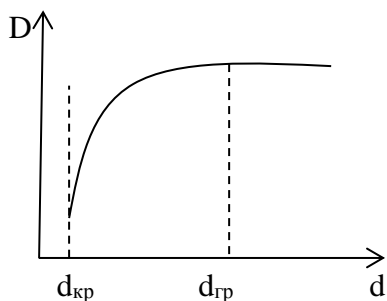


Рисунок 32 – Залежність швидкості детонації від діаметра заряду ВР

Під час діаметра заряду, більшого від граничного, швидкість детонації залишається сталою. Якщо брати діаметр заряду, менший від граничного, то швидкість детонації також буде меншою. Однак нижче від деякого мінімального, так званого критичного діаметра  $d_{кр}$  детонація щодо заряду поширюватися не буде. Найменший діаметр заряду, за якого ще можлива стійка, без загасання, детонація, беруть як критичний. За діаметрів заряду, нижчих від граничного, але більших від критичного швидкість детонації залежить від наявності оболонки заряду, розмірів частинок ВР та від фізичної структури ВР. Ці чинники також впливають на величину критичного діаметра. Критичний діаметр та швидкість детонації є найважливішими характеристиками ВР.

## 7 Руйнівна дія вибуху

Розрізняють дві форми роботи вибуху: бризантної дії й фугасної (загальної) дії.

Бризантною називають дію вибуху у формі дроблення, подрібнення й пробивання середовища, що стикається із зарядом ВР. Ця форма роботи обумовлена ударом продуктів детонації, що перебувають за дуже високого тиску і виявляється лише безпосередньо біля заряду на відстанях 2—2,5 радіуса заряду. Робота у формі бризантної дії вибуху визначається густиною енергії у фронті детонаційної хвилі:  $A_{бр} = K\rho_0 D^2$ , де  $K$  — коефіцієнт, що залежить від властивостей середовища;  $\rho_0$  — густина заряду ВР;  $D$  — швидкість детонації.

Фугасна дія — це робота вибуху у формі розколювання і відкидання середовища з утворенням воронки викиду за неглибокого залягання заряду. Фугасна дія зумовлена розширенням продуктів детонації до порівняно невисоких тисків і проходження ударної хвилі. Величина роботи у формі фугасної дії проявляється на певній відстані від заряду й визначається повною кількістю енергії, що виділилася під час

вибуху:  $A_{\phi} = Q' C$ , де  $Q'$  — питома теплота вибуху;  $C$  — вага заряду.

Дія вибуху заряду ВР схематично подана на рисунку 33.

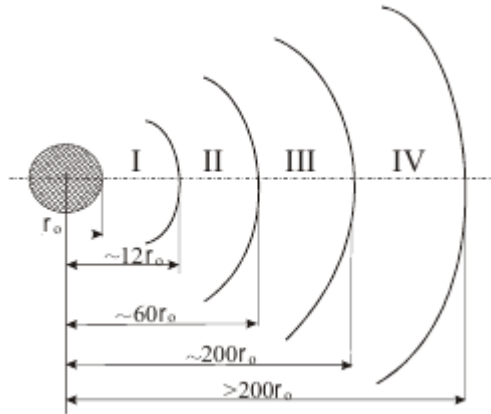


Рисунок 33 – Схема дії вибуху під час виникнення та поширення ударної хвилі

У зоні I (зона бризантної дії) руйнування завдається в основному продуктами вибуху. У цій зоні відбувається розширення продуктів вибуху й утворення ударної хвилі. На межі зони відбувається відрив ударної хвилі від продуктів вибуху.

У зоні II (зона фугасної дії) руйнування наносяться осколками від корпусу, в який був поміщений заряд, різними твердими предметами, відкинутими під час вибуху з великою швидкістю. Тут хвиля володіє великою інтенсивністю, що забезпечує руйнування зустрічних перешкод.

У зоні III (зона слабких ударних хвиль) відбувається надзвуковий хвилеподібний рух мас повітря з тенденцією загасання.

У зоні IV (зона звукових хвиль) ударна хвиля вироджується і переходить у звукову.

## 7.1 Основні чинники руйнівної дії ударних хвиль

Для повного оцінювання руйнівної дії вибуху необхідно знати характер навантаження й властивості споруди, на яку діє це навантаження. Найбільш повна характеристика навантаження дається завданням зміни надлишкового тиску від часу.

У деяких випадках можна спростити задачу і вважати, що руйнівна дія ударної хвилі визначається або надлишковим тиском на її фронті  $\Delta P$  або величиною питомого імпульсу фази стиснення  $I_+ = \int_0^{t_+} \Delta P(t) dt$ .

Ударна хвиля дуже потужного вибуху досить інтенсивна на великій відстані та має велику протяжність у часі. Час дії фази стиснення  $t_+$  такої ударної хвилі зазвичай перевершує період власних коливань елементів споруди  $T$ . Отже, якщо час дії фази стиснення набагато більший періоду власних коливань споруди  $t_+ \gg T$ , то руйнівна дія переважно визначається величиною надлишкового тиску. В цьому разі час існування надлишкового тиску в хвилі  $t_+$  не входить в характеристику руйнівної дії. Якщо тиск досить великий, то споруда деформується і зруйнується за такий час, за який тиск в ударній хвилі не встигне впасти скільки-небудь значно. Якщо тиск недостатній, і викликана ним деформація споруди з самого початку не призведе до руйнування, то споруда не зруйнується і в наступні моменти, коли тиск почне падати.

Цей випадок, коли руйнування визначається надлишковим тиском, називається статичною дією ударної хвилі.

Якщо ударна хвиля викликана вибухом малої потужності, наприклад одиночного боеприпасу, то на тих відстанях, де ударна хвиля ще є досить інтенсивною, тривалість фази стиснення  $t_+$  менше періоду власних коливань споруди  $T$ . У разі коли  $t_+ \ll T$ , тиск за фронтом впаде за настільки короткий проміжок часу, що споруда практично ще не встигне зрушити з місця. Однак під дією імпульсу фази стиснення спорудження придбає деяку кількість руху й буде надалі зруйновано, якщо ця

кількість руху виявиться достатнім, щоб викликати граничну деформацію. В цьому разі руйнування відбудеться вже після того, як фаза стиснення пройде.

Цей випадок, коли руйнування визначається повідомленим спорудженню імпульсом фази стиснення, називається імпульсивною дією ударної хвилі.

## 7.2 Закон подібності під час вибуху, тротиловий еквівалент

Закон подібності під час вибуху дозволяє оцінювати і порівнювати величини надлишкових тисків ударних хвиль, викликаних вибухом різних зарядів.

Найпростішим випадком закону подібності під час вибуху є геометричний закон подібності, згідно з яким відстань, на якій спостерігається деяке значення надлишкового тиску на фронті хвилі, пропорційна радіуса заряду.

Наприклад, якщо заряд радіусом  $r_1$  дає надлишковий тиск  $\Delta P$  на відстані  $R_1$ , то заряд радіусом  $r_2$  дасть такий самий тиск на відстані  $R_2$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{r_1}{r_2}.$$

Якщо потрібно визначити, який надлишковий тиск  $\Delta P$  буде спостерігатися на відстані  $R$ , то згідно геометричному закону подібності

$$\Delta P = f\left(\frac{r}{R}\right).$$

У цьому разі вид функції повинен бути встановлений з експерименту.

Геометричний закон подібності може бути застосований лише до зарядів однієї й тієї самої ВР і під час їх однакової густини.

Якщо брати заряди з різною густиною, то замість радіуса заряду беруть величину  $\sqrt[3]{C}$ , де  $C$  – вага заряду ВР.

Закон подібності в цьому разі називається узагальненим геометричним законом подібності. Згідно з цим законом,



відстань, на якій спостерігається деяке значення надлишкового тиску на фронті хвилі, пропорційна кореню кубічному з ваги заряду.

Наприклад, якщо заряд вагою  $C_1$  дає надлишковий тиск  $\Delta P$  на відстані  $R_1$ , то заряд вагою  $C_2$  дасть такий самий тиск на відстані  $R_2$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\sqrt[3]{C_1}}{\sqrt[3]{C_2}}.$$

Якщо потрібно визначити, який надлишковий тиск  $\Delta P$  буде спостерігатися на відстані  $R$ , то згідно узагальненому геометричному закону подібності

$$\Delta P = f\left(\frac{\sqrt[3]{C}}{R}\right).$$

У цьому разі вид функції повинен бути встановлений з експерименту.

Величину  $\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{C}}$  називають наведеною відстанню.

Надлишковий тиск – функція наведеної відстані

$$\Delta P = f(\bar{R}).$$

При  $\bar{R} < 1$  на довкілля діють як ударна хвиля, так і продукти вибуху. При  $\bar{R} \geq 1$  об'єкт піддається дії лише ударної хвилі.

Якщо взяти заряди різних ВР однакової ваги, але різної енергії, то заряд із більшою енергією виявиться на однаковій відстані більш сильним. Енергія ударної хвилі, з якою пов'язано її руйнівну дію, залежить не від ваги заряду, а від енергії вибуху  $E = Q \cdot C$ . Отже, основним параметром закону подібності під час вибуху повинен бути не параметр  $\frac{\sqrt[3]{C}}{R}$ , а параметр  $\frac{\sqrt[3]{E}}{R}$

$$\Delta P = f\left(\frac{\sqrt[3]{E}}{R}\right).$$

Цей варіант носить назву енергетичного закону подібності під час вибуху. Його можна застосовувати не лише для порівняння вибухів зарядів різних ВР, а й для вибухів різної

природи. Для порівняння цих вибухів необхідно знати енергію, що виділилася в кожному випадку.

Однак на практиці часто використовують критерій  $\frac{\sqrt[3]{C}}{R}$ , в який входить вага заряду, але так, що він по суті стає енергетичним. Для цього як вагу заряду підставляють величину його тротилового еквівалента, тобто вагу такого заряду тротилу, енергія якого дорівнює енергії вибуху цього заряду

$$C_{\text{екв}} = C \frac{Q'}{Q'_{\text{ТНТ}}},$$

де  $C$  – вага даного заряду вибухової речовини, кг;  $Q'$  – питома теплота вибуху заряду ВР;  $Q'_{\text{ТНТ}} = 1\,000$  ккал/кг – питома теплота вибуху тротилу. Використовуючи тротильовий еквівалент, по суті вводять своєрідну одиницю енергії: 1 кг ТНТ – 1000 ккал.

Наприклад, розрахуємо тротильовий еквівалент заряду гексогену вагою 2,5 тонни, питома теплота вибуху гексогену 1 300 ккал/кг

$$C_{\text{екв}} = 2\,500 \frac{1\,300}{1\,000} = 3\,250 \text{ кг.}$$

Отже, енергія вибуху заряду гексогену вагою 2 500 кг дорівнює енергії вибуху 3 250 кг тротилу.

Вид функції  $\Delta P = f\left(\frac{\sqrt[3]{C}}{R}\right)$  експериментально визначено для тротилу. Тому, якщо замість ваги заряду даної ВР підставляти її тротильовий еквівалент, то ця залежність може бути використана для будь-якого виду вибуху.

Для тротилу залежність надлишкового тиску на фронті ударної хвилі від наведеної відстані  $\Delta P = f(\bar{R})$  подана на рисунку 34.

Наприклад, потрібно визначити надлишковий тиск на фронті ударної хвилі на відстані 50 м під час вибуху заряду гексогену вагою 2,5 тонни на поверхні землі.

У попередньому прикладі ми знайшли, що заряд гексогену вагою 2,5 тонни еквівалентний 3 250 кг тротилу. Розраховуємо наведену відстань

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{C_{\text{екв}}}} = \frac{50}{\sqrt[3]{3250}} = 3,4.$$

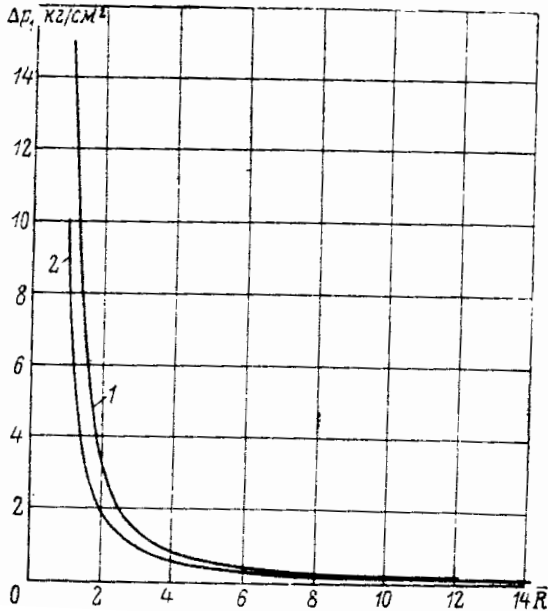


Рисунок 34 – Залежність надлишкового тиску на фронті ударної хвилі від наведеної відстані для тротилу:

- 1 – вибух на поверхні землі;
- 2 – вибух у повітрі

Знаючи наведену відстань, можна знайти надлишковий тиск або за графіком (рис. 34) або за формулами Садовського під час вибуху в повітрі:

$$\Delta P = \frac{0,84}{\bar{R}} + \frac{2,7}{\bar{R}^2} + \frac{7,0}{\bar{R}^3} \text{ кг/см}^2$$

і під час вибуху на поверхні землі:

$$\Delta P = \frac{1,06}{\bar{R}} + \frac{4,3}{\bar{R}^2} + \frac{14,0}{\bar{R}^3} \text{ кг/см}^2.$$

Якщо ж потрібно визначити, на якій відстані від центру вибуху буде певний надлишковий тиск, то за графіком (рис. 34) знаходимо відповідну цьому тиску наведену відстань і за формулою

$$R = \bar{R} \cdot \sqrt[3]{C_{\text{екв}}}$$

визначаємо цю відстань.

Найчастіше потрібно вирішити зворотну задачу. Наприклад, стався вибух на землі в межах міста. Розрахувати тротилевий еквівалент вибуху.

Найбільш просто це завдання вирішується за наявності розбитих вікон. Відомо, що скління руйнується за мінімального надлишкового тиску  $\Delta P = 0,05 \text{ кг/см}^2$ . Знаходимо за графіком (крива 1 рис. 34), що цьому надлишковому тиску відповідає наведена відстань  $\bar{R} = 19$ . Припустимо, що відстань від місця вибуху до найвіддаленішого розбитого вікна  $R = 30 \text{ м}$ . Тоді тротилевий еквівалент вибуху

$$C_{\text{екв}} = \frac{R^3}{\bar{R}^3} = \frac{30^3}{19^3} = 3,9 \text{ кг}.$$

Отже, якщо підірвати 3,9 кг тротилу, то характер руйнувань буде приблизно таким самим.

### 7.3 Відстані, безпечні за дією ударної хвилі

Завдання визначення відстані, безпечної за дією ударної хвилі, має велике практичне значення.

Якщо руйнівна дія визначається надлишковим тиском на фронті ударної хвилі, то безпечним вважають відстань  $R_{\text{без}}$ , на якій надлишковий тиск не перевищить деякого критичного значення, вже недостатнього для руйнування певної споруди

$$R_{\text{без}} = K_1 \sqrt[3]{C_{\text{екв}}},$$

де  $K_1$  – коефіцієнт, який характеризує властивості об'єкта, що руйнується.

Якщо руйнування визначається величиною імпульсу ударної хвилі, безпечна відстань розраховується за формулою

$$R_{\text{без}} = K_2 \sqrt[3]{C_{\text{ЕКВ}}^2},$$

де  $K_2$  – коефіцієнт, який характеризує властивості об'єкта, що руйнується.

В «Єдиних правилах безпеки під час вибухових робіт» відстані, безпечні за дією ударної хвилі, рекомендується обчислювати за усередненою формулою:

$$R_{\text{без}} = K \sqrt{C_{\text{ЕКВ}}}$$

Значення коефіцієнта  $K$  наводяться в «Єдиних правилах безпеки під час вибухових робіт».

#### 7.4 Ударні хвилі в ґрунті

Розглянемо вибух заряду в ґрунті, який був закладений на значній глибині так, що на поверхні не спостерігається будь-яких ефектів (рис. 35). Такий заряд називають зарядом камуфлету.

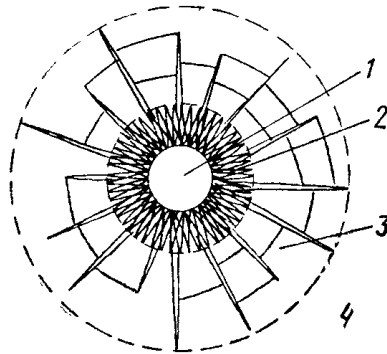


Рисунок 35 – Схема розміщення зон дії вибуху в ґрунті:

1 – зона витіснення; 2 – зона роздавлювання;

3 – зона розривів; 4 – зона струсу

Розрізняють чотири зони дії вибуху на гірську породу: зону витіснення, зону роздавлювання, зону розривів і зону струсу.

Зона витіснення, або зона стиснення, – це область, з якої продукти вибуху повністю витиснули ґрунт, утворивши порожнину, так званий котел.

Зона роздавлювання – це область, в якій ґрунт інтенсивно роздроблений і роздавлений у результаті дії хвиль стиснення.

Зона розривів – це область, в якій ударна хвиля вже ослабла і не може роздавити породу стисненням, проте речовина середовища отримує значне радіальне зміщення від центру вибуху. Це призводить до появи радіальних тріщин.

Зона струсу – це область, в якій ударна хвиля настільки ослаблена, що вже не може порушити зв'язок між частинками ґрунту і робить лише струс.

Розмір кожної зони можна оцінити за законом подоби. Під час вибуху заряду розширення порожнини припиняється, якщо надлишковий тиск досягне певного значення, яке буде різним для різних ґрунтів. Оскільки надлишковий тиск – функція наведеної відстані, то цьому значенню надлишкового тиску  $\Delta P_1$  буде відповідати наведена відстань

$$\overline{R}_1 = \frac{R_{\text{вит}}}{\sqrt[3]{C_{\text{екв}}}},$$

де  $R_{\text{вит}}$  – радіус зони витіснення.

Роздавлювання ґрунту припиниться, коли надлишковий тиск впаде до значення  $\Delta P_2$ , якому буде відповідати наведена відстань

$$\overline{R}_2 = \frac{R_{\text{розд}}}{\sqrt[3]{C_{\text{екв}}}},$$

де  $R_{\text{розд}}$  – радіус зони роздавлювання.

Аналогічно можуть бути написані вирази й для інших зон.

Наблизимо тепер заряд до поверхні ґрунту або збільшимо його вагу. Уявімо, що заряд розміщений у ґрунті на відстані  $R'$  від вільної поверхні, причому  $R'$  трохи більше радіуса зони розривів. В області, що примикає до поверхні, полегшиться рух середовища, що додатково буде сприяти появі розтягувальних сил. У результаті, якщо в суцільному середовищі на відстані  $R'$  ґрунт залишиться цілим, то поблизу вільної поверхні він буде

інтенсивно зруйнований. Область руйнування має вигляд воронки, яка називається воронкою розпушення (рис. 36).

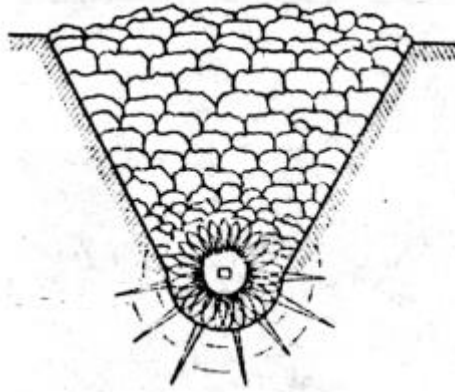


Рисунок 36 – Схема воронки розпушення в ґрунті

Якщо заряд, який утворює воронку розпушення, наблизити до поверхні або збільшити його вагу, то частина зруйнованого ґрунту буде викинута. Під час викидання ґрунту утворюється воронка викиду (рис. 37).

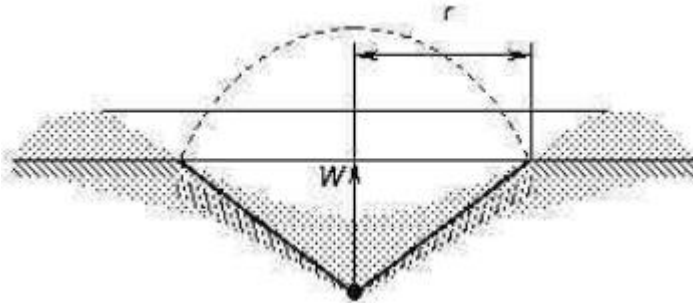


Рисунок 37 – Схема воронки викиду в ґрунті

Під час розрахунків зазвичай припускають, що воронка викиду є конус, у вершині кута якого розміщений заряд, що підривається. Воронку викиду характеризують відношенням її радіуса  $r$  до глибини  $W$ . Глибину часто називають лінією найменшого опору. Відношення

$$\frac{r}{W} = n,$$

де  $n$  – показник дії вибуху.

Воронки, в яких  $n = 1$ , називають воронками нормального викиду, а воронки, в яких  $n > 1$ , називають воронками посиленого викиду.

У розрахунках зарядів викиду вихідною є воронка нормального викиду. Її об'єм

$$V_{\text{норм}} = \frac{\pi}{3} r^2 W \approx W^3.$$

Об'єм воронки пропорційний вазі заряду

$$V = KC_{\text{екв}}.$$

Це найстаріша формула вибухової справи. Значення коефіцієнта  $K$  для різних ґрунтів і гірських порід наводять у довідниках із гірничої справи.

Якщо за умовами роботи потрібно лише роздрібнити або розпушити породу в об'ємі, близькому до об'єму воронки нормального викиду, то для цього необхідний менший заряд, ніж для викиду. В цьому разі заряд нормального розпушування дорівнює

$$C_{\text{екв}} = \frac{1}{3} KW^3.$$

## 7.5 Ударні хвилі у воді

Унаслідок вибуху заряду  $BP$  в однорідному водному середовищі (далеко від дна і від поверхні) у воді виникає бульбашка з нагрітих стиснених газів, тиск яких буде значно вищим за тиск у довкіллі. Зростаючи, гази утворюють у воді ударну хвилю, оскільки це відбувається в повітрі.

У міру розширення бульбашки тиск у ній швидко падає. В деякий момент часу тиск у газовій бульбашці зрівнюється з тиском у довкіллі, але розширення на цьому не закінчується. Вода, яка примикає до газової бульбашки, маючи значну швидкість, деякий час буде рухатися за інерцією, розтягуючи бульбашку. Після того, як рух води припиниться, тиск у



бульбашці буде менший за тиск у довкіллі; газова бульбашка почне стискатися, знову пройде положення рівноваги і, таким чином, буде деякий час пульсувати.

Для води характерне порівняно високе значення швидкості звуку 1 500 м/с. Швидкість ударної хвилі у воді, зменшуючись у міру поширення, швидко досягає значення швидкості звуку і хвиля набуває акустичного характеру, хоча тиск у ній може бути ще значним.

Загасання ударних хвиль у воді відбувається повільніше ніж у повітрі, тому за однакових наведених відстаней, як тиск, так і імпульси ударної хвилі у воді значно більші, ніж у повітрі.

Під час вибуху заряду неподалік від поверхні води на ній утворюється купол і потім відбувається викид, причому може сформуватися водяний стовп значної висоти. Дослідженням встановлено, що утворення купола і викид пов'язані переважно з впливом газової бульбашки.

## **7.6 Кумулятивний ефект**

Ефект концентрації енергії в певному напрямку або в певному місці є кумуляцією. Якщо під час звичайного вибуху енергія розкидається в усі боки, то під час кумулятивного вона збирається в деякому напрямку.

Цей ефект виходить під час використання зарядів, що мають на одному з кінців порожнину – кумулятивну виїмку. Якщо такий заряд ініціювати з протилежного кінця, то ефект дії в напрямку осі виїмки виявляється значно більшим, ніж під час дії звичайних зарядів. Якщо до того ж поверхню кумулятивної виїмки покрити порівняно тонким металевим облицюванням, то пробивна дія такого заряду в багато разів збільшиться.

Порівняльний ефект дії звичайних і кумулятивних зарядів (КЗ) поданий на рисунку 38.

Під час детонації заряду ВР без кумулятивної виїмки спостерігається неглибока вм'ятина в матеріалі перепони

(рис. 38 а), за незначної відстані заряду від перепони ефект впливу на перепону різко знижується (рис. 38 б).

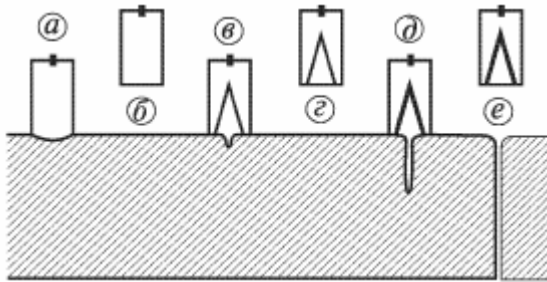


Рисунок 38 – Результати вибухової дії звичайних і кумулятивних зарядів на перепону зі сталі

Наявність кумулятивної виїмки в заряді призводить до концентрації щільності енергії, що проявляється в збільшенні глибини вм'ятини в матеріалі перепони (рис. 38 в). З видаленням розглянутого КЗ від перепони ефект вибухового впливу також різко знижується (рис. 38 г). Застосування металевго облицювання в КЗ призводить до різкого збільшення пробивної дії, при цьому глибина проникнення кумулятивного струменя істотно залежить і від відстані КЗ від перешкоди (рис. 38 д, е).

Газокумулятивний струмінь має відносно низьку ефективність дії по перепоні, особливо на деякому віддаленні від неї, що обумовлено швидким розширенням газоподібних продуктів вибуху внаслідок нерівномірного розподілу по довжині струменя та наявності поперечних пульсацій у струмені.

За наявності металевго облицювання на поверхні виїмки спостерігається дуже різке посилення кумулятивного ефекту. Посилення кумулятивного ефекту за наявності облицювання пов'язане з досить сильним і своєрідним перерозподілом енергії між продуктами вибуху й матеріалом металевго облицювання, а також переходом частини металу в кумулятивний струмінь.

## 7.7 Робота вибуху

Розглянемо вибух заряду в ґрунті. В цьому разі будуть здійснюватися такі основні форми роботи.

- 1 Інтенсивне дроблення й деформація середовища, що безпосередньо примикає до заряду.
- 2 Стиснення, руйнування й дроблення середовища, що не примикає безпосередньо до заряду, але що розміщується поблизу від нього.
- 3 Викид частини ґрунту й утворення воронки викиду.
- 4 Утворення та поширення в ґрунті сейсмічних хвиль.
- 5 Утворення та поширення повітряних ударних хвиль.

Суму всіх робіт, здійснених вибухом, називають повною роботою вибуху

$$A_{\text{п}} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5.$$

Повна робота становить частину повної енергії вибуху

$$A_{\text{п}} = \eta E,$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії вибуху.

Під час зміни умов вибуху повна робота зазвичай не змінюється. Окремі ж форми роботи вибуху можуть сильно змінюватися. Наприклад, якщо зробити вибух заряду не в ґрунті, а на його поверхні, то повна робота практично не зміниться. Водночас робота, що йде на утворення повітряної ударної хвилі, збільшиться, а робота, що йде на руйнування і деформацію середовища, знизиться.

## 8 Засоби ініціювання

Для проведення підричних робіт застосовують вибухові матеріали, що включають в себе ВР і засоби підривання (ЗП). До складу ЗП входять засоби ініціювання (ЗІ), а також допоміжні пристрої або прилади для їх ініціювання.

За характером дії ЗІ поділяють на засоби детонації та засоби займання.

Засоби детонації виробляють безпосереднє збудження детонації в зарядах ВР і називаються основними ЗІ. До них належать капсуль-детонатори (КД), електродетонатори (ЕД) і певною мірою детонувальні шнури (ДШ). Останні, крім того, використовують і для передачі детонації на великі відстані від місця ініціювання їх самих, за допомогою КД або ЕД, безпосередньо до зарядів промислових ВР, що підриваються, які розміщені в свердловинах або шпурах у гірському середовищі, або ж до розміщених у них проміжних детонаторів (ПД) у вигляді шашок або патронів.

До засобів займання належать капсуль-запальники (КЗ) ударної та накольної дії, електрозапальники (ЕЗ), вогнепровідні шнури (ВШ) та допоміжні засоби для їх одиночного або групового запалювання.

Для виготовлення ЗІ застосовують ініціювальні та деякі бризантні ВР, а також димні порохи і піротехнічні суміші.

## **8.1 Засоби займання**

### **8.1.1 Вогнепровідний шнур**

Вогнепровідний шнур – засіб для передачі вогневого імпульсу на капсуль-детонатор або порохований заряд для здійснення підриву через певний проміжок часу. Зовнішній діаметр ВШ 4–6 мм. Швидкість горіння постійна, завжди становить близько 1 см/с, що дозволяє підривникам встановити час до вибуху за довжиною шнура. Передача горіння між дотичними відрізками шнурів неможлива.

ВШ являють собою гнучкі пристрої (рис. 39).

Вони складаються з серцевини з димним порохом, центральної направляючої бавовняної нитки, оболонки, виконаної декількома шарами бавовняних і лляних ниток із зовнішнім гідроізолювальним покриттям або суцільної оболонки з пластикату. Призначаються для займання КД під час вогневого способу підривання зарядів ВР (рис. 40), а також для

займання зарядів димного пороху, які застосовуються на вибухових роботах.

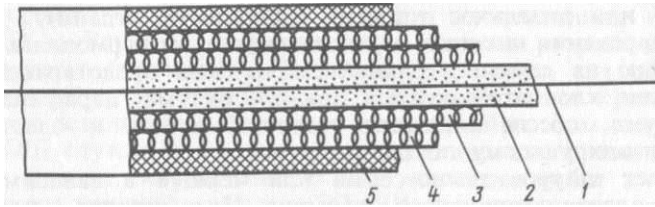


Рисунок 39 – Вогнепровідний шнур марки ОШП:  
1 – центральна направляюча нитка; 2 – шнуровий порох;  
3, 4 – перша і друга оплітки; 5 – водоізолювальне покриття

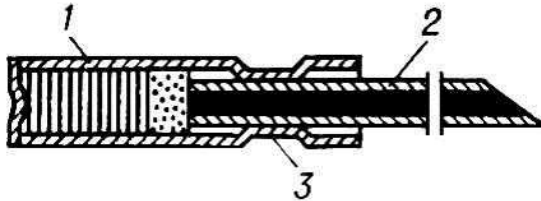


Рисунок 40 – Ініціювання КД за допомогою вогнепровідного шнура:  
1 – капсуль-детонатор; 2 – вогнепровідний шнур;  
3 – місце обтиску

### 8.1.2 Стопін

У побутовій піротехніці велике поширення одержав стопіном або китайський вогнепровідний шнур виско (visco fuse). Він складається з двох обплетень бавовняних ниток, всередину яких заплетений хімічний склад. Зверху він покритий нітролаком. Буває дуже багато різних кольорів – зелений, червоний і червоно-біло-синій. Колір шнура виско визначає його різні характеристики горіння. Наприклад, швидкість горіння зеленого шнура 1 см/с. Цей шнур добре тримає горіння, здатний

горіти під водою, а також передає горіння між дотичними відрізками. Зовнішній діаметр шнура 1/16 дюйма (рис. 41).



Рисунок 41 – Вогнепровідний шнур виско

### 8.1.3 Капсуль-запальники

Капсуль-запальники – металеві ковпачки з ударним складом призначені для створення променя вогню визначеної потужності та тривалості для запалення порохових зарядів у патронах стрілецької зброї.

Застосування в патроні тих чи інших капсуль-запальників залежить від виду пороху, яким споряджається патрон, а також від пристрою капсульного гнізда.

У гладкоствольній зброї, де історично широко застосовується самостійне спорядження патронів мисливцем, і до сьогодні використовуються латунні гільзи багаторазового застосування, склалися дві основні системи капсуль-запальників. У наш час використовують два типи капсулів (рис. 42), що розрізняються за конструктивним виконанням – відкриті (без ковадла) і закриті (з ковадлом).

До капсуля відкритого типу (рис. 42 а) належить капсуль центрального бою (ЦБО). Це традиційний, найбільш простий вид капсуля, являє собою ковпачок із м'якого металу (мідь, сплави латуні й алюмінію), з укороченими бортиками висотою близько 4 мм. На дні стаканчика впресована невелика кількість

ударної суміші, на яку зверху нанесено захисне покриття з алюмінієвої фольги з тонким шаром олова, пергаменту або шару спеціального лужного лаку.

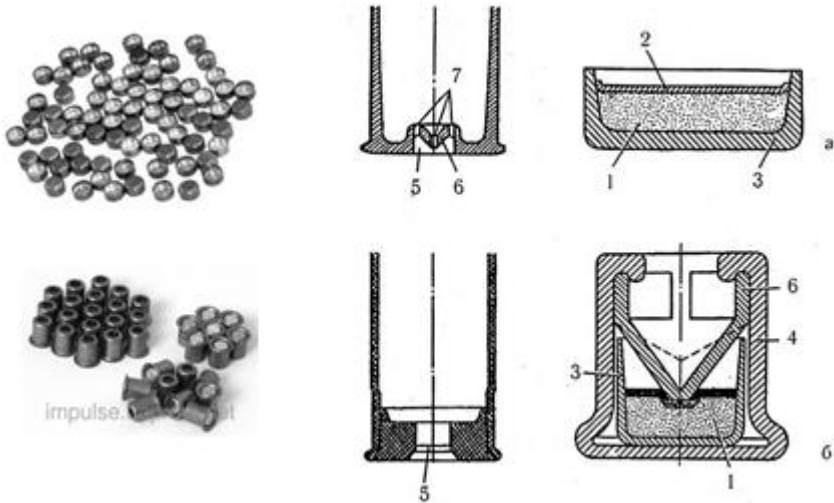


Рисунок 42 – Будова донної частини гільзи й капсуль-запальника:

а – відкритий капсуль; б – закритий капсуль:

1 – ударна суміш; 2 – алюмінієва фольга; 3 – ковпачок;

4 – гільзочка; 5 – капсульне гніздо; 6 – ковадло;

7 – запальні отвори

Під час удару бойка по капсулю ударна суміш запалюється, після цього полум'я через запальні отвори в гільзі проникає в пороховий заряд. Найкращі показники капсулі відкритого типу показують під час використання їх із димним порохом.

До капсулів закритого типу належать капсулі «Жевело» (рис. 42 б), які мають у своєму корпусі вбудоване ковадло. Цей тип капсуля являє собою металеву гільзочку з капелюшком, на дні якої встановлено ударний капсуль відкритого типу. Капсуль утримується в гільзі ковадлом, яке впирається в захисне покриття його ударної суміші.

Закриті капсулі більш чутливі до удару бойка, ніж капсулі ЦБО, більш одноманітні по форсу полум'я (довжині променя, тривалості впливу на пороховий заряд і кількості виділеної теплової енергії). Вони дають могутній спалах, дуже рідко дають осічки.

### 8.1.4 Електрозапальник

Електрозапальник – це пристрій, призначений для підривання на відстані електричним струмом капсуль-детонаторів або зарядів димного пороху. Складається з пари провідників, до кінців яких припаяний місток розжарювання частіше за все із ніхромової нитки діаметром 25–50 мкм. Місток розміщений у краплі затверділої запалювальної речовини.

Під час пропускання через електрозапальник струму силою не менше ніж 1 А крапелька миттєво згорає і викликає детонацію ініціювальної ВР в ЕД або займання серцевини вогнепровідного шнура. Кріплення містка може бути еластичним або жорстким (рис. 43).

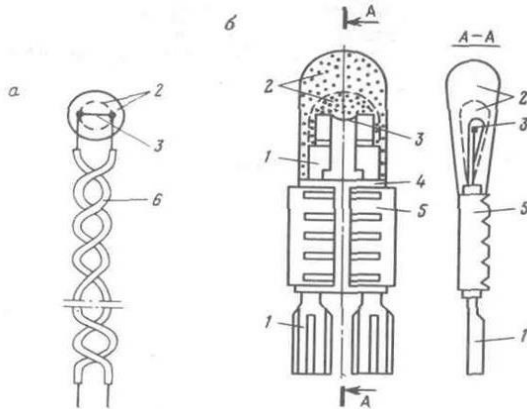


Рисунок 43 – Конструкція електрозапальників:

а – із еластичним кріпленням; б – із жорстким кріпленням:

1 – контактні смужки з каналами для припаявання містка й дротів; 2 – запалювальна головка; 3 – місток розжарювання; 4 – ізоляційний картон; 5 – обтискна скоба; 6 – вивідні дроти



За першим способом кріплення місток припаяний до кінців вивідних дротів (рис. 43 а). За жорстким кріпленням містка (рис. 43 б) основою для його кріплення служить каркас, що складається з двох тонких латунних контактних смужок, обгорнутих смужкою з тонкого електроізоляційного картону, яка, в свою чергу охоплена дужкою, що обтиснена по картону в декількох місцях. Місток припаяний до контактних смужок, до яких з іншого кінця припаяні вивідні дроти.

На місток розжарювання нанесена одношарова або двошарова запалювальна головка. Склад прилеглої до містка розжарювання головки легко запалюється під час пропускання електричного струму через місток, а зовнішній шар створює досить потужний промінь вогню. Для запобігання від відволоження запалювальні головки покривають водонепроникним лаком.

## 8.2 Засоби детонації

### 8.2.1 Капсуль-детонатор

Капсуль-детонатор – пристрій для ініціювання широкого спектра бризантних ВР (підривних шашок, детонувальних шнурів, зарядів ВР). Капсуль-детонатор (рис. 44) являє собою металеву (сталеву, мідну, алюмінієву) гільзу, всередину якої запресований основний заряд із бризантної ВР і чашечка з ініціювальним зарядом.

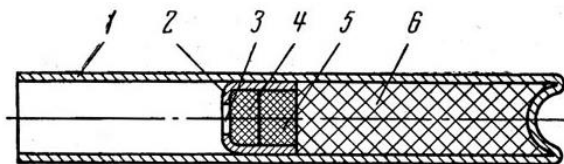


Рисунок 44 – Конструкція капсуль-детонатора:

- 1 – гільза; 2 – чашечка; 3 – сітка; 4 – запалювальна суміш;  
5 – ініціювальна ВР; 6 – бризантна ВР

У чашці на відкритому кінці гільзи передбачено отвір, прикритий шовковою сіточкою, яка оберігає ініціювальний заряд від висипання. Дно гільзи може бути плоским або увігнутим (з кумулятивною воронкою), що забезпечує високу надійність детонації основного заряду. Гільза заповнюється ВР приблизно на 2/3 своєї довжини, незаповнена частина служить для введення засобу займання.

Усім КД із масою бризантної ВР 1 г умовно присвоєно номер 8 (КД-8).

Підрив капсуль-детонатора може бути ініційований полум'ям капсуль-запальника (в запалах інженерних мін), вогневим підриванням (вогнепровідний шнур), електропідривом (електрозапальник).

### 8.2.2 Електродетонатори

Електродетонатори являють собою з'єднання капсуль-детонатора з електрозапальником, який перетворює електричну енергію в теплову, викликаючи тим самим спалах займистого складу.

Електродетонатори поділяють на групи миттєвої, уповільненої та короткоуповільненої дії. В електродетонаторів миттєвої дії (рис. 45) електрозапальник розміщується безпосередньо у чашечці капсуль-детонатора, який під час увімкнення струму вибухає майже миттєво.

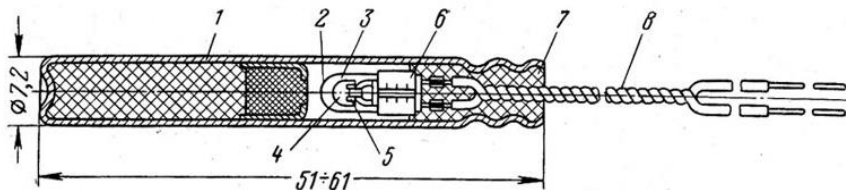


Рисунок 45 – Електродетонатор миттєвої дії ЕД-8-Ж:

- 1 – капсуль-детонатор; 2 – нітролак; 3 – запальний склад;
- 4 – запалювальний склад; 5 – каркас; 6 – пластмасова пробка;
- 7 – дроти

Електродетонатори уповільненої дії вибухають через точно визначений проміжок часу (0,5–10 с) після пропускання електричного струму через місток розжарювання (рис. 46).

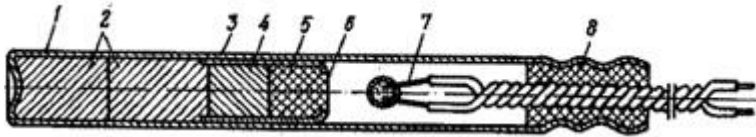


Рисунок 46 – Електродетонатор сповільненої дії:

- 1 – гільза; 2 – бризантна ВР; 3 – ковпачок;
- 4 – ініціувальна ВР; 5 – сповільнювальна суміш; 6 – сітка;
- 7 – електрозапальник; 8 – пластмасова пробка

Необхідне уповільнення досягається підбором складу сповільнювача й висотою його стовпчика. Як сповільнювачі застосовують склади, що згоряють з утворенням лише твердих речовин. Сповільнювальний склад розміщують у ковпачок між запалювальним складом та ініціувальною ВР.

Електродетонатори короткоуповільненої дії за конструкцією аналогічні електродетонаторам сповільненої дії, але в них використовуються більш швидкопалаючі сповільнювальні склади. Вони дають час уповільнення від 5 мс до 250 мс.

### 8.2.3 Неелектрична система ініціювання

Застосування в гірській промисловості великої кількості електричних машин різного призначення зажадало створення нечутливою до впливу електромагнітних полів системи ініціювання, яка забезпечила б повну безпеку використання вибухових матеріалів від джерел електрики. Такою системою стала неелектрична система ініціювання (НСІ). Основною частиною цієї системи є хвилевід, який герметично з'єднаний за допомогою гумової втулки з певним КД.

Хвилевід служить лише для передачі детонаційної хвилі на неелектричний детонатор. Хвилевід є еластичною тришаровою

пластиковою трубкою. На внутрішню поверхню трубки нанесено детонувальну суміш, ініціювання якої призводить до утворення ударної хвилі, що поширюється по внутрішньому каналу хвилеводу зі швидкістю 2 000 м/с. Ударна хвиля володіє достатньою силою, щоб ініціювати сповільнювальний елемент детонатора, але недостатньою, щоб розірвати хвилевід.

Для ведення вибухових робіт на земній поверхні система складається з поверхневого та свердловинного пристроїв НСІ.

Поверхневий пристрій (рис. 47) складається з відрізка хвилеводу та КД малої потужності з уповільненням (8 серій уповільнення від 0 м/с до 200 м/с) із з'єднувачем під п'ять хвилеводів.



Рисунок 47 – Поверхневий пристрій НСІ

Свердловинний пристрій (рис. 48) складається з відрізка хвилеводу та КД великої потужності з уповільненням (9 серій уповільнення від 100 м/с до 500 м/с), що не містить ініціювальних ВР.



Рисунок 48 – Свердловинний пристрій НСІ

Для ведення вибухових робіт у підземних рудниках та вугільних шахтах система складається із шпурового пристрою (30 серій уповільнення від 0 м/с до 10 000 мс), що являє собою детонатор з уповільнювачем, герметично з'єднаний за допомогою гумової втулки з відрізком хвилеводу певної довжини (рис. 49).



Рисунок 48 – Шпуровий пристрій НСІ

#### **8.2.4 Електродетонатор з електронним уповільненням**

Принципова відмінність електродетонатора з електронним уповільненням від електродетонатора з піротехнічним уповільненням полягає в тому, що електричний струм, який зумовлює спрацювання містка розжарювання, а з ним і запалювання запалювальної суміші, формується під час розряду конденсатора, розміщеного в гільзі детонатора (рис. 49), тоді як у звичайному детонаторі конденсатор розміщується у вибуховій машинці і приєднується до містка розжарювання магістральною дводровою лінією.

Наявність мікропроцесора в електронному детонаторі дає можливість прошивки індивідуального номера кожного КД, що необхідно для ідентифікації детонаторів під час поводження з ними.

Електродетонатор з електронним уповільненням дозволяє проводити групове підривання понад 200 шт, на дводрової лінії довжиною понад 1 км, у діапазоні часу уповільнення від 1 мс до 10 с із дискретністю 1 мс.



Рисунок 49 – Електродетонатор з електронним уповільненням

На відміну від детонаторів із піротехнічним уповільненням електронні детонатори під час розльоту не дають тліючих уламків, що робить їх безпечними під час застосування в запилених і загазованих шахтах.

### 8.2.5 Детонувальний шнур

Детонувальний шнур – пристрій для передачі на відстань ініціювального імпульсу для збудження детонації в зарядах ВР. Ініціювальний імпульс зазвичай збуджується капсуль-детонатором і передається детонувальним шнуром до одного або до декількох зарядів, які повинні спрацювати одночасно. Швидкість детонації різних видів і марок детонувального шнура різна, для шнура з теном становить близько 6 500 м/с.

Детонувальний шнур являє собою шнур, наповнений бризантною ВР, що має облєтєння з поздовжніх поліамідних ниток для посилення міцності й покритий поліетиленовою оболонкою (рис. 50).



Рисунок 50 – Детонувальний шнур

### 8.2.6 Детонатор проміжний

Детонатор проміжний – заряд із потужної бризантної ВР, призначений для посилення ініціювального імпульсу первинних засобів підривання капсуль-детонатора, детонувального шнура та інших. Детонатор проміжний частіше за все являє собою пресовані або литі шашки циліндричної форми з наскрізним каналом для пропуску декількох ниток детонувального шнура або з гніздом під капсуль-детонатор (рис. 51).



Рисунок 51 – Шашка тротилова Т-400Г

Шашки-детонатори виготовляють із тротилу або його сумішей з гексогеном масою 200 або 400 г. За допомогою проміжного детонатора досягається надійна детонація малочутливих промислових ВР.

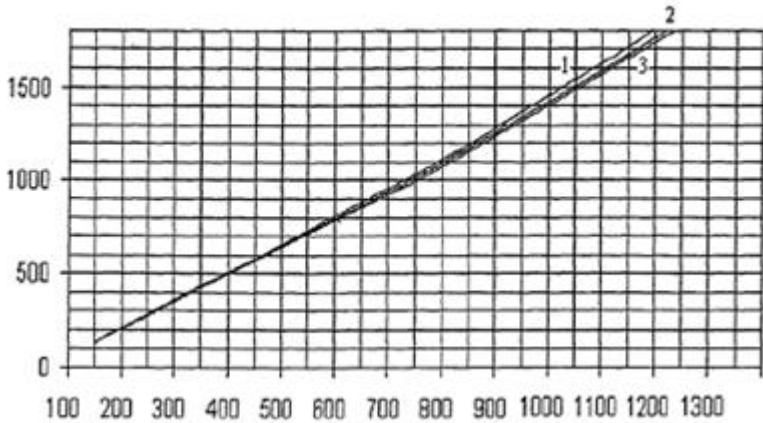
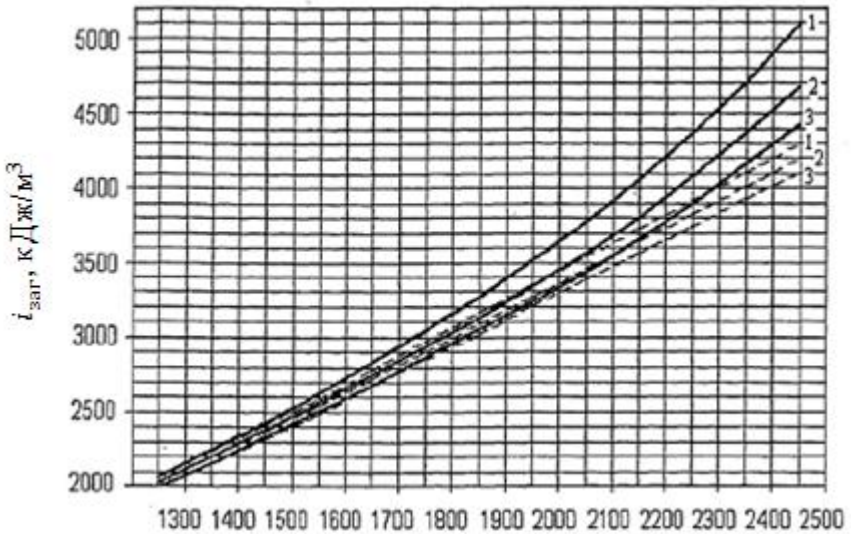


## Список літератури

1. Зеленкин В. Г. Теория горения и взрыва / В. Г. Зеленкин, С. И. Боровик, М. Ю. Бабкин. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 166 с.
2. Топливо и расчеты его горения / С. Н. Гушин, Л. А. Зайнуллин, М. Д. Казяев и др.; под ред. Ю. Г. Ярошенко. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2007. – 105 с.
3. Андреев К. К. Теория взрывчатых веществ / К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. – Москва : ОБОРОНГИЗ, 1960. – 595 с.
4. Горст А. Г. Пороха и взрывчатые вещества / А. Г. Горст. – Москва : Машиностроение, 1972. – 208 с.
5. Щукин Ю. Г. Средства инициирования промышленных взрывчатых веществ / Ю. Г. Щукин, Г. Г. Лютиков, З. Г. Поздняков. – Москва : Недра, 1996 – 155 с.

ДОДАТОК А  
(обов'язковий)

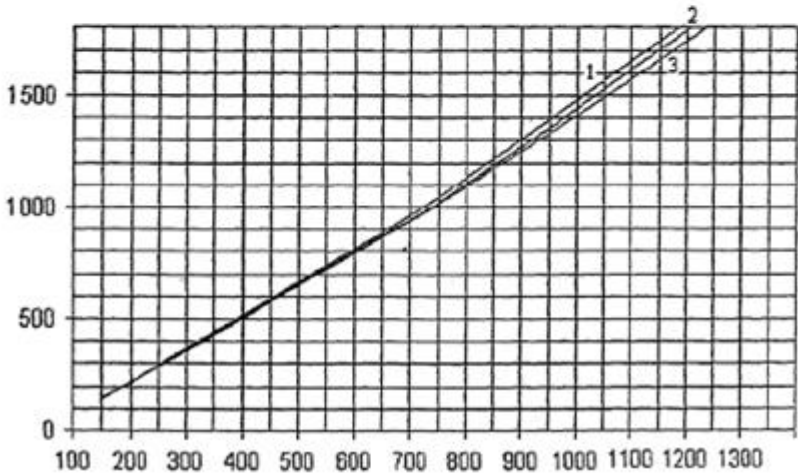
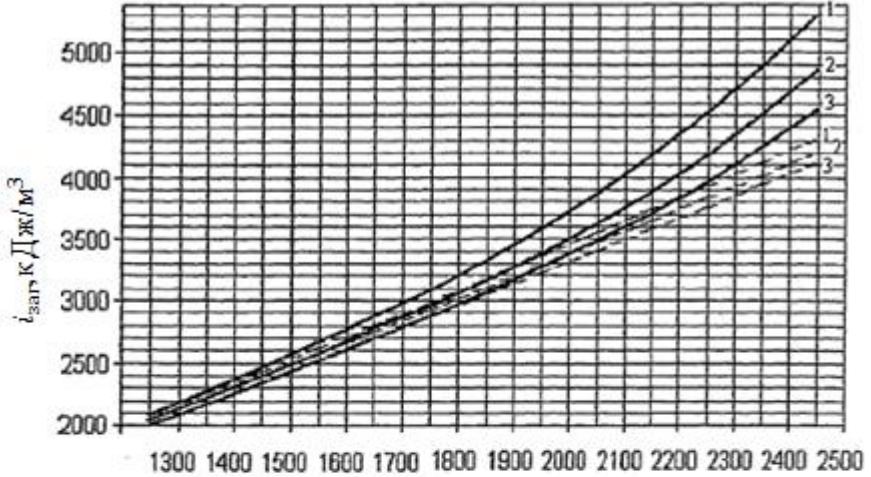
i-t-Діаграма для газів та їх сумішей за  $Q_{HP} > 12\,500$  кДж/м<sup>3</sup>



Примітка: 1 -  $v = 0\%$ , 2 -  $v = 20\%$ , 3 -  $v = 40\%$

ДОДАТОК Б  
(обов'язковий)

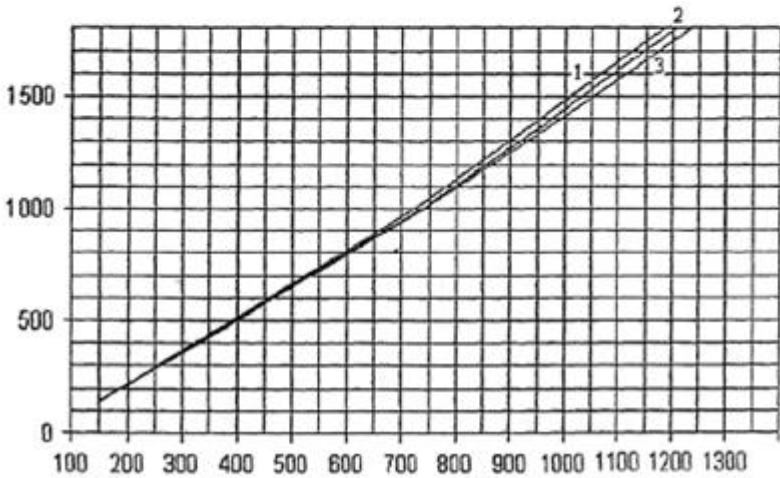
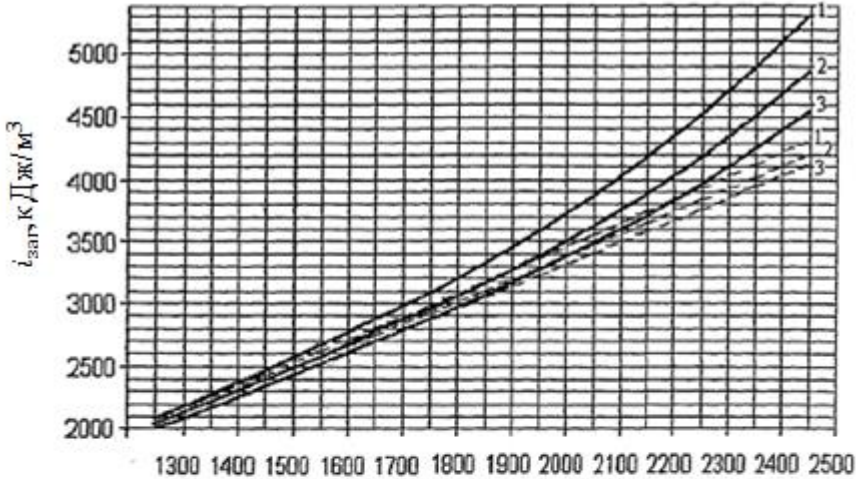
i-t-Діаграма для газів та їх сумішей  
за  $8\,000 < Q_{н^p} < 12\,500$  кДж/м<sup>3</sup>, а також для мазуту,  
кам'яного вугілля, антрациту і коксу



Примітка: 1 -  $v = 0\%$ , 2 -  $v = 20\%$ , 3 -  $v = 40\%$

ДОДАТОК В  
(обов'язковий)

i-t-Діаграма для суміші доменного та коксового газів  
за  $Q_{н}^p \leq 8000$  кДж/м<sup>3</sup>, а також для бурого вугілля й торфу



Примітка: 1 -  $v = 0\%$ , 2 -  $v = 20\%$ , 3 -  $v = 40\%$

ДОДАТОК Г  
(обов'язковий)  
Середня теплоємність газів, кДж/(м<sup>3</sup> · К)

t, °C	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
0	1,298	1,277	1,294	1,306	1,599	1,733	1,507
100	1,302	1,289	1,298	1,319	1,700	1,813	1,532
200	1,306	1,298	1,298	1,336	1,788	1,888	1,562
300	1,315	1,298	1,306	1,357	1,863	1,955	1,595
400	1,327	1,302	1,315	1,377	1,930	2,018	1,633
500	1,344	1,306	1,327	1,398	1,989	2,060	1,671
600	1,357	1,310	1,340	1,415	2,043	2,114	1,746
700	1,373	1,315	1,352	1,436	2,089	2,152	1,780
800	1,386	1,319	1,365	1,449	2,098	2,181	1,784
900	1,398	1,323	1,377	1,465	2,169	2,215	1,817
1 000	1,411	1,331	1,390	1,478	2,202	2,236	1,851

t, °C	H <sub>2</sub> O	Повітря	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
0	1,495	1,298	1,549	2,211	3,048	4,128	5,127
100	1,507	1,302	1,641	2,495	3,510	4,705	5,835
200	1,524	1,306	1,758	2,776	3,965	5,256	6,515
300	1,541	1,315	1,888	3,044	4,369	5,772	7,135
400	1,566	1,327	2,014	3,308	4,760	6,267	7,741
500	1,591	1,344	2,139	3,555	5,094	6,689	8,256
600	1,616	1,357	2,261	3,776	5,432	7,115	8,783
700	1,641	1,369	2,378	3,986	5,724	7,485	9,231
800	1,666	1,382	2,504	4,174	5,989	7,808	9,625
900	1,696	1,398	2,600	4,363	6,231	8,114	9,992
1000	1,725	1,411	2,700	4,530	6,461	8,404	10,345

Навчальне видання

**Тимофіїв** Сергій Владиславович

# **ПРИКЛАДНА ФІЗИКА ГОРІННЯ ТА ВИБУХУ**

Конспект лекцій

для студентів спеціальності

161 «Хімічні технології та інженерія»  
освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр»  
денної та заочної форм навчання

Відповідальний за випуск С. В. Тимофіїв

Редактор Н. М. Мажуга

Комп'ютерне верстання С. В. Тимофіїва

Підписано до друку 12.03.2021, поз. 41.

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 8,14. Обл.-вид. арк. 7,95. Тираж 5 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач

Сумський державний університет,

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.