1. ВИДИ ПАЛИВ, ЇХ ВЛАСТИВОСТІ І ПРОЦЕСИ ГОРІННЯ

1.1. Загальна характеристика палива. Класифікація
1.2. Склад палива
1.3. Теплота згоряння палива
1.4. Тверде паливо
1.5. Рідке паливо
1.6. Газоподібне паливо
1.7. Основи теорії горіння палива
1.8. Технологічний процес горіння палива

1.1. Загальна характеристика палива. Класифікація

Паливом називають горючу речовину, яку спеціально спалюють для одержання тепла і подальшого його використання для інших потреб у сільськогосподарському виробництві. Воно повинно мати певні властивості, тобто відповідати таким основним вимогам: порівняно легко займатися; при згорянні виділяти якомога більше теплоти; бути поширеним у природі, доступним при видобуванні та дешевим при виробництві; не змінювати свої властивості при транспортуванні та зберіганні; бути нетоксичним і при згорянні не виділяти шкідливих та отруйних речовин.

Цим вимогам найбільш повно відповідають речовини органічного походження: нафта, природний газ, тверді горючі копалини тощо.

Палива класифікують за такими основними ознаками: агрегатним станом, походженням і способом одержання, тепловою цінністю, цільовим призначенням або застосуванням.

За агрегатним станом всі види палива поділяють на тверді, рідкі і газоподібні.

За походженням палива ділять на нафтові і альтернативні. До альтернативних палив належать спирти, водень і майже всі види штучних вуглеводних палив.

За способом одержання палива бувають природні, які використовують у тому вигляді, в якому вони існують у природі, і штучні, якщо після видобутку їх переробляють.

За тепловою цінністю, тобто тепловою згоряння, палива класифікують на висококалорійні, середньо - і низькокалорійні.

За цільовим призначенням паливо розрізняють: паливо для двигунів з примусовим запалюванням, реактивні і дизельні палива. Для двигунів з примусовим запалюванням відносять бензин і газоподібне паливо. Дизельне паливо виготовляють для швидкохідних двигунів (автомобільних, тракторних тощо), для середньо - і тихохідних двигунів (судових і стаціонарних).

У сільському господарстві застосовують всі види палив: рідке – яке забезпечує роботу сільськогосподарської техніки, стаціонарних двигунів та інших теплових установок сільськогосподарського виробництва (дизель-електростанцій з двигунами внутрішнього згоряння, котельні установки тощо); газоподібне – у газобалонних автомобілях і газогенераторних установках, для технологічних і побутових потреб; тверде – для різних виробничих і побутових потреб.

Поняття «паливо» є категорія не тільки технічна, а й економічна та екологічна, оскільки у кожному конкретному випадку його використання має бути ефективним. До того ж, при спалюванні палива необхідно створювати умови для якомога меншого забруднення навколишнього середовища.

Класифікація основних видів палива за його походженням та агрегатним станом наведена у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Класифікація палива

Агрегатний стан палива	Походження палива	
	природне	штучне
Тверде	Викопне (торф, буре та кам'яне вугілля, антрацит, горючі сланці), дрова, відходи сільськогоспо-дарського виробництва	Кокс, напівкокс, торфові та кам'яновугільні брикети, деревне вугілля
Рідке	Нафта	Топкові мазути, паливо пічне побутове, дизельне, солярове масло, бензин тощо
Газоподібне	Природний та попутний газ	Гази генераторний, доменний, коксовий та ін. Пропан-бутанові суміші. Біогаз.

1.2. Склад палива

Будь-яке паливо складається з двох основних частин: горючої і негорючої (баласту). Горюча частина містить різні органічні сполуки, до яких входять такі хімічні елементи: вуглець (C), водень (H), сірка (S), кисень (O), азот (N), а також ті неорганічні сполуки, які під час горіння палива, розкладаючись, утворюють легкі речовини.

Склад твердого і рідкого палива визначається у процентах за масою, газоподібного – у процентах за об'ємом.

Вуглець – основа горюча складова, із збільшенням частки якої зростає теплова цінність палива. Вміст вуглецю у різних

видах палива коливається у межах від 50% (дрова) до 98% (антрацит).

Водень за теплотою згоряння майже у 4 рази цінніший ніж вуглець. Враховуючи, що вміст водню в паливі складає до 25% - це друга за значимістю складова частини палива.

Кисень, що входить в склад палива, не горить і тому фактично є внутрішнім баластом горючої частини. Вміст кисню становить від 0,5% до 43%. Чим більше в горючій частині кисню, тим менш цінне паливо.

Азот, як і кисень, не горить, є внутрішнім баластом горючої частини. У твердому і рідкому паливі вміст азоту невеликий (0,5...1,5%) і тому вплив його на теплову цінність палива незначний. Однак, у деякому газоподібному паливі (наприклад, генераторному газі) вміст азоту становить біля 50%, що різко знижує його теплову цінність.

Сірка є горючим елементом і, входячи до складу палива у вільному стані або у вигляді органічних і сульфідних сполук, бере участь у горінні. Але не зважаючи на це, сірка є дуже небажаною складовою палива тому, що під час горіння сірки утворюються сполуки SO_2, SO_3, які викликають газову корозію, а з'єднуючись з вологою, яка завжди є у паливі, перетворюються у сірчисту та сірчану кислоти, які викликають рідину корозію металів. Вміст сірки у твердому паливі коливається від 0,01 до 8%, а у нафтах – від 0,1 до 4%. При переробці палива намагаються вміст сірки за можливістю довести до мінімуму.

Негорюча частина у твердому і рідкому паливі складається з мінеральних домішок (при згорянні утворюють золу А) і вологи W. Ця частина, зменшуючи об'єм горючої частини і відбираючи частину теплоти на своє нагрівання, знижує теплову цінність палива. Крім того зола прискорює абразивне спрацювання деталей циліндро-поршневої групи двигунів, а волога збільшує корозію та ускладнює експлуатацію установок взимку.

Вміст мінеральних домішок у рідкому паливі вимірюється десятими частинами процента, а у твердому – десятками процентів. Мінеральні домішки і вологу розділяють на зовнішні та внутрішні. Перші – потрапляють у паливо з навколишнього середовища при його добуванні, транспортуванні, зберіганні, другі – входять до його хімічного складу.

Залежно від фізичного стану палива, при якому визначають його елементарний склад, розглядають маси: робочу (р), аналітичну (повітряно-суху, лабораторну) (а), суху (с), горючу (г) і органічну (о).

Паливо, яке надходить до споживачів у природному стані та містить, крім горючої частини, золу і вологу, називають робочим. Елементарний склад палива виражають рівнянням

$$C^P + H^P + O^P + N^P + S^P + A^P + W^P = 100\% \qquad (1.1)$$

У тих випадках, коли паливо піддають лабораторному дослідженню, з нього готують аналітичну пробу, яку приводять для повітряно-сухого стану. При цьому паливо містить тільки внутрішню вологу.

Суха маса не має вологи, оскільки вона одержана штучним сушінням при температурі 105 ^oC.

Горюча маса – це паливо, що не має вологи і золи. А якщо з палива видалити ще і сірку, то отримують органічну масу.

Зальний склад палива для різного його стану схематично показаний на рис. 1.1. Елементарний склад палива розраховують на горючу і суху маси, а всі теплові розрахунки ведуть на робочу (дійсну) масу, склад якої залежить від кількості золи і вологи.

Горюча частина газоподібного палива включає: водень (Н), оксид вуглецю (СО), метан (CH_4), та інші вуглеводні (C_nH_m) з числом атомів вуглецю до чотирьох. Негорюча частина – пари води і негорючі гази (CO_2, N_2, O_2).

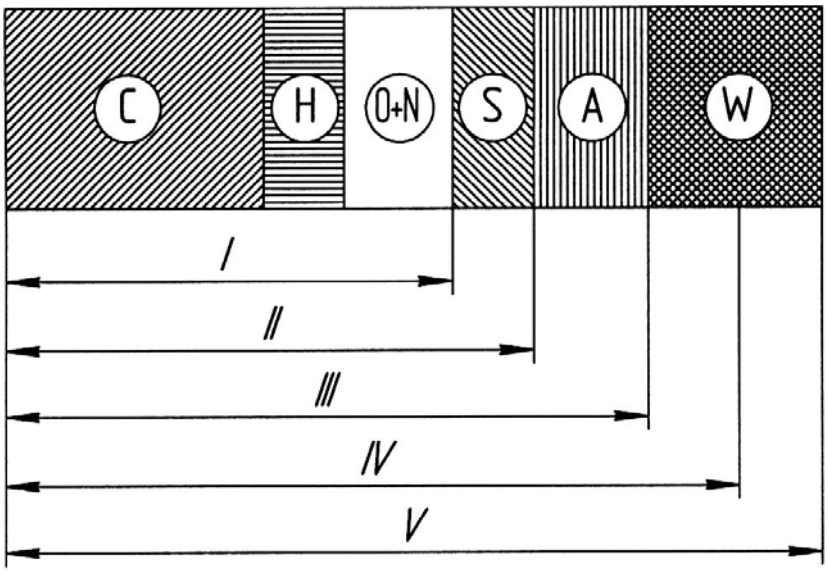

Рис 1.1. Загальний склад палива:
I – органічна; *II* – горюча; *III* – суха; *IV* – лабораторна (аналітична); *V* – робоча маса

1.3. Теплота згоряння палива

Кількість теплоти, яка виділяється під час повного згоряння одиниці маси (1 кг рідкого або твердого) або одиниці об'єму (1 м^3 газоподібного) палива називають питомою теплотою згоряння (теплотворністю) палива (надалі у тексті просто теплота згоряння).

При згорянні вода, яка міститься в паливі та утворюється від згоряння водню, перетворюється в пару. На пароутворення води витрачається теплота. Теплоту Q згоряння називають вищою ($Q_в$) у тому випадку, коли пари води конденсується і теплота, що затрачена на пароутворення звільнюється. Якщо ж пари води виносяться з димовими або відпрацьованими газами, частина теплоти втрачається і таку теплоту називають нижчою ($Q_н$).

Теплоту згоряння визначають експериментальним шляхом у спеціальних приладах-калориметрах, і розрахунковими методами. Суть калориметричного методу визначення теплоти зго-

ряння палива полягає в тому, що при спалюванні певної кількості палива у спеціально закритих камерах калориметричних установок теплота продуктів згоряння передається воді і при цьому її оцінюють за підвищенням температури в калориметрі.

При визначенні теплоти згоряння розрахунковими методами необхідно знати елементний склад палива. Найчастіше визначають теплоту згоряння за законом Г.І. Геса, згідно з яким вона залежить від складу початкових та кінцевих продуктів і не залежить від проміжних реакцій. Підрахована таким чином теплота згоряння буде трохи відрізнятися від фактичної, оскільки горючі елементи у паливі перебувають не у вільному стані, а утворюють різні органічні сполуки, на руйнування яких витрачається частина теплоти. Тому згоряння палива дає менший тепловий ефект, ніж згоряння окремих елементів, які входять до його складу, що і враховується коефіцієнтами формул. У практиці найчастіше для визначення теплоти згоряння застосовують формули Д.І. Менделєєва. Відповідно до них теплоту згоряння рідких і твердих палив, кДж/кг, визначають так

$$Q_{вв} = 339\ C + 1256\ H - 109\ (O - S); \qquad (1.2)$$

$$Q_н = Q_в - 25(9H + W) = 339C + 1090H - 109(O - S) - 25W, \qquad (1.3)$$

де *C, H, O, S, W* - елементний склад палива, проценти за масою;

25 – коефіцієнт, який враховує втрати теплоти, що виносяться продуктами згоряння в атмосферу (1 кг пари при виносі в атмосферу забирає 2500 кДж/кг);

9H – число масових частин води, що утворюється при згорянні однієї масової частини водню.

Теплоту згоряння газоподібного палива, кДж/м^3, у розрахунку на суху масу визначають за формулами

$$Q_в = 128(CO + H_2) + 339CH_4 + 639C_nH_m \qquad (1.4)$$

$$Q_н = 128CO + 108H_2 + 356CH_4 + 589C_nH_m \qquad (1.5)$$

де CO, H_2, CH_4, C_nH_m – склад газоподібного палива, проценти за об'ємом при нормальних умовах (0 ^{0}С, тиск 760 мм рт. ст.).

Теплоту згоряння робочої маси газоподібного палива що містить вологу підраховують за формулами

$$Q_в^р = Q_в^с \frac{0{,}805}{0{,}805 + W}; \tag{1.6}$$

$$Q_н^р = Q_н^с \frac{0{,}805}{0{,}805 + W}, \tag{1.7}$$

де 0,805 – маса 1м^3 газу, кг.

Для порівняння різних видів палива, а також для обліку загальних запасів палива і складання замовлень встановлений еталон – умовне паливо. Умовне паливо – це єдиний еквівалент всіх видів палива за теплотою згоряння. Розрахункова теплота згоряння умовного палива для твердого і рідкого палива дорівнює 29307 кДж/кг, а для газоподібного – 29308 кДж/кг.

При порівнянні палив визначають їх теплові (калорійні) еквіваленти, які є відношенням теплоти згоряння будь-якого палива до теплоти згоряння умовного

$$E = \frac{Q_H^P}{29307} \tag{1.8}$$

Щоб перерахувати фактичне паливо в умовне потрібно його масову кількість помножити на тепловий еквівалент (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2

Теплота згоряння і теплові еквіваленти палива і вуглеводнів

Палива, сполуки	**Теплота згоряння, кДж/кг**	**Тепловий еквівалент**
1	2	3
Умовне паливо	29307	1,00

Продовження табл. 1.2.

1	2	3
Кам’яне вугілля	29310	1,00
Антрацит	30230	1,03
Буре вугілля	14235	0,49
Торф	13440	0,46
Деревина	12500	0,43
Нафта	41867	1,43
Бензин	44000	1,50
Гас (керосин)	43200	1,47
Дизельне паливо	42600	1,45
Мазут	41150	1,40
Гази:		
- природний	35586	1,21
- водяний	10885	0,37
- світильний	18000	0,63
- зріджений	46000	1,57
Бутан	45800	1,56
Ізооктан	44600	1,52
Бензол	41000	1,40
Метанол	19000	0,65
Етанол	26400	0,90

1.4. Тверде паливо

Тверде органічне паливо – це деревина, торф, сланці, буре вугілля, кам’яне вугілля і антрацит. Цінність палива як горючої величини визначається його хімічним складом і основними властивостями.

Дрова за геологічним віком – наймолодше органічне паливо. Вони містять понад 60% целюлози, близько 30% лігніву і приблизно 1% мінеральних домішок. Для різних порід склад органічної маси дров приблизно однаковий

$C^г = 50\%$, $H^г = 6\%$, $O^г = 43\%$, $N^г = 1\%$.

Основним баластом у дровах є волога, вміст якої у свіжо зрубаній деревині дорівнює 50...60%. Дрова бувають: сухі з вологістю менше 25%; напівсухі з вологістю 25...35% і сирі з вологістю понад 35%. Теплота згоряння горючої маси дров становить 18,8...19,2 МДж/кг, проте при вологості 30% вона знижується до 13,0...13,3 МДж/кг.

Торф – молоде за геологічним віком викопне паливо. Він утворюється в результаті розкладання рослинності в умовах надлишку вологи і незначного доступу повітря. Розрізняють торф моховий, або верховий, з незначним вмістом золи (2...4 %) і лучний, або низинний, із зольністю 8...16 %. Зустрічаються торф'яники змішаного перехідного походження, зольність яких дорівнює 7...9 %.

Вологість свіжо видобутого торфу становить приблизно 90%. У процесі природного сушіння його вологість знижується до 40%.

Органічна маса торфу характеризується таким складом: $C^г$=55...56 %, $H^г$=6%, $O^г$=35...40%, $N^г$=0,5...3%, $S^г$ =0,12...1,5%. Нижча теплота згоряння горючої маси торфу становить близько 12,6 мДж/кг.

У парових топках спалюють кусковий торф, що формується у процесі видобування у вигляді цеглин із наступним їх сушінням. Найбільше застосовують в енергетиці фрезерний торф, що одержують у вигляді дрібняку. Такий торф використовують у топках камерного типу.

Сланці складаються із вапняків, що просякнуті продуктами розкладу рослин і тваринних організмів без доступу повітря. Вони відрізняються високим вмістом золи (50... 60%) і вологи (15...25%). У горючій частині сланців високий вміст кисню (до 10%) і великий вихід летких речовин (до 90%), тому вони легко займаються. Значна зольність різко знижує теплову цінність сланців; їх теплота згоряння коливається у межах 5,8...10,8 МДж/кг. У народному господарстві сланці, як і торф, використовують як місцеве котельне паливо.

Буре вугілля – паливо рослинного походження старішого

розкладання, ніж торф. Воно має високу зольність (15...30%) і вологість (15...30%), тому діапазон значення його теплоти згоряння великий — 6,3...18,9 МДж/кг. За вологістю його поділяють на три групи: групу Б1 із вмістом вологи понад 40%, групу Б2 із вмістом вологи 30...40 % і групу БЗ із вмістом вологи до 30%. Склад горючої маси бурого вугілля дуже неоднорідний: C^r=65...78%, H^r=4,3...6,2%, O^r=16...17%, N^r=0,7...1,8%, S^r=0,4...3,9%. Вихід летких речовин на горючу масу становить 30...60%.

Буре вугілля має схильність до самозаймання. Тому його рекомендується вкладати у штабелі висотою до 2,5 м і зберігати не більше місяця.

Кам'яне вугілля утворювалось у результаті повільного розкладу деревовидних рослин без доступу повітря протягом мільйонів років. Це основний вид твердого палива в енергетиці. За складом органічної маси кам'яне вугілля неоднорідне: C^r=78...90%, H^r=4,0...5,8%, Q^r=3,0...15,0%, N^r=0,5...2,0%, S^r=1,0...6,0%. Зольність кам'яного вугілля на робочу масу становить 10...25%, вологість 5...12%, вихід летких речовин 9...50%. Нижча теплота згоряння робочої маси коливається від 20,7 до 31,4 МДж/кг.

Кам’яне вугілля поділяють на марки, які розрізняють за виходом легких речовин і характером легкого залишку (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Марки кам'яного вугілля

Вугілля	**Марка**	Q_H^P, **МДж/кг**	**Вугілля**	**Марка**	Q_H^P, **МДж/кг**
Довгополу-меневе	Д	Понад 37	Пісне спікливе	ОС	14...22
Газове	Г	Понад 35	Слабко спікливе	СЕ	25...37
Жирне	Ж	27...35	Пісне	Т	8...17
Коксове	К	18...27			

Антрацити мають найдавніший геологічний вік серед твердого палива. Вони чорного кольору, їм властиві високі щільність і міцність, їх можна перевозити на великі відстані без помітного подрібнення. Вологість антрацитів 3...7%, зольність 10...18%, вихід летких речовин 2...9%, теплота згоряння 25...27 МДж/кг.

Відходи сільськогосподарського виробництва використовують як паливо для виробничих та побутових потреб. До них відносять солому, стебла соняшника і бавовни, кострицю, лушпиння соняшника, рисову лузгу тощо. За складом органічної маси ці відходи близькі до деревини. З відходів сільськогосподарського виробництва із застосуванням зв'язуючих речовин одержують брикети. Вони найзручніші для спалювання.

1.5. Рідке паливо

Рідке паливо, що використовують для потреб теплоенергетики, одержують методами його термохімічного розкладу.

Нафта складається в основному з вуглеводнів трьох класів: метанові вуглеводні - метан, етан, пропан, бутан, ізобутан тощо; нафтенові вуглеці - циклогексан тощо; ароматичні вуглеці - бензол, толуол, нафталін тощо.

Склад нафти такий: C^P = 83...87%, H^P = 11...14 %, S^P від 0,01 - у малосірчистих нафтах до 5,0...7,0% - у високосірчистих, O^P = 0,1...0,3%, N^P=0,02...1,7%. Нижча робоча теплота згоряння нафти Q_H^P = 40...46 МДж/кг. Природна нафта містить не більше 0,3% мінеральних домішок і 2% води.

Із нафти, залежно від температури перегонки, одержують нафтопродукти: бензинові, гасові, дизельні, солярові, мазутні. Для побутового опалення випускають *пічне побутове паливо* (ППП). У великих опалювальних котельнях, що працюють на рідкому паливі, звичайно застосовують мазут, а у невеликих котельнях та побутових установках - пічне побутове паливо.

Характеристика твердих та

Родовище, вид палива	Марка	Склад робочої маси, %							
		W^P	A^P	S_K^P	S_{CP}^P	C^P	H^P	N^P	O^P
Тверде паливо									
Донецьке	Д	13,0	24,4	1,8	1,3	47,0	3,4	1,0	8,1
	Г	10,0	25,2	2,1	1,1	51,2	3,6	0,9	5,9
	Ж	6,0	26,3	2,0	0,7	56,5	3,5	1,0	4,0
	Т	6,0	25,4	1,6	0,8	61,1	2,9	1,0	1,2
	А	8,5	30,2	1,1	0,5	56,4	1,1	0,5	1,7
Львівсько-Волинське	Г	10,0	22,5	2,1	0,9	53,3	3,5	1,0	6,7
	ГЖ	8,0	32,2	2,1	0,7	49,7	3,3	0,7	4,3
Рідке паливо									
Мазут:									
малосір-чистий	–	3,0	0,05	–	0,3	84,6	11,7	0,3	–
сірчистий	–	3,0	0,10	–	1,4	83,8	11,2	0,5	–
висо-косірчистий	–	3,0	0,10	–	2,8	83,0	10,4	0,7	–
Гас	–	–	–	–	0,2	86,0	13,7	0,1	–
Дизельне паливо	–	–	–	–	0,3	86,3	13,3	0,1	–
Солярове масло	–	–	–	–	0,3	86,5	12,8	0,4	–
Пічне побутове паливо	–	–	–	–	0,5	86,0	13,5	–	–

Таблиця 1.4

рідких видів палива

Склад повітря і продуктів згоряння, м³/Н				Теплота згорання Q_H^P, МДж/кг	Вихід легких речовин, %
V^O	$V_{RO_2}^0$	$V_{N_2}^O$	$V_{H_2O}^O$		
Тверде паливо					
0,491	0,090	0,389	0,062	18,5	43
0,542	0,098	0,429	0,061	20,47	40
0,591	0,170	0,467	0,056	22,40	32
0,624	0,116	0,494	0,050	23,40	12
0,530	0,106	0,419	0,030	19,97	4
0,554	0,102	0,439	0,060	20,85	39
0,515	0,093	0,408	0,055	19,38	36
Рідке паливо					
1,062	0,158	0,839	0,151	40,28	–
1,045	0,157	0,825	0,145	39,73	–
1,0,20	0,157	0,806	0,136	38,77	–
1,12	0,161	0,891	0,170	43,0	–
1,120	0,162	0,885	0,166	42,65	–
1,108	0,162	0,877	0,160	42,4	–
1,124	0,161	0,888	0,168	39,8	–

Мазути, що застосовують у котлах, поділяють на топкові марок 40В і 40 (паливо середньої в'язкості) і топкові мазути 100В, 100 і 200 (паливо важке).

За вмістом у них сірки топкові мазути ділять на три групи: малосірчасті (S^p<0,5%), сірчасті (S^p=0,5...2%) і високосірчасті (S^p>2%). Зольність мазутів не перевищує 0,1...0,3%. Вміст води у мазуті коливається у великих межах (від 0,5 до 5,0%). Теплота згоряння мазуту становить 39...42 МДж/кг. Температура спалаху дорівнює 80...140°С. В'язкість, що визначається при температурах 50, 80 і 100°С, коливається у межах 5...16°ВУ. Густина мазуту дорівнює 9,8...10,5кН/м^3.

Пічне побутове паливо широко використовується у сільськогосподарському виробництві. На цьому паливі працюють парові та водогрійні котли, теплогенератори, зерносушарки, установки для комунально-побутових потреб. Пічне паливо виробляється з нафти. Температура його застигання не вище – 15°С і тому ємкості, де зберігається паливо, і баки, звідки воно надходить до установок для спалювання, розміщують в утеплених приміщеннях.

Пічне побутове малов'язке паливо (із умовною в'язкістю не більше 1,15°ВУ). Температура спалаху не нижча +42 °С. Нижча теплота згоряння у перерахунку на сухе паливо – не менше 41,2 МДж/кг.

Гас використовують як паливо у теплогенераторах і сушарках, а також для побутових потреб.

Дизельне паливо випускають двох марок ДТ і ДМ. Паливо марки ДТ має в'язкість при 50°С менше 5°ВУ, температуру спалаху понад 65°С, температуру застигання менше -5°С. Паливо марки ДМ характеризується в'язкістю при температурі 50°С, що дорівнює 20 °ВУ, температурою спалаху 85°С, температурою застигання -10°С. Нижча теплота згоряння дорівнює приблизно 42,5 МДж/кг. Дизельне паливо використовують в основному у дизелях, у тому числі у дизельних електростанціях.

Характеристики твердих і рідких палив наведені в табл.1.4.

1.6. Газоподібне паливо

Газоподібне паливо поділяють на природне і штучне. До природного відносять газ, що видобувається з газових родовищ, попутний газ, одержуваний одночасно із видобутком нафти, а також газ, який видобувається із конденсатних родовищ. До штучних відносять гази, що одержують при переробці нафти, перегонці твердого палива, анаеробній ферментації відходів (біогаз), а також зріджені гази.

Гази, що видобуваються із газових родовищ, складаються в основному з метану (85...95%). Вміст у них N_2 – 0…4%, CO_2 – не більше 15%, H_2S – не більше 6%. Нижча теплота згоряння цих газів $Q_н^р$=33…40 МДж/кг.

Генераторний газ одержують при перегонці твердого палива (кам'яне або буре вугілля, дрова, торф) із нестачею повітря близько 60% у спеціальних установках – газогенераторах. Склад генераторного газу коливається у межах: CO=25…30%, H_2= 12…15%, CH_4=05…3,5%, CO_2=5…8%, O_2=,2…0,5%, N_2=45…50%. Нижча теплота згоряння генераторного газу 5…6,5 МДж/м^3.

Основні характеристики органічних палив України наведені у таблицях 1.4 та 1.5.

Таблиця 1.5

Характеристика природного газоподібного палива

Родовище, газопровід	**Склад газу по об'єму, %**							**Теплота згоряння, МДж/м^3**	**Густина, кН/м^3, при t=0 ^{0}C, p= 101,3 кПа**
	CH_4	**C_2H_6**	**C_3H_8**	**C_4H_{10}**	**C_5H_{12}**	**CO_2**	**N_2**		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Єфремівське	93,2	3,9	0,81	0,28	0,18	0,20	1,4	33,4	0,770
Джан-койське	96,0	0,5	0,20	0,04	-	0,20	3,0	32,5	0,740
Про-летарське	86,2	5,3	2,4	2,0	1,55	0,10	1,5	38,6	0,874

Продовження табл. 1.5.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Дашава-Київ	93,9	0,3	0,10	0,10	-	0,2	0,4	35,9	0,712
Шебелинка-Дніпропетровськ	92,8	3,9	1,0	0,4	0,3	-	1,5	37,3	0,781

1.7. Основи теорії горіння палива

Горінням називають процес екзотермічного окислення горючої речовини, що швидко відбувається та супроводжується інтенсивним виділенням тепла. В основі процесу горіння лежить хімічна реакція між горючою речовиною та окислювачем. Окислювачем звичайно служить повітря.

Горіння відрізняється від процесу окислення: швидкоплинністю перебігу в часі; змінністю концентрацій компонентів у міру їх взаємодії; зміною форми поверхні реагування у часі; високим значенням температури. Процес горіння – це складний фізико-хімічний процес, що залежить від взаємодії хімічних, теплових та гідродинамічних факторів.

Реакція горіння відбувається не безпосередньо між молекулами вихідних речовин (палива і окислювача), а через проміжні стадії. Цим визначається ланцюговий механізм горіння, розроблений М.М.Семеновим. Реакція горіння є результатом ряду ланцюгових реакцій, що перебігають послідовно.

Залежно від фазового стану речовин, що реагують при горінні (тверді, рідкі, газоподібні), хімічні реакції поділять на гомогенні, що відбуваються між компонентами, котрі перебувають в одній фазі (наприклад, у газоподібному стані), і гетерогенні, що відбуваються на межі двох фаз. Прикладами гомогенного горіння є горіння добре перемішаних газового палива і повітря, а також горіння швидко випарюваних рідких палив. При цьому мається на увазі їх перемішування з окислювачем до процесу горіння. Прикладами гетерогенного горіння служить горіння твердих палив і горіння крапель рідких важких палив, коли фронт горіння встановлюється на межі

розділу палива і окислювача. Горіння палива є потоковим процесом і для його перебігу необхідно підведення компонентів (палива і окислювача) у зоні реакції і відведення з неї продуктів згоряння.

Організація перебігу процесу горіння можлива у ламінарному та турбулентному потоках окислювача. У загальному випадку час горіння $t_г$ палива складається із часу перебігу фізичних $t_ф$ і хімічних $t_х$ процесів

$$t_г = t_ф + t_х , \tag{1.9}$$

Швидкість хімічної взаємодії виражається зміною концентрацій речовин, що реагують, за одиницю часу.

Згідно із законом дії мас в однорідному середовищі при постійній температурі швидкість реакції у кожний момент пропорційна добутку концентрації речовин, що реагують.

До зворотної хімічної реакції можна скласти стехіометричне рівняння

$$\nu_{A1}A_1 + \nu_{A2}A_2 \longleftrightarrow \nu_{B1}B_1 + \nu_{B2}B_2 , \tag{1.10}$$

де A_1, A_2, B_1, B_2 – хімічні символи речовин, що реагують;

$\nu_{A1}, \nu_{A2}, \nu_{B1}, \nu_{B2}$ - стехіометричні коефіцієнти.

Швидкість прямої реакції виражається рівнянням

$$\omega_1 = k_1 C_{A_1}^{\nu_{A_1}} C_{A_2}^{\nu_{A_2}} \tag{1.11}$$

і відповідно швидкість зворотної реакції

$$\omega_2 = k_2 C_{B_1}^{\nu_{B_1}} C_{B_2}^{\nu_{B_2}} , \tag{1.12}$$

де κ_1 і κ_2 — константи швидкості відповідно прямої та зворотної реакції;

$C_{A_1}, C_{A_2}, C_{B_1}, C_{B_2}$ - поточні концентрації речовин, що реагують.

При хімічній рівновазі швидкості прямої та зворотної реакцій дорівнюють одна одній: $\omega_1 = \omega_2$.

У цьому випадку можна записати

$$\frac{C_A^{\nu_{A_1}} C_{A_2}^{\nu_{A_2}}}{C_{B_1}^{\nu_{B_1}} C_{B_2}^{\nu_{B_2}}} = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} = \kappa_c , \qquad (1.13)$$

де κ_c — константа рівноваги, що є постійною величиною.

Швидкість реакції значною мірою залежить від температури. Ця залежність виражається законом Арреніуса

$$\omega = \kappa_0 e^{-E/(\kappa T)} C_{A_1}^{\nu_{A_1}} C_{A_2}^{\nu_{A_2}} , \qquad (1.14)$$

де κ_0 – передекспоненційний множник, що визначається дослідним шляхом ($\kappa_0 \approx \sqrt{T}$);

E – енергія активації, що дорівнює деякому потенціальному бар'єру, необхідному для руйнування початкових зв'язків у молекулі;

k – універсальна газова стала;

T – термодинамічна температура, ^{0}К.

Швидкість реакції горіння різко збільшується із підвищенням температури. Тому для всіх реакцій горіння характерна особливість — щоб горіння відбулося, реагенти повинні мати температуру, не нижчу від деякого граничного значення.

Тепловиділення при екзотермічній реакції для горючої суміші пропорційне швидкості реакції

$$Q_P = \omega Q = k_0 e^{-E/(\kappa T)} C_{A_1}^{\nu_{A1}} C_{A_2}^{\nu_{A_2}} Q , \qquad (1.15)$$

де Q - теплота реакції горючої суміші.

Самозайманням називають ініціювання горіння у всьому обсязі реакційної суміші. Воно може статися при досягненні деякого граничного значення температури, що називають температурою самозаймання T суміші. Ця температура не є фізико-хімічною характеристикою, а залежить для кожного палива від умов підведення і відведення теплоти та інших факторів. Температура самозаймання водню знаходиться у

межах 580...590 °С, оксиду вуглецю - 644...658 °С, метану - 650...750 °С.

У більшості технічних пристроїв горіння ініціюється не шляхом самозаймання, а запалюванням за допомогою факела або електричної іскри.

1.8. Технологічний процес горіння палива

Для процесу горіння необхідно, щоб горючі речовини і окислювач мали деяку (певну для кожної речовини) температуру, при якій порівняно швидко відбувається їх взаємодія. Температура, при якій хімічний процес різко прискорюється при зіткненні з відкритим вогнем і речовина займається, називається температурою займання. Якщо займання речовини відбувається без стикання з відкритим вогнем, матимемо температуру самозаймання. Подальше горіння продовжується внаслідок безперервного виділення тепла.

Швидкість процесу горіння залежить в основному від умов сумішоутворення. Залежно від цього горіння розділяють на кінетичне і дифузійне. Якщо процес утворення суміші палива і повітря передує горінню, то горіння називають кінетичним і якщо процеси відбуваються одночасно – дифузійним. На практиці, як правило, відбувається змішане горіння – дифузійно-кінетичне.

За температуру горіння приймають температуру, до якої нагріваються газоподібні продукти згоряння внаслідок горіння палива. Розділяють температуру горіння теоретичну і дійсну. Теоретична температура горіння – це максимальна температура, яка може бути досягнута при відсутності втрат теплоти від теплообміну. В реальних умовах процес горіння супроводжується теплообміном і тепловими втратами, тому продукти згоряння мають дійсну температуру горіння, яка нижче теоретичної.

Співвідношення палива і окислювача, яке відповідає хімічній реакції повного окислення паливних елементів називається стехіометричним.

Кількість кисню, теоретично необхідна для спалювання 1 кг твердого або рідкого палива, можна визначити на основі стехіометричного відношення для реакцій горіння елементів горючої маси палива (C, H, S).

Із рівнянь повного згоряння цих елементів

$C + O = CO_2\ (12 + 32 \rightarrow 44),2$

$H_2 + O_2 = 2\ H_2O\ (4 + 32 \rightarrow 36\ ),\ S + O_2 = SO_2\ (32 + 32 \rightarrow 64),$

Враховуючи їх атомну масу, знаходимо, що для спалювання 12 кг вуглецю потрібно 32 кг кисню, тобто для спалювання 1 кг вуглецю потрібно 32/12 = 2,67 кг кисню. Аналогічно, для спалювання 1 кг водню потрібно 8 кг кисню, а для спалювання 1 кг сірки – 1 кг кисню.

Тоді формула для підрахунку теоретично необхідної кількості кисню, кг, для спалювання 1 кг палива буде мати вигляд

$$O_T = \frac{2{,}67C + 8H + S - O}{100} \qquad (1.16)$$

де C, H, S, O – хімічні елементи горючої частини палива, % за масою.

Для спалювання палива, як правило, подається повітря, в якому кисень становить 23,2% за масою. Тоді теоретичну необхідну кількість повітря, кг, для спалювання 1 кг палива визначають за формулою

$$L_T = \frac{2{,}67C + 8H + S - O}{23{,}2} \qquad (1.17)$$

Кількість повітря зручніше визначати в $м^3/кг$. Тоді формула матиме вигляд

$$L_T = \frac{2{,}67C + 8H + S - O}{23{,}2 \cdot 1{,}29}, \qquad (1.18)$$

де 1,29 – маса 1 $м^3$ повітря.

Для газоподібного палива кількість повітря ($м^3/м^3$) визначають за формулою

$$L_T = \frac{0{,}5(H_2 + CO) + (n + \frac{m}{4})C_H H_m - O_2}{21}, \qquad (1.19)$$

де n – число атомів вуглецю;

m – число атомів водню;

21 – вміст кисню у повітрі, % за об'ємом.

Склад газу у формулі наведений у процентах за об'ємом.

У виробничих умовах здійснити повне спалювання палива з теоретичною необхідною кількістю повітря практично неможливо. Тому для повного спалювання, як правило, подають надлишок повітря, тобто процес відбувається не з розрахунковою, а з фактичною (дійсною) кількістю повітря $L_д$.

Відношення дійсної витрати повітря до теоретично необхідної для спалювання 1кг ($1м^3$) палива називають коефіцієнтом надлишку повітря (α)

$$\alpha = L_д / L_T \qquad (1.20)$$

Суміш палива і повітря називають пальною сумішшю. Залежно від співвідношення кількості палива і повітря пальна суміш може бути: нормальна $\alpha = 1$, бідна $\alpha > 1{,}15$, багата $\alpha < 0{,}8$. При значеннях близьких до одиниці – збіднена або збагачена.

Коефіцієнт надлишку повітря визначають за формулами

При повному згорянні

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{3{,}76O_2}{N_2}}; \qquad (1.21)$$

При неповному

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{3{,}76(O_2 - 0{,}5CO)}{N_2}} \qquad (1.22)$$

де O_2, CO, N_2 – процентний вміст за об'ємом у продуктах згоряння відповідно кисню, оксиду вуглецю (які визначають за допомогою спеціальних приладів – газоаналізаторів) і азоту (підраховують за різницею $N_2 = 100 - (CO_2 + O_2 + CO)$).

Теплота згоряння пальної суміші ($Q_{пс}$) залежить від кількості теплоти, що виділяється паливом у об'єму повітря

$$Q_{пс} = \frac{O}{1 + \alpha \mathrm{L_T}}. \qquad (1.23)$$

Для різних видів палива теплота згоряння нормальних пальних сумішей приблизно однакова – 2770 кДж/кг.

Пальну суміш, яка змішалась із залишковими газами від попереднього циклу в циліндрі двигуна, називають робочою. Якщо потрібно визначити її теплоту згоряння, то вносять поправку на коефіцієнт надлишкових газів. На практиці теплоту згоряння пальної і робочої суміші порівнюють.

Характер процесу горіння можна визначити за складом продуктів згоряння палива. Для цього існують різні газоаналізатори: хімічні, електричні, магнітні, механічні. Найпоширеніші прості хімічні газоаналізатори, які дозволяють визначити у відпрацьованих газах вміст вуглекислого газу, кисню і оксиду вуглецю. Принцип дії газоаналізаторів полягає в поглинанні розчинами певних складових елементів відпрацьованого газу, який послідовно пропускають через ці розчини. За відповідним збільшенням об'єму знаходять процентний вміст кожного окремого поглиненого компонента. Так, відсутність оксиду вуглецю свідчить про повне згоряння палива, а наявність CO, CH і H_2 про неповне.