

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного
господарства та природокористування

Кафедра гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних
машин

01-06-79М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

та завдання до виконання практичних робіт з навчальної
дисципліни «Паливо та обладнання для його спалювання»
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за ОПП «Теплоенергетика» спеціальності 144
«Теплоенергетика» галузі знань 14 «Електрична інженерія»
усіх форм навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою
з якості ННІВГП
Протокол №10 від 20.06.2023 р.

Рівне – 2023

Методичні вказівки та завдання до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Паливо та обладнання для його спалювання» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за ОПП «Теплоенергетика» спеціальності 144 «Теплоенергетика» галузі знань 14 «Електрична інженерія» усіх форм навчання [Електронне видання] / Костюк О. П. – Рівне : НУВГП, 2023 – 32 с.

Укладач: Костюк О. П., к.т.н., доцент кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин.

Відповідальний за випуск: Рябенко О. А., д.т.н., професор, завідувач кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин.

Керівник групи забезпечення спеціальності 144 «Теплоенергетика»

Костюк О. П.

© Костюк О. П., 2023
© НУВГП, 2023

ЗМІСТ

Загальні відомості.....	4
Завдання	7
1. Розрахунок повного горіння газоподібного палива.....	9
1.1 Перерахунок сухого складу газу на вологий	11
1.2 Розрахунок горіння газоподібного палива	11
1.3. Результати розрахунку горіння	13
1.4 Об'ємні частки продуктів згоряння	14
1.5 Парціальні тиски продуктів згоряння.....	22
1.6 Розрахунок теплоти згоряння палива.....	23
1.7 Розрахунок температур горіння палива	24
1.8 Розрахунок температур горіння палива з урахуванням дисоціації трьохатомних газів	25
1.9 Визначення необхідності підігріву компонентів горіння газоподібного палива.....	25
2. Розрахунок неповного горіння газоподібного палива без утворення сажистого вуглецю	30
Література.....	24
Додатки	25

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Для успішної інтеграції економіки України в СОТ та європейське співтовариство, а також успішного завершення економічних реформ у країні, одним із важливих завдань – є підготовка спеціалістів-енергетиків, які володіють не лише теоретичними знаннями, але і навиками вирішувати практичні завдання, які постають перед ними. Такими завданнями є: вміння проводити аналіз кількісних та якісних показників ефективності використання первинних енергоресурсів, оцінювання потенціалу енергозбереження, розрахунок ефективності впровадження заходів з енергозбереження.

Глибоке розуміння процесу горіння в енергетичних та транспортних агрегатах, необхідне при практичних розрахунках горіння на різних його стадіях, потребує детального вивчення теорії горіння студентами енергетичних спеціальностей.

Методичні вказівки призначені для формування у студентів практичних навиків при виконанні розрахунків горіння органічного палива. Для самостійної роботи студентів під керівництвом викладача складені багатоваріантні контрольні задачі. Розділи методичних вказівок відповідають темам практичних занять, які наведені у робочій програмі дисципліни.

ЗАВДАННЯ

Варіанти завдань для розрахунку горіння органічного палива наведені в таблицях 1-2.

У завданнях використовуються наступні умовні позначення: α – коефіцієнт надлишку повітря; t_r – температура попереднього підігріву газоподібного палива; t_{II} – температура попереднього підігріву рідкого палива; $t_{нов}$ – температура попереднього підігріву повітря; d_r – вологовміст газоподібного палива; $d_{нов}$ – вологовміст повітря.

Таблиця 1

Хімічний склад газоподібного палива та умови його спалювання

№ з/п	Вміст компонентів у % за об'ємом в 100 м ³ сухого палива										α	t _о , °C	t _{пов} , °C	d _г , г/м ³
	H ₂ S	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂						
1	-	0,3	88,0	1,9	0,2	0,3	-	9,3	1,2	200	200	5,0		
2	-	0,2	76,7	4,5	1,7	0,8	0,6	14,5	1,3	100	800	5,0		
3	-	-	92,2	0,8	-	0,1	-	6,9	1,2	20	500	6,0		
4	-	0,2	94,0	1,2	0,7	0,4	0,2	3,3	1,15	30	450	7,0		
5	-	0,2	97,9	-	-	0,1	-	1,8	1,1	15	400	8,0		
6	-	0,1	97,9	0,5	0,2	0,1	-	1,2	1,15	25	300	8,5		
7	-	0,1	98,8	0,4	0,2	-	-	1,3	1,05	150	700	9,2		
8	-	0,1	93,5	4,0	1,0	0,5	0,5	0,4	1,1	200	200	7,3		
9	-	0,1	93,5	1,0	0,2	0,1	-	3,1	1,2	20	300	8,4		
10	2,8	1,0	42,4	12,0	30,5	0,5	3,1	11,0	1,25	250	400	5,5		
11	-	0,1	97,5	0,6	0,3	7,2	0,2	1,1	1,1	40	350	6,5		
12	-	0,1	97,0	0,7	0,2	0,2	-	1,8	1,15	150	400	7,5		
13	-	0,1	97,2	0,5	0,4	0,4	-	1,4	1,3	200	800	6,0		
14	-	-	98,1	-	1,1	0,3	-	0,5	1,05	20	450	7,5		
15	-	0,2	97,9	-	1,0	0,4	-	0,5	1,1	40	300	5,0		

Таблиця 2

Хімічний склад твердого палива (рідкого) та умови його спалювання

№ з/п	Вміст компонентів палива у % за масою в 100 кг палива							α	$t_{п.}$ °C	$t_{нов.}$ °C	$d_{нов.}$ $\frac{z}{M_n^3}$
	C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p				
Торф											
1	49,1	6,1	6,5	0,8	0,1	6,2	31,2	1,51	-	235	9,8
2	50,4	5,9	6,8	0,9	0,1	3,9	32,0	1,46	-	245	12,1
3	49,7	6,0	5,3	0,7	0,1	8,1	30,1	1,48	-	225	10,2
Кам'яне вугілля											
4	79,3	5,2	1,0	0,8	0,5	8,6	4,6	1,5	-	210	13,3
5	83,9	3,8	0,9	1,2	0,8	5,6	3,8	1,47	-	240	14,5
6	81,7	4,1	1,2	1,1	0,7	7,7	3,5	1,49	-	215	15,8
7	79,8	5,0	0,8	1,3	0,6	8,4	4,1	1,45	-	225	13,8
8	83,2	4,5	1,3	1,0	0,5	6,7	2,8	1,51	-	205	12,9
9	82,4	4,9	1,1	0,9	0,7	6,9	3,1	1,44	-	230	14,1
Мазут											
10	85,1	9,9	0,2	0,5	0,3	0,1	3,9	1,25	98	280	13,0
11	88,0	8,5	0,4	0,3	0,5	0,3	2,0	1,3	95	290	14,0
12	84,7	10,6	0,5	0,4	0,7	0,2	3,6	1,38	100	295	15,1
13	86,2	9,7	0,3	0,5	0,4	0,1	2,8	1,26	90	300	14,7
14	87,0	8,6	0,2	0,3	0,6	0,3	3,0	1,37	100	280	13,2
15	84,6	10,7	0,4	0,4	0,3	0,2	3,4	1,34	95	285	13,9
Смола											
№ з/п	C ^г	H ^г	O ^г	N ^г	S ^г	A ^p	W ^p	α	$t_{п.}$ °C	$t_{нов.}$ °C	$d_{нов.}$ $\frac{z}{M_n^3}$
16	90,0	7,0	1,0	0,2	1,8	0,8	7,0	1,25	90	250	10
17	83,0	7,0	2,0	0,8	7,2	0,7	11,0	1,3	95	200	12
18	85,0	9,0	1,0	1,0	4,0	0,8	8,0	1,4	100	300	11
19	84,0	10,5	0,5	1,0	4,0	0,9	10	1,25	90	280	9
20	72,0	8,75	-	3,0	16,25	1,0	8,2	1,3	100	270	14

1. РОЗРАХУНОК ПОВНОГО ГОРІННЯ ПАЛИВА

Завдання

Виконати розрахунок повного горіння сухого генераторного газу, яке має наступний склад (по об'єму): $CH_4 = 42,4\%$, $C_2H_6 = 12\%$, $C_3H_8 = 20,5\%$, $C_4H_{10} = 7,2\%$, $C_5H_{12} = 3,1\%$, $H_2S = 2,8\%$, $CO_2 = 1\%$, $N_2 = 11\%$. Вологовміст газоподібного палива та повітря, які надходять

на горіння $d_T = d_{ное} = 10 \frac{зр \cdot H_2O}{M_H^3}$. Коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,3$, температура попереднього підігріву газоподібного палива та повітря відповідно рівні $t_T = t_{ное} = 100^\circ C$. Пірометричний коефіцієнт прийняти рівним $\mu = 0,75$.

Розв'язання

1.1 Перерахунок сухого складу газу на вологий

Перевіряємо правильність задання складу палива:

$$\sum_{i=1}^n V_i^o = 42,4 + 12,0 + 2,8 + 7,2 + 3,1 + 1,0 + 11 + 20,5 = 100\%$$

Склад вологого газу визначаємо за допомогою коефіцієнта перерахунку:

$$K_T = \frac{804}{804 + d_T} = \frac{804}{804 + 10} = \frac{804}{814} = 0,9877$$

Склад вологого газу:

$$CH_4^e = CH_4 \cdot K_T = 42,4 \cdot 0,9877 = 41,8785\% ,$$

$$C_2H_6^e = C_2H_6 \cdot K_T = 12 \cdot 0,9877 = 11,8524\% ,$$

$$C_3H_8^e = C_3H_8 \cdot K_T = 20,5 \cdot 0,9877 = 20,2479\% ,$$

$$C_5H_{12}^e = C_5H_{12} \cdot K_T = 3,1 \cdot 0,9877 = 3,0619\% ,$$

$$C_4H_{10}^e = C_4H_{10} \cdot K_T = 7,2 \cdot 0,9877 = 7,1114\% ,$$

$$CO_2^e = CO_2 \cdot K_T = 1,0 \cdot 0,9877 = 0,9877\% ,$$

$$N_2^e = N_2 \cdot K_T = 11 \cdot 0,9877 = 10,8647\% .$$

Сумарна кількість палива

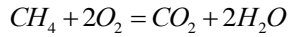
$$\sum_{i=1}^8 v_i^e = 41,8785 + 11,8524 + 20,2479 + 3,0619 + 7,1114 + 0,9877 + 10,8647 = 98,7701\%$$

Кількість водяної пари у вологому паливі:

$$H_2O = 100 - \sum_{i=1}^8 V_i^e = 100 - 98,7701 = 1,2299\%$$

1.2 Розрахунок горіння газоподібного палива

Заповнюємо таблицю 3 наступним чином (на прикладі горіння CH_4). Записуємо рівняння горіння CH_4 .



Визначаємо теоретично необхідні для згорання $41,8785 \text{ м}^3 CH_4$ об'єм O_2 (в прийнятих 100 м^3 газу CH_4 буде $41,8785 \text{ м}^3$). Для спалювання $1 \text{ м}^3 CH_4$ потрібно затратити $2 \text{ м}^3 O_2$, тоді для $41,8785 \text{ м}^3 CH_4$ об'єм O_2 становитиме :

$$V_{O_2}^{ex} = CH_4^e \cdot 2 = 41,8785 \cdot 2 = 83,7570 \frac{\text{м}_n^3 O_2}{100 \text{м}_n^3},$$

Об'єм N_2 розраховуємо з умови, що в повітрі N_2 більше ніж O_2 по об'єму в $\frac{79}{21} = 3,76$ раз, відповідно об'єм N_2 в повітрі буде складати :

$$V_{N_2}^e = V_{O_2}^e \cdot 3,76 = 83,7570 \cdot 3,76 = 314,9263 \frac{\text{м}_n^3 N_2}{100 \text{м}_n^3},$$

При згоранні CH_4 утворюються продукти згорання $RO_2 (CO_2)$, H_2O , N_2 , які з повітря переходять у продукти згорання. Від згорання за нормальних умов $1 \text{ м}^3 CH_4$ утворюється $1 \text{ м}^3 RO_2$, які відповідно, від згорання $41,8785 \text{ м}^3 CH_4$ утворюється :

$$V_{RO_2}^{np.зг} = CH_4^e = 41,8785 \frac{\text{м}_n^3 RO_2}{100 \text{м}_n^3},$$

Аналогічно визначаємо об'єм H_2O , в продуктах згорання:

$$V_{H_2O}^{np.зг} = CH_4 \cdot 2 = 41,8785 \cdot 2 = 83,7570 \frac{\text{м}_n^3 H_2O}{100 \text{м}_n^3},$$

Об'єм теоретично необхідного повітря для згорання $41,8785 \text{ м}^3 CH_4$ без врахування його вологовмісту складе

$$V^e = V_{O_2}^e + V_{N_2}^e = 83,7570 + 314,9263 = 398,6833 \frac{\text{м}_n^3}{100 \text{м}_n^3},$$

Об'єм продуктів згорання, які утворюються при спалюванні 41,8785 $m^3 CH_4$ буде рівний :

$$V_{np.32} = V_{RO_2}^{np.32} + V_{N_2}^{np.32} + V_{H_2O}^{np.32} = 41,8785 \cdot 314,9263 + 83,7570 = 440,5618 \frac{M_n^3 np.32}{100 M_n^3}.$$

Аналогічно заповнюються рядки і для інших компонентів палива, що переходять у продукти згорання.

Далі сумуємо всі величини по вертикальних колонках. Їх значення в таблиці 3 позначені літерами А, Б, В, Г, Д, Е, Ж. Вони визначатимуть об'єм відповідного компоненту, що припадає на 100 m^3 палива, приведеного до нормальних умов при $\alpha = 1,0$ з врахуванням того, що повітря на горіння надходить сухе.

Наступний рядок враховує вологість повітря, в результаті чого об'єм повітря, водяної пари в продуктах згорання і загальний об'єм продуктів згорання 100 m^3 палива за нормальних умов збільшується на величину ε' .

Для повітря та водяної пари :

$$\varepsilon' = \frac{B \cdot d_B}{804} = \frac{1434,4146 \cdot 10}{804} = 17,8410 \frac{M_n^3 H_2O}{100 M_n^3 pal},$$

Інші рядки розраховують при $\alpha > 1,0$ при сухому та вологому повітрі. Результати розрахунку горіння.

Теоретично необхідний об'єм повітря та продуктів згорання приведені за нормальних умов на 1 m^3 палива (при $\alpha = 1,0$)

$$V_6^o = \frac{B + \varepsilon'}{100} = \frac{1434,4146 + 17,8410}{100} = 14,5225 \frac{M_n^3 пов}{M_n^3 pal}.$$

$$V_{RO_2}^0 = \frac{\Gamma}{100} = \frac{173,8354}{100} = 1,7383 \frac{M_n^3 RO_2}{M_n^3 pal}.$$

$$V_{N_2}^0 = \frac{\Delta}{100} = \frac{1143,9317}{100} = 11,4393 \frac{M_n^3 N_2}{M_n^3 pal}.$$

$$V_{H_2O}^0 = \frac{E + \varepsilon'}{100} = \frac{258,2297 + 17,8410}{100} = 2,7607 \frac{M_n^3 H_2O}{M_n^3 pal}.$$

$$V_{np.32}^0 = \frac{Ж + \varepsilon'}{100} = \frac{1575,9968 + 17,8410}{100} = 15,9383 \frac{M_n^3 np.32}{M_n^3 pal}.$$

$$V_{np.32}^0 = \sum_{i=1}^3 V_i^{np.32} = 1,7383 + 11,4393 + 2,7607 = 15,9383 \frac{M_n^3 np.32}{M_n^3 pal}.$$

Таблиця 3

Розрахунок горіння газоподібного палива

Назва компонента	Маса в 100 м ³ палива	Реакції горіння	Повітря			Продукти згорання						
			O ₂	N ₂	V _a	RO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O	V _{под.з.}		
CH ₄	41,8785	CH ₄ +2O ₂ =CO ₂ +2H ₂ O	83,7570	314,9263	398,6833	41,8785	—	—	—	314,9263	83,7570	440,5618
C ₂ H ₆	11,8524	C ₂ H ₆ +3,5O ₂ =2CO ₂ +3H ₂ O	41,4834	155,9776	197,4610	23,7048	—	—	—	155,9776	35,5572	215,2396
C ₃ H ₁₂	3,0619	C ₃ H ₁₂ +8O ₂ =5CO ₂ +6H ₂ O	24,4952	92,1020	116,5972	15,3095	—	—	—	92,1020	18,3714	125,7829
C ₃ H ₈	20,2479	C ₃ H ₈ +5O ₂ =3CO ₂ +4H ₂ O	101,2395	380,6605	481,9000	60,7437	—	—	—	380,6605	80,9916	522,3958
C ₄ H ₁₀	7,1114	C ₄ H ₁₀ +6,5O ₂ =4CO ₂ +5H ₂ O	46,2241	173,8026	220,0267	28,4456	—	—	—	173,8026	35,5570	237,8052
H ₂ S	2,7656	H ₂ S + 1.5O ₂ = SO ₂ + H ₂ O	4,1484	15,5980	19,7464	2,7656	—	—	—	15,5980	2,7656	21,1292
CO ₂	0,9877	—	—	—	—	0,9877	—	—	—	—	—	0,9877
N ₂	10,8647	—	—	—	—	—	—	—	—	10,8647	—	10,8647
H ₂ O	1,2299	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,2299	1,2299
Σ	100%		A	Б	В	Г	О	Д	Е	Ж		
ε=17,8410	$\frac{\text{м}^3 \text{H}_2\text{O}}{100 \cdot \text{м}^3 \text{газ}}$	α = 1,0 повітря сухе	301,3476	1133,0670	1434,4146	173,8354	—	—	—	1143,9317	258,2297	1575,9968
		α = 1,0 повітря вологе	301,3476	1133,0670	1452,2556	173,8354	—	—	—	1143,9317	276,0707	1593,8378
ε=23,1933	$\frac{\text{м}^3 \text{H}_2\text{O}}{100 \cdot \text{м}^3 \text{газ}}$	α = 1,3 повітря сухе	391,7519	1472,9871	1864,7390	173,8354	90,4043	—	—	1483,8518	258,2297	2006,3212
		α = 1,3 повітря вологе	391,7519	1472,9871	1887,9323	173,8354	90,4043	—	—	1483,8518	281,4230	2029,5142

1.3 Результати розрахунку горіння

Питомі витрати повітря та продуктів згорання приведені до нормальних умов ($\alpha > 1,0$ повітря вологе) на 1 м^3 палива:

$$V_g^0 = \frac{B + \varepsilon'}{100} = \frac{1864,7390 + 23,1933}{100} = 18,8793 \frac{\text{м}_n^3 \text{пов}}{\text{м}_n^3 \text{пал}}$$

$$V_{RO_2, \text{нр.зг}}^0 = \frac{Г}{100} = \frac{173,8354}{100} = 1,7383 \frac{\text{м}_n^3 RO_2}{\text{м}_n^3 \text{пал}}$$

$$V_{O_2, \text{нр.зг}}^0 = \frac{(\alpha A - A)}{100} = \frac{(391,7519 - 301,3476)}{100} = 0,9040 \frac{\text{м}_n^3 O_2}{\text{м}_n^3 \text{пал}}$$

$$V_{N_2, \text{нр.зг}}^0 = \frac{(\alpha B - B) + Д}{100} = \frac{(1472,9871 - 1133,0670) + 1143,9317}{100} = 14,8385 \frac{\text{м}_n^3 N_2}{\text{м}_n^3 \text{пал}}$$

$$V_{H_2O, \text{нр.зг}}^0 = \frac{E + \varepsilon'}{100} = \frac{258,2297 + 23,1933}{100} = 2,8142 \frac{\text{м}_n^3 H_2O}{\text{м}_n^3 \text{пал}}$$

$$V_{\text{нр.зг}}^0 = \frac{Ж + \varepsilon'}{100} = \frac{2006,3212 + 23,1933}{100} = 20,2950 \frac{\text{м}_n^3 \text{нр.зг}}{\text{м}_n^3 \text{пал}}$$

Перевірка

$$V_{\text{нр.зг}}^0 = \sum_{i=1}^4 V_{\text{нр.зг}, i}^0 = 1,7383 + 14,8385 + 0,9040 + 2,8142 = 20,2950 \frac{\text{м}_n^3 \text{нр.зг}}{\text{м}_n^3 \text{пал}}$$

1.4 Об'ємні частки продуктів згорання

-при $\alpha = 1,0$

$$r_{RO_2}^0 = \frac{V_{RO_2}}{V_{\text{нр.зг}}} = \frac{1,7383}{15,9383} = 0,1091$$

$$r_{N_2}^0 = \frac{V_{N_2}}{V_{\text{нр.зг}}} = \frac{11,4393}{15,9383} = 0,7178$$

$$r_{H_2O}^0 = \frac{V_{H_2O}}{V_{\text{нр.зг}}} = \frac{2,7607}{15,9383} = 0,1732$$

Перевірка

$$\sum_{i=1}^n r_i^0 = 0,1091 + 0,7178 + 0,1732 = 1,0$$

-при $\alpha = 1,3$

$$r_{RO_2}^{\circ} = \frac{V_{RO_2}^{\circ}}{V_{np.зг.}} = \frac{1,7383}{20,2950} = 0,0857.$$

$$r_{N_2}^{\circ} = \frac{V_{N_2}^{\circ}}{V_{np.зг.}} = \frac{14,8385}{20,2950} = 0,7311.$$

$$r_{O_2}^{\circ} = \frac{V_{O_2}^{\circ}}{V_{np.зг.}} = \frac{0,9040}{20,2950} = 0,0445.$$

$$r_{H_2O}^{\circ} = \frac{V_{H_2O}^{\circ}}{V_{np.зг.}} = \frac{2,8142}{20,2950} = 0,1387.$$

Перевірка

$$\sum_{i=1}^n r_i = 0,0857 + 0,7311 + 0,0445 + 0,1387 = 1,0.$$

1.5 Парціальні тиски продуктів згорання

- при $\alpha = 1,0$

$$P_{RO_2} = r_{RO_2} \cdot P_{абс} = 0,1091 \cdot 101,3 = 11,0518 \text{кПа},$$

$$P_{N_2} = r_{N_2} \cdot P_{абс} = 0,7178 \cdot 101,3 = 72,7131 \text{кПа},$$

$$P_{H_2O} = r_{H_2O} \cdot P_{абс} = 0,1732 \cdot 101,3 = 17,5451 \text{кПа}.$$

Перевірка

$$\sum_{i=1}^n P_i = 11,0518 + 71,7131 + 17,5451 = 101,3 \text{кПа}.$$

- при $\alpha = 1,3$

$$P_{RO_2} = r_{RO_2} \cdot P_{абс} = 0,0857 \cdot 101,3 = 8,6814 \text{кПа},$$

$$P_{O_2} = r_{O_2} \cdot P_{абс} = 0,0445 \cdot 101,3 = 4,5079 \text{кПа},$$

$$P_{N_2} = r_{N_2} \cdot P_{абс} = 0,7311 \cdot 101,3 = 74,0604 \text{кПа},$$

$$P_{H_2O} = r_{H_2O} \cdot P_{абс} = 0,1387 \cdot 101,3 = 14,0503 \text{кПа}.$$

Перевірка

$$\sum_{i=1}^n P_i = 8,6814 + 4,5079 + 74,0604 + 14,0503 = 101,3 \text{кПа}.$$

1.6 Розрахунок теплоти згорання газоподібного палива

Теплота згорання генераторних газів:

$$Q_n^p = \sum_{i=1}^n Q_i^{екз} \cdot r_i,$$

де $Q_i^{екз}$ - екзотермічний ефект реакцій горіння і-го компонента;

r_i - об'ємна доля і-го компонента.

$$Q_n^p = 0,4187 \cdot 35840 + 0,1185 \cdot 63778 + 0,0306 \cdot 146077 + 0,2025 \cdot 91263 + 0,0711 \cdot 118648 + 0,0277 \cdot 23400 = 54599 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_n^3}.$$

Теплота яка виділяється після конденсації пари:

$$Q_{кон} = 2023 \cdot V_{H_2O}^o = 2023 \cdot 2,7607 = 5584,9 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_n^3}.$$

Вища теплота згорання палива:

$$Q_v^p = Q_n^p + Q_{кон} = 54599 + 5584,9 = 60183 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_n^3}.$$

1.7 Розрахунок температур горіння палива

Жаропродуктивна здатність палива визначається при коефіцієнті надлишку повітря рівному 1,0 та температурах попереднього підігріву компонентів горіння рівних $t_{\Gamma} = t_{нов} = 0^{\circ}\text{C}$.

Складаємо рівняння теплового балансу для жаропродуктивної здатності палива

$$Q_n^p = V_{пр.зг.}^o \cdot \bar{C}_{пр.зг.} \cdot t_{жс} = h_{пр.зг.} = 54599 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_n^3}$$

де $C_{пр.зг.}$ - середня ізобарна об'ємна теплоємність продуктів згорання палива від 0°C до $t_{жс}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}_n^3 \cdot \text{K}}$;

$t_{жс}$ - жаропродуктивна температура горіння палива, $^{\circ}\text{C}$.

У даній формулі є дві невідомі величини $C_{пр.зг.}$ та $t_{жс}$, а тому, для знаходження жаропродуктивної температури її значенням задаються. Приймаємо $t'_{жс} = 2000^{\circ}\text{C}$, тоді середня сумарна теплоємність продуктів згорання буде рівна:

$$C_{np.зг.} = \sum_{i=1}^n C_i \cdot r_i^o,$$

де C_i - теплоємність i -го компонента продуктів згорання палива, $\frac{\kappaДж}{M_n^3 \cdot K}$;

r_i^o - об'ємна доля i -го компонента продуктів згорання при $\alpha = 1,0$.

$$\bar{C}_{np.зг.} \Big|_0^{2000} = 0,1091 \cdot 2,4222 + 0,7178 \cdot 1,4889 + 0,1732 \cdot 1,9629 = 1,6730 \frac{\kappaДж}{M_n^3 \cdot K}.$$

$$h'_{np.зг.} = V_{np.зг.}^o \cdot \bar{C}_{np.зг.} \Big|_0^{t'_{жс}} \cdot t'_{жс} = 15,9383 \cdot 1,6730 \cdot 2000 = 53326,6 \frac{\kappaДж}{M_n^3}$$

Так, як $Q_n^p > h'_{np.зг.}$, то приймаємо

$$t''_{жс} = t'_{жс} + 100^\circ C = 200 + 100 = 2100^\circ C.$$

$$\bar{C}_{np.зг.} \Big|_0^{2100} = 0,1091 \cdot 2,4360 + 0,7178 \cdot 1,4956 + 0,1732 \cdot 1,9825 = 1,6827 \frac{\kappaДж}{M_n^3 \cdot K}.$$

$$h'_{np.зг.} = 15,9383 \cdot 1,6827 \cdot 2100 = 56320,7 \frac{\kappaДж}{M_n^3}.$$

Так, як $h''_{np.зг.} > Q_n^p$, то знаходимо жаропродуктивну температуру методом лінійного інтерполювання

$$t_{жс} = t'_{жс} + \frac{Q_n^p - h'_{np.зг.}}{h''_{np.зг.} - h'_{np.зг.}} \cdot 100 = 2000 + \frac{54599 - 53329,6}{56320,7 - 53329,6} \cdot 100 = 2042,4^\circ C,$$

Калориметричну температуру горіння палива визначаємо при заданому значенні коефіцієнта надлишку повітря $\alpha = 1,3$, $t_{Г} = 100^\circ C$, $t_{нов} = 100^\circ C$.

Середня ізобарна теплоємність палива:

$$\bar{C}_n \Big|_0^{100} = 0,4188 \cdot 1,6418 + 0,1185 \cdot 2,3838 + 0,2025 \cdot 3,5099 + 0,03052 \cdot 5,8354 + 0,0711 \cdot 4,7054 + 0,0277 \cdot 1,5324 + 0,009877 \cdot 1,7003 + 0,1086 \cdot 1,3005 + 0,012299 \cdot 1,2909 = 2,4104 \frac{\kappaДж}{M_n^3 \cdot K}.$$

Визначаємо ентальпію палива:

$$h_{\phi}^n = 1 \cdot \bar{C}_n \Big|_0^{100} \cdot t_{Г},$$

де $t_{Г}$ - температура попереднього підігріву палива;

1- розрахунок проводиться для 1 M_n^3 палива.

$$h_{\phi}^n = 1 \cdot 2,4104 \cdot 100 = 241 \frac{\text{кДж}}{M_n^3}.$$

Визначаємо ентальпію повітря

$$h_{\phi}^{нов} = V_{нов}^{\phi} \cdot \bar{C}_{нов} \cdot t_{нов},$$

де $t_{нов}$ - температура повітря;

$C_{нов}$ - середня ізобарна теплоємність повітря.

$$I_{\phi}^{нов} = 18,8793 \cdot 1,3005 \cdot 100 = 2455,3 \frac{\text{кДж}}{M_n^3}.$$

Записуємо рівняння теплового балансу

$$Q_n^p + h_{\phi}^{нов} + h_{\phi}^n = V_{np.зг.}^{\phi} \cdot \bar{C}_{np.зг.} \cdot t_k = h_k.$$

$$h_k = 54599 + 241,04 + 2455,2530 = 57295,3 \frac{\text{кДж}}{M_n^3}.$$

У даній формулі є дві невідомі величини - $C_{np.зг.}$ та t_k , а тому для визначення калориметричної температури горіння палива, однією з величин необхідно попередньо задаватись.

Приймаємо $t'_k = 1700^{\circ}\text{C}$

$$\begin{aligned} \bar{C}_{np.зг.} \Big|_0^{1700} &= 0,0857 \cdot 2,3745 + 0,7311 \cdot 1,4671 + 0,0445 \cdot 1,5463 + 0,1387 \cdot 1,8996 = \\ &= 1,6084 \frac{\text{кДж}}{M_n^3 \cdot K} \end{aligned}$$

$$h'_k = V_{np.зг.}^{\phi} \cdot \bar{C}_{np.зг.} \Big|_0^{t'_k} \cdot t'_k = 20,2950 \cdot 1,6084 \cdot 1700 = 55492,2 \frac{\text{кДж}}{M_n^3}.$$

Так, як $h_k > h'_k$, то переадаємо калориметричною температурою прийнявши $t''_k = t'_k + 100^{\circ}\text{C} = 1700 + 100 = 1800^{\circ}\text{C}$

$$\begin{aligned} \bar{C}_{np.зг.} \Big|_0^{1800} &= 0,0857 \cdot 2,3916 + 0,7311 \cdot 1,4747 + 0,0445 \cdot 1,5542 + 0,1387 \cdot 1,9214 = \\ &= 1,6188 \frac{\text{кДж}}{M_n^3 \cdot K} \end{aligned}$$

$$h''_k = 20,2950 \cdot 1,6188 \cdot 1800 = 59136,3 \frac{\text{кДж}}{M_n^3}.$$

Так, як $h''_k = 59136,3 > I_k = 57295,3 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}$, то калориметрична температура буде рівна:

$$t_k = t'_k + \frac{h_k - h'_k}{h''_k - h'_k} \cdot 100 = 1700 + \frac{57295,3 - 55492,2}{59136,3 - 55492,2} \cdot 100 = 1749,5^\circ\text{C}.$$

Теоретичну температуру горіння палива визначаємо при $\alpha = 1,3, t_r = t_{\text{нов}} = 100^\circ\text{C}, q_3 = 2\%$.

Визначаємо коефіцієнт тепловиділення:

$$\eta' = \frac{h''_{\phi} + h''_{\phi}}{Q_n^p} + \frac{100 - q_3}{100} = \frac{241,04 + 2455,2530}{54599} + \frac{100 - 2}{100} = 1,02938.$$

Теоретична ентальпія продуктів згорання

$$h_m = Q_n^p \cdot \eta' = 54599 \cdot 1,02938 = 56203,1 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Для знаходження теоретичної температури горіння палива, приймаємо $t'_m = 1700^\circ\text{C}$,

$$\begin{aligned} \bar{C}_m \Big|_0^{1700} &= 0,0857 \cdot 2,3745 + 0,7311 \cdot 1,4671 + 0,0445 \cdot 1,5463 + 0,1387 \cdot 1,8996 = \\ &= 1,6084 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

$$h'_m = 20,2950 \cdot 1,6084 \cdot 1700 = 55492,2 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Передадась теоретичною температурою горіння палива, прийнявши $t''_m = 1800^\circ\text{C}$, тоді в результаті розрахунків, отримаємо

$$h''_m = 59136,3 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Тоді теоретична температура рівна:

$$t_m = t'_m + \frac{h_m - h'_m}{h''_m - h'_m} \cdot 100 = 1700 + \frac{56203,1 - 55492,2}{59136,3 - 55492,2} \cdot 100 = 1719,5^\circ\text{C}.$$

Визначаємо розрахункову температуру горіння

$$t_p = t_k \cdot \mu = 1719,5 \cdot 0,75 = 1289,6^\circ\text{C}.$$

1.8 Розрахунок температури горіння палива з врахуванням дисоціації трьохатомних газів

Активна дисоціація трьохатомних газів, які містяться в продуктах згоряння палива, починається при досягненні розрахункової температури горіння палива $t_p \geq 1500^\circ\text{C}$. Прийmemo розрахункову температуру горіння палива рівною $t_p = 1749,5^\circ\text{C}$, та визначимо ступінь дисоціації CO_2 при даній температурі та парціальному тиску $P_{\text{CO}_2} = 8,6814 \text{ кПа}$ (див.п.1.5), використовуючи для розрахунків додатки 5-6.

Результати дисоціації представимо у вигляді таблиці 4.

Таблиця 4

Ступінь дисоціації двоокису вуглецю

$t_p, ^\circ\text{C}$ \ / \ $P_i, \text{кПа}$	7,85	8,6814	8,83
1700	3,0	2,9152	2,9
1749,5	3,9900	3,8632	3,8405
1800	5,0	4,8303	4,8

$$C_{\text{CO}_2}^{\kappa} = 3,9900 + \frac{3,8405 - 3,9900}{8,83 - 7,85} (8,6814 - 7,85) = 3,8632 .$$

Визначаемо ступінь дисоціації H_2O при $t_p = 1749,5^\circ\text{C}$ та парціальному тиску $P_{\text{H}_2\text{O}} = 14,0503 \text{ кПа}$ (див.п.1.5).

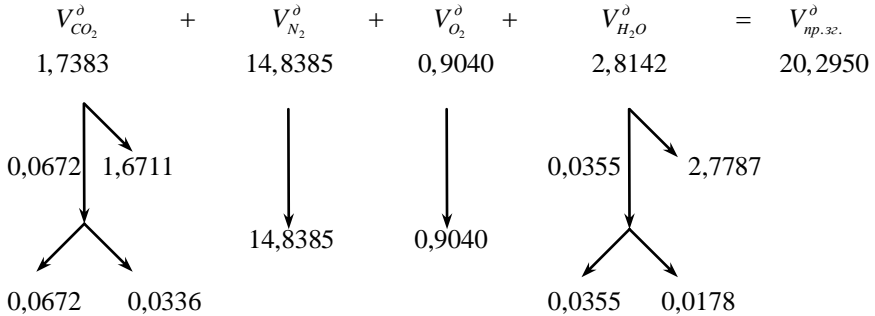
Таблиця 5

Ступінь дисоціації водяної пари

$t_p, ^\circ\text{C}$ \ / \ $P_i, \text{кПа}$	13,73	14,0503	15,69
1700	0,95	0,9418	0,9
1749,5	1,2718	1,2620	1,2119
1800	1,6	1,5886	1,53

$$C_{\text{H}_2\text{O}}^{\kappa} = 1,2718 + \frac{1,2119 - 1,2718}{15,69 - 13,73} (14,0503 - 13,73) = 1,2620 .$$

Записуємо склад продуктів згорання до дисоціації



Продисоціювало

$$V_{CO_2}^{дис.} = \frac{V_{CO_2}^{дис.} \cdot C_{CO_2}^{\kappa}}{100} = \frac{1,7383 \cdot 3,8632}{100} = 0,0672 \frac{M_H^3 CO_2}{M_H^3 \text{нал.}}$$

$$V_{H_2O}^{дис.} = \frac{V_{H_2O}^{дис.} \cdot C_{H_2O}^{\kappa}}{100} = \frac{2,8142 \cdot 1,2620}{100} = 0,0355 \frac{M_H^3 H_2O}{M_H^3 \text{нал.}}$$

Залишилось в продуктах згорання

$$V_{CO_2}^{зал.} = V_{CO_2} - V_{CO_2}^{дис.} = 1,7383 - 0,0672 = 1,6711 \frac{M_H^3 CO_2}{M_H^3 \text{нал.}}$$

$$V_{H_2O}^{зал.} = V_{H_2O} - V_{H_2O}^{дис.} = 2,8142 - 0,0355 = 2,7787 \frac{M_H^3 H_2O}{M_H^3 \text{нал.}}$$

Кількість виділеного в результаті дисоціації CO_2

-CO

$$V_{CO}^{дис.} = V_{CO_2}^{дис.} = 0,0672 \frac{M_H^3 CO_2}{M_H^3 \text{нал.}}$$

-O₂

$$V_{O_2(CO_2)}^{дис.} = \frac{V_{CO}^{дис.}}{2} = \frac{0,0672}{2} = 0,0336 \frac{M_H^3 O_2}{M_H^3 \text{нал.}}$$

Кількість виділеного в результаті дисоціації H_2O

- H_2

$$V_{H_2}^{disc.} = V_{H_2O}^{disc.} = 0,0355 \frac{M_n^3 H_2}{M_n^3 пал.}$$

- O_2

$$V_{O_2(H_2O)}^{disc.} = \frac{V_{H_2O}^{disc.}}{2} = \frac{0,0355}{2} = 0,0178 \frac{M_n^3 O_2}{M_n^3 пал.}$$

Склад продуктів згорання після дисоціації:

$$V_{np.зг.}^{disc.} = V_{CO_2}^{зал.} + V_{CO}^{зал.} + V_{O_2}^{зал.} + V_{N_2}^{зал.} + V_{H_2O}^{зал.} + V_{H_2}^{зал.},$$

$$\text{де } V_{CO_2}^{зал.} = 1,6711 \frac{M_n^3 CO_2}{M_n^3 пал.}, \quad V_{CO}^{зал.} = 0,0672 \frac{M_n^3 CO}{M_n^3 пал.}, \quad V_{N_2}^{зал.} = 14,8385 \frac{M_n^3 N_2}{M_n^3 пал.}$$

$$V_{O_2}^{зал.} = V_{O_2(CO_2)}^{disc.} + V_{O_2(H_2O)}^{disc.} + V_{O_2} = 0,0336 + 0,0178 + 0,9040 = 0,9554 \frac{M_n^3 O_2}{M_n^3 пал.}$$

$$V_{H_2}^{зал.} = 0,0355 \frac{M_n^3 H_2}{M_n^3 пал.}, \quad V_{H_2O}^{зал.} = 2,7787 \frac{M_n^3 H_2O}{M_n^3 пал.}$$

$$V_{np.зг.}^{disc.} = 1,6711 + 0,0672 + 0,9554 + 14,8385 + 0,0355 + 2,7787 = 20,3464 \frac{M_n^3 np.зг.}{M_n^3 пал.}$$

Об'ємні долі продуктів згорання після дисоціації

$$r_{CO_2}^{disc.} = \frac{1,6711}{20,3464} = 0,0821, \quad r_{CO}^{disc.} = \frac{0,0672}{20,3464} = 0,0033, \quad r_{O_2}^{disc.} = \frac{0,9554}{20,3464} = 0,0470.$$

$$r_{N_2}^{disc.} = \frac{14,8385}{20,3464} = 0,7293, \quad r_{H_2O}^{disc.} = \frac{2,7786}{20,3464} = 0,1366, \quad r_{H_2}^{disc.} = \frac{0,0355}{20,3464} = 0,0017.$$

Перевірка

$$\sum_{i=1}^n r_i^{disc.} = 0,0821 + 0,0033 + 0,0470 + 0,7293 + 0,1366 + 0,0017 = 1,0.$$

Витрати теплоти на дисоціацію:

$$Q_{CO_2}^{disc.} = \frac{V_{CO_2}^{disc.} \cdot q_{CO_2}^{disc.}}{22,4} = \frac{0,0672 \cdot 243 \cdot 10^3}{22,4} = 729 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3}.$$

$$Q_{H_2O}^{disc.} = \frac{V_{H_2O}^{disc.} \cdot q_{H_2O}^{disc.}}{22,4} = \frac{0,0355 \cdot 286 \cdot 10^3}{22,4} = 453,3 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3}.$$

Теплоємність продуктів згорання палива при температурі $t_p = 1749,5^\circ\text{C}$ (до дисоціації)

$$\begin{aligned} \bar{C}_{np.з.} \Big|_0^{1749,5} &= 0,0857 \cdot 2,3830 + 0,7311 \cdot 1,4709 + 0,0445 \cdot 1,5502 + 0,1387 \cdot 1,9105 = \\ &= 1,6135 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

Ентальпія продуктів згорання при температурі $t_p = 1749,5^\circ\text{C}$ (до дисоціації)

$$h_p = V_{np.з.}^0 \cdot \bar{C}_{np.з.} \Big|_0^{t_p} = 20,2950 \cdot 1,6135 \cdot 1749,5 = 57289,1 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3}.$$

Ентальпія продуктів згорання палива з врахуванням витрат теплоти на дисоціацію CO_2 і H_2O

$$h_p^{disc.} = h_p - Q_{CO_2}^{disc.} - Q_{H_2O}^{disc.} = 57289,1 - 729 - 453,3 = 56106,8 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3}.$$

Визначаємо калориметричну температуру горіння палива з врахуванням дисоціації CO_2 і H_2O :

- приймаємо $t_p^{disc.'} = 1700^\circ\text{C}$.

$$\begin{aligned} C_{np.з.} \Big|_0^{1700} &= 0,0821 \cdot 2,3745 + 0,0033 \cdot 1,48226 + 0,7293 \cdot 1,4671 + 0,1366 \cdot 1,8996 + \\ &+ 0,0017 \cdot 1,38305 + 0,0470 \cdot 1,5463 = 1,6043 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3 \cdot \text{К}} \end{aligned}$$

$$h_p^{disc.'} = 20,3464 \cdot 1,6043 \cdot 1700 = 55490,9 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3}.$$

Так, як $h_p^{disc.'} = 55490,9 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3} < h_p^{disc.} = 56106,8 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3}$, то

- приймаємо $t_p^{disc.} = 1800^\circ\text{C}$.

$$C_{np.зг.} \Big|_0^{1800} = 0,0821 \cdot 2,3916 + 0,0033 \cdot 1,48980 + 0,7293 \cdot 1,4747 + 0,1366 \cdot 1,9214 +$$

$$+ 0,0017 \cdot 1,39143 + 0,0470 \cdot 1,5542 = 1,6146 \frac{\text{кДж}}{\text{М}_n^3 \cdot \text{К}}.$$

$$h_p^{\text{дис.}''} = 20,3463 \cdot 1,6146 \cdot 1800 = 59132 \frac{\text{кДж}}{\text{М}_n^3}.$$

Так, як $h_p^{\text{дис.}''} = 59132 \frac{\text{кДж}}{\text{М}_n^3} > h_p^{\text{дис.}} = 56106,8 \frac{\text{кДж}}{\text{М}_n^3}$, то розрахункова температура горіння палива з врахуванням дисоціації буде рівна:

$$t_p^{\text{дис.}} = 1700 + \frac{56106,8 - 55490,9}{59132 - 55490,9} \cdot 100 = 1717^\circ\text{C}.$$

1.9 Необхідність попереднього підігріву компонентів горіння

Розрахунок проводимо при заданому значенні коефіцієнта надлишку повітря $\alpha = 1,3$ та розрахунковій температурі горіння $t_p = 1717^\circ\text{C}$.

Необхідна калориметрична температура горіння палива:

$$t_k = \frac{t_p}{\mu} = \frac{1717}{0,888} = 1933,5^\circ\text{C}.$$

Теплоємність продуктів згорання при калориметричній температурі буде рівна:

$$C_{np.зг.} \Big|_0^{1933,5} = 2,4124 \cdot 0,0857 + 1,4844 \cdot 0,7311 + 1,9492 \cdot 0,1387 + 1,5643 \cdot 0,0445 =$$

$$= 1,6320 \frac{\text{кДж}}{\text{М}_n^3 \cdot \text{К}}.$$

Визначаємо ентальпію продуктів згорання палива:

$$h_{np.зг.} = 1,6320 \cdot 1933,5 \cdot 20,2950 = 64033,7 \frac{\text{кДж}}{\text{М}_n^3}.$$

Оскільки $A = h_{np.зг.} - Q_n^p = 64033,7 - 54599 = 9434,7 > 0$, то необхідний попередній підігрів компонентів горіння. Задаємось температурою газоподібного палива, яке надходить на горіння рівною $t'_n = 100^\circ\text{C}$.

$$C_n \Big|_0^{100} = 0,418785 \cdot 1,64175 + 0,118524 \cdot 2,38376 + 0,030619 \cdot 5,83542 + \\ + 0,202479 \cdot 3,50996 + 0,071114 \cdot 4,70535 + 0,009877 \cdot 1,7003 + 0,108647 \cdot 1,3005 + \\ + 0,012299 \cdot 1,5032 + 0,027656 \cdot 1,53244 = 2,4104 \frac{\kappaДж}{M_n^3 \cdot K}.$$

Визначаємо ентальпію палива, яке надходить на горіння

$$h_\phi^n = 1 \cdot C_n \Big|_0^{100} \cdot t_n = 1 \cdot 2,4104 \cdot 100 = 241 \frac{\kappaДж}{M_n^3}.$$

Визначаємо необхідну ентальпію підігріву повітря

$$B = h_\phi^e = A - h_\phi^n = 9434,7 - 241 = 9193,7 \frac{\kappaДж}{M_n^3}.$$

Так, як $B > h_\phi^{нов}$, то приймаємо температуру підігріву повітря $t'_e = 400^\circ C$

$$h_\phi^{нов'} = 400 \cdot 18,8793 \cdot 1,3290 = 10036,2 \frac{\kappaДж}{M_n^3}.$$

Оскільки $h_\phi^{нов'} > B$, то перепадаємо температуру попереднього підігріву повітря, прийнявши $t''_e = 300^\circ C$,

$$h_\phi^{нов''} = 300 \cdot 18,8793 \cdot 1,3172 = 7460,3 \frac{\kappaДж}{M_n^3}.$$

Остаточно отримаємо

$$t_{нов} = 300 + \frac{9193,7 - 7460,3}{10036,2 - 7460,3} \cdot 100 = 367^\circ C.$$

1.2 Розрахунок неповного горіння палива без утворення сажного вуглецю

Розрахунок проводимо при коефіцієнті витрати повітря $\alpha = 0,7$, розрахункову температуру горіння палива приймемо рівною $t_p = 1450^\circ C$.

Вводимо низку позначень: $V_{CO_2} = x$; $V_{CO} = y$; $V_{H_2O} = z$; $V_{H_2} = u$.

Складаємо систему чотирьох рівнянь:

- по водню:

$$2 \cdot z + 2 \cdot u = 4 \cdot CH_4 + 6 \cdot C_2H_6 + 8 \cdot C_3H_8 + 10 \cdot C_4H_{10} + 10 \cdot C_5H_{12} + 2 \cdot H_2O ,$$

$$2 \cdot z + 2 \cdot u = 4 \cdot 41,8785 + 6 \cdot 11,8524 + 8 \cdot 20,2479 + 10 \cdot 7,1114 + 2 \cdot 2,7656 = 516,5 .$$

- по вуглецю:

$$x + y = 1 \cdot CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 5 \cdot C_3H_{12} + 3 \cdot C_3H_8 + 4 \cdot C_4H_{10} + 1 \cdot CO_2 ,$$

$$x + y = 41,8785 + 2 \cdot 11,8524 + 3 \cdot 20,2479 + 5 \cdot 3,0619 + 4 \cdot 7,1114 + 0,9877 = 171,1 .$$

- по кисню:

$$2 \cdot x + y + z = 2 \cdot CO_2 + 1 \cdot H_2O + 2 \cdot 0,21 \cdot \alpha \cdot V_{нов}^o ,$$

$$2 \cdot x + y + z = 2 \cdot 0,9877 + 1,2299 + 2 \cdot 0,21 \cdot 0,7 \cdot 1452,2556 = 430,2 .$$

Визначаємо константу рівноваги при $t_p = 1450^\circ C$

$$K_c = \frac{x \cdot u}{y \cdot z} = 0,2785 .$$

Складаємо систему з чотирьох рівнянь

$$\begin{cases} 2 \cdot z + 2 \cdot u = 516,5 \\ x + y = 171,1 \\ 2 \cdot x + y + z = 430,2 \\ \frac{x \cdot u}{y \cdot z} = 0,2785 \end{cases}$$

Розв'язавши систему чотирьох рівнянь з чотирма невідомими, отримаємо

$$y = V_{CO} = 98,8869 \frac{M_n^3 CO}{100 M_n^3} ; \quad x = V_{CO_2} = 72,1829 \frac{M_n^3 CO_2}{100 M_n^3} ;$$

$$z = V_{H_2O} = 186,9157 \frac{M_n^3 H_2O}{100 M_n^3} ; \quad u = V_{H_2} = 71,3140 \frac{M_n^3 H_2}{100 M_n^3}$$

Кількість азоту в продуктах неповного згоряння

$$V_{N_2} = V_{N_2}^{нал} + V_{N_2}^{нов} = 10,8647 + 0,79 \cdot 0,7 \cdot 1452,2556 = 813,9620 \frac{M_n^3 N_2}{100 M_n^3}$$

Об'єм продуктів неповного згоряння газоподібного палива

$$V_{np.зг.} = 98,8869 + 72,1829 + 186,9157 + 71,3140 + 813,9620 =$$

$$= 1243,2616 \frac{M_n^3 np.зг.}{100 M_n^3}$$

Об'ємні долі продуктів неповного згоряння

$$r_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{np.зг.}} = \frac{813,9620}{1243,2616} = 0,6547; \quad r_{CO} = \frac{V_{CO}}{V_{np.зг.}} = \frac{98,8869}{1243,2616} = 0,0795.$$

$$r_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{np.зг.}} = \frac{72,1829}{1243,2616} = 0,0581; \quad r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{np.зг.}} = \frac{71,314}{1243,2616} = 0,0574.$$

$$r_{H_2} = \frac{V_{H_2}}{V_{np.зг.}} = \frac{186,9157}{1243,2616} = 0,1503.$$

$$\sum_{i=1}^n r_i = 0,6547 + 0,0795 + 0,0581 + 0,0574 + 0,1503 = 1,0$$

Література

1. Костюк О. П. Паливо та обладнання для його спалювання : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2011. 121 с.
2. Частухин В. И., Частухин В. В. Топливо и теория горения. Киев : Вища школа, 1989. 237 с.
3. Акмен Р. Г. Топливо, основы теории горения и топочные устройства. Харьков, 2005. 141 с.
4. Основы практической теории горения : учебное пособие для вузов / В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахмедов и др. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
5. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника : справочник / Под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. М. : Энергоиздат, 1983. 552 с.
6. Филипьев С. В. Промышленные печи и газовое хозяйство заводов / Киев : Вища школа, 1976. 240 с.
7. Мисак Й. С., Гнатишин Я. М., Івасик Я. Ф. Паливні пристрої для спалювання низькосортних палив : навчальний посібник. Львів, 2002. 67 с.

ДОДАТКИ

Додаток 1

Екзотермічні ефекти горіння різних газів

Газ	Хімічна формула	Екзотермічний ефект реакції горіння, $\text{кДж} / \text{м}_n^3$
Окис вуглецю	CO	12770
Водень	H ₂	10800
Сірководень	H ₂ S	23400
Метан	CH ₄	35818
Етан	C ₂ H ₆	63748
н-Пропан	C ₃ H ₈	91255
н-Бутан	C ₄ H ₁₀	118646
н-Пентан	C ₆ H ₁₂	146077
Бензол	C ₆ H ₆	140375
Метилбензол	C ₇ H ₈	168393
Етилбензол	C ₈ H ₁₀	195850
Етилен	C ₂ H ₄	59063
Пропилен	C ₃ H ₆	86001
Бутилен	C ₄ H ₈	113508
Пентилен	C ₅ H ₁₀	140885
Ацетилен	C ₂ H ₂	56053
Гексан	C ₆ H ₁₄	172978
Гептан	C ₇ H ₁₆	200212
н-Октан	C ₈ H ₁₈	227609
Ізопропілбензол	C ₉ H ₁₂	223061
Пропілциклогексан	C ₉ H ₁₈	246647
Бутилциклогексан	C ₁₀ H ₂₀	278369

Додаток 2

Середні ізобарні об'ємні теплоємності газів, кДж/(м³К).

t, °C	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O	Повітря
0	1,5999	1,2988	1,3059	1,4943	1,2971
100	1,7003	1,3005	1,3177	1,5052	1,3005
200	1,7874	1,3038	1,3352	1,5224	1,3072
300	1,8628	1,3110	1,3562	1,5425	1,3172
400	1,9298	1,3206	1,3775	1,5655	1,3290
500	1,9888	1,3323	1,3980	1,5898	1,3428
600	2,0412	1,3453	1,4168	1,6149	1,3566
700	2,0885	1,3587	1,4345	1,6413	1,3708
800	2,1312	1,3717	1,4499	1,6681	1,3842
900	2,1693	1,3846	1,4646	1,6957	1,3976
1000	2,2036	1,3972	1,4776	1,7230	1,4098
1100	2,2350	1,4089	1,4893	1,7502	1,4215
1200	2,2639	1,4202	1,5006	1,7770	1,4328
1300	2,2899	1,4307	1,5107	1,8029	1,4550
1400	2,3137	1,4408	1,5203	1,8280	1,4642
1500	2,3355	1,4499	1,5295	1,8528	1,4730
1600	2,3556	1,4588	1,5379	1,8762	1,4809
1700	2,3745	1,4671	1,5463	1,8996	1,4889
1800	2,3916	1,4747	1,5542	1,9214	1,4960
1900	2,4075	1,4822	1,5618	1,9424	1,5031
2000	2,4222	1,4889	1,5693	1,9629	1,5094
2100	2,4360	1,4956	1,5759	1,9825	1,5174
2200	2,4486	1,5019	1,5831	2,0010	1,5220
2300	2,4603	1,5073	1,5898	2,0200	1,5274
2400	2,4712	1,5128	1,5965	2,0366	1,5341
2500	2,4912	1,5178	1,6027	2,0529	

Додаток 3

Середні ізобарні об'ємні теплоємності газів, кДж/(м³К).

t, °C	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	C ₄ H ₆	C ₅ H ₈	C ₇ H ₁₄	C ₈ H ₁₆	C ₈ H ₁₈	C ₆ H ₆
0	1.54966	2.20937	3.04855	4.12838	5.12740	6.15908	3.39775	4.48009	6.96668	6.47310	8.22746	3.28763
100	1.64175	2.38376	3.50996	4.70535	5.83542	6.97973	3.88135	5.10814	7.77526	7.64546	9.27002	3.95002
200	1.75854	2.77406	3.96551	5.25636	6.51539	7.78363	4.25399	5.56871	8.60010	8.78014	10.31676	4.61952
300	1.88579	3.04364	4.36913	5.69156	7.13549	8.51636	4.59733	6.02928	9.38725	9.95201	11.28396	5.20025
400	2.01514	3.30777	4.75978	6.26710	7.74093	9.22815	4.91973	6.44798	10.11160	10.82339	12.20929	5.70646
500	2.13988	3.55182	5.09390	6.68915	8.25635	9.84364	5.21282	6.82481	10.76896	11.68591	13.01319	6.15112
600	2.26044	3.77703	5.43221	7.11497	8.78307	10.45493	5.47660	7.15977	11.35514	12.47307	13.79197	6.55098
700	2.37639	3.98549	5.72363	7.48510	9.23150	10.98250	5.71944	7.45286	11.89526	13.18067	14.48283	6.90394
800	2.49360	4.18014	5.98867	7.80834	9.62549	11.44725	5.94135	7.78782	12.39352	13.82547	15.08994	7.22174
900	2.60202	4.36097	6.23151	8.11441	9.99186	11.88270	6.14652	8.03904	12.85409	14.42421	15.66356	7.50938
1000	2.69871	4.52841	6.46138	8.40415	10.34482	12.29721	6.33912	8.29026	13.26441	14.96433	16.19950	7.77065
1100	2.78578	4.68288	6.67785	8.67881	10.67936	12.69079	6.51497	8.54148	13.67474	15.45840	16.71031	8.00806
1200	2.86239	4.82436	6.88175	8.93841	10.99673	13.05506	6.67408	8.70896	14.02645	15.90641	17.17088	8.22076
t, °C	C ₃ H ₆	C ₄ H ₈	C ₅ H ₁₀	C ₂ H ₂	C ₃ H ₄	C ₆ H ₁₂	C ₉ H ₁₈	H ₂ S	CO	H ₂	SO ₂	C ₂ H ₄
0	2.67675	3.27633	4.80249	1.86991	2.55742	5.83668	7.50729	1.50732	1.29923	1.27662	1.73340	1.82679
100	3.04856	3.76411	5.48497	2.04656	2.85051	6.62802	8.78851	1.53244	1.30174	1.29085	1.81300	2.06210
200	3.37933	4.27032	6.06696	2.16460	3.09503	7.33562	10.04880	1.56175	1.30718	1.29713	1.88830	2.28275
300	3.70591	4.74094	6.62383	2.26098	3.32490	8.00554	11.23790	1.59525	1.31681	1.29923	1.95530	2.49545
400	4.00487	5.17597	7.13565	2.34392	3.52838	8.62522	12.30978	1.63293	1.32895	1.30216	2.01810	2.68596
500	4.28330	5.57415	7.59222	2.41640	3.71722	9.18209	13.27279	1.67061	1.34277	1.30509	2.08100	2.86349
600	4.53913	5.93842	8.01392	2.48235	3.89265	9.68453	14.14368	1.70830	1.35743	1.30802	2.14440	3.02594
700	4.77653	6.26878	8.39494	2.53306	4.05176	10.14510	14.93084	1.74598	1.37208	1.31221	2.15210	3.16998
800	4.99132	6.57359	8.75083	2.59667	4.19537	10.57217	15.64681	1.78366	1.38632	1.31681	2.18140	3.34545
900	5.19104	6.85538	9.07323	2.65217	4.32936	10.96575	16.31673	1.81716	1.39971	1.32267	2.21500	3.43167
1000	5.37234	7.11120	9.37888	2.70091	4.45968	11.33002	16.91548	1.85065	1.41269	1.32895	2.23590	3.54723
1100	5.54024	7.34860	9.65522	2.74705	4.57220	11.66498	17.46816	1.88415	1.42484	1.33607	2.26100	3.65567
1200	5.69725	7.56717	9.91063	2.79088	4.67688	11.96644	17.96641	1.90927	1.43614	1.34190	2.27770	3.75281

Додаток 4

Середні ізобарні об'ємні теплоємності газів, кДж/(м³К).

t °C	CO	H ₂	SO ₂
0	1.29923	1.27662	1.73340
100	1.30174	1.29085	1.81300
200	1.30718	1.29713	1.88830
300	1.31681	1.29923	1.95530
400	1.32895	1.30216	2.01810
500	1.34277	1.30509	2.08100
600	1.35743	1.30802	2.11440
700	1.37208	1.31221	2.15210
800	1.38631	1.3168	2.18140
900	1.39971	1.32267	2.21500
1000	1.41269	1.32895	2.23590
1100	1.42484	1.33607	2.26100
1200	1.43614	1.34319	2.27770
1300	1.44626	1.35082	2.28932
1400	1.45631	1.35878	2.31318
1500	1.46552	1.36715	2.33495
1600	1.47431	1.37510	2.35504
1700	1.48226	1.38305	2.37388
1800	1.48980	1.39143	2.39104
1900	1.49691	1.39938	2.40695
2000	1.50361	1.40733	2.42160
2100	1.50989	1.41487	2.43541
2200	1.51575	1.42240	2.44797
2300	1.52119	1.42994	2.45969
2400	1.52663	1.43705	2.47058
2500	1.53166	1.44459	2.48062

Ступінь дисоціації двоокису вуглецю, %

t, °C	Парціальний тиск двоокису вуглецю, кПа																							
	2.94	3.93	4.90	5.88	6.86	7.85	8.83	9.81	11.77	13.73	15.69	17.65	19.61	24.52	29.42	34.32	39.23	44.13	49.03	58.84	68.65	78.45	88.26	98.07
1500	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
1600	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.55	1.5	1.45	1.4	1.35	1.3	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0	0.95	0.9	0.85	0.83	0.79	0.75	0.72
1700	4.1	3.8	3.5	3.3	3.1	3.0	2.9	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.0	1.9	1.8	1.75	1.7	1.65	1.6	1.6	1.5	1.4	1.3
1800	6.9	6.3	5.9	5.5	5.2	5.0	4.8	4.6	4.4	4.2	4.0	3.8	3.7	3.5	3.3	3.1	3.0	2.9	2.75	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2
1900	11.1	10.1	9.5	8.9	8.5	8.1	7.8	7.6	7.2	6.8	6.5	6.3	6.1	5.6	5.3	5.1	4.9	4.7	4.5	4.3	4.1	3.9	3.7	3.6
2000	18.0	16.5	15.4	14.6	13.9	13.4	12.9	12.5	11.8	11.2	10.8	10.4	10.0	9.4	8.8	8.4	8.0	7.7	7.4	7.1	6.8	6.5	6.2	6.0
2100	25.9	23.9	22.4	21.3	20.3	19.6	18.9	18.3	17.3	16.6	15.9	15.3	14.9	13.9	13.1	12.5	12.0	11.5	11.2	10.5	10.1	9.7	9.3	9.0
2200	37.6	35.1	33.1	31.5	30.3	29.2	28.3	27.5	26.1	25.0	24.1	23.3	22.6	21.2	20.1	19.2	18.5	17.9	17.3	16.4	15.6	15.0	14.5	14.0
2300	47.6	44.7	42.5	40.7	39.2	37.9	36.9	35.9	34.3	32.9	31.8	30.9	30.0	28.2	26.9	25.7	24.8	24.0	23.2	22.1	21.1	20.3	19.6	19.0
2400	59.0	56.0	53.7	51.8	50.2	48.8	47.6	46.5	44.6	43.1	41.8	40.6	39.6	37.5	35.8	34.5	33.3	32.3	31.4	29.9	28.7	27.7	26.8	26.0
2500	69.1	66.3	64.1	62.2	60.6	59.3	58.0	56.9	55.0	53.4	52.0	50.7	49.7	47.3	45.4	43.9	42.6	41.4	40.4	38.7	37.2	36.0	34.9	34.0
2600	77.7	75.2	73.3	71.6	70.2	68.9	67.8	66.7	64.9	63.4	62.0	60.8	59.7	57.4	55.5	53.8	52.4	51.2	50.1	48.2	46.6	45.3	44.1	43.0
2700	84.4	82.5	81.1	79.8	78.6	77.6	76.6	75.7	74.1	72.8	71.6	70.5	69.4	67.3	65.5	63.9	62.6	61.3	60.3	58.4	56.8	55.4	54.1	53.0
2800	89.6	88.3	87.2	86.1	85.2	84.4	83.7	83.0	81.7	80.6	79.6	78.7	77.9	76.1	74.5	73.2	71.9	70.8	69.9	68.1	66.6	65.3	64.1	63.0
2900	93.2	92.2	91.4	90.6	90.0	89.4	88.8	88.3	87.4	86.5	85.8	85.1	84.5	83.0	86.8	80.7	79.7	78.8	78.0	76.5	75.2	74.0	73.0	72.0
3000	95.6	94.9	94.4	93.9	93.5	93.1	92.7	92.3	91.7	91.1	90.6	90.1	89.6	88.5	87.6	86.8	86.0	85.4	84.7	83.6	82.5	81.7	80.8	80.0

Ступінь дисоціації водяної пари, %

t, °C	Частціальний тиск водяної пари, кПа																							
	2,94	3,93	4,90	5,88	6,86	7,85	8,83	9,81	11,77	13,73	15,69	17,65	19,61	24,52	29,42	34,32	39,23	44,13	49,03	58,84	68,65	78,75	88,26	98,07
1600	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,63	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48	0,46	0,44	0,42	0,40	0,38	0,35	0,32	0,30	0,29	0,28
1700	1,60	1,45	1,35	1,27	1,20	1,16	1,15	1,08	1,02	0,95	0,90	0,85	0,80	0,76	0,73	0,70	0,67	0,64	0,62	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50
1800	2,70	2,40	2,25	2,10	2,00	1,90	1,85	1,80	1,70	1,60	1,53	1,46	1,40	1,30	1,25	1,20	1,15	1,10	1,05	1,00	0,95	0,90	0,86	0,83
1900	4,45	4,05	3,80	3,60	3,40	3,25	3,10	3,00	2,85	2,70	2,60	2,50	2,40	2,20	2,10	2,00	1,90	1,80	1,70	1,63	1,56	1,50	1,45	1,40
2000	6,30	5,75	5,35	5,05	4,80	4,60	4,45	4,30	4,00	3,80	3,55	3,50	3,40	3,15	2,95	2,80	2,65	2,57	2,50	2,40	2,30	2,20	2,10	2,00
2100	9,35	8,55	7,95	7,50	7,10	6,80	6,55	6,35	6,00	5,70	5,45	5,25	5,10	4,80	4,55	4,30	4,10	3,90	3,70	3,55	3,40	3,25	3,10	3,00
2200	13,4	12,3	11,5	10,8	10,3	9,90	9,60	9,30	8,80	8,35	7,95	7,65	7,40	6,90	6,50	6,25	5,90	5,65	5,40	5,10	4,00	4,70	4,55	4,40
2300	17,5	16,0	15,4	15,0	14,3	13,7	13,3	12,9	12,2	11,6	11,1	10,7	10,4	9,60	9,10	8,7	8,4	8,0	7,7	7,3	6,9	6,7	6,4	6,2
2400	24,4	22,5	21,0	20,0	19,1	18,4	17,7	17,2	16,3	15,6	15,0	14,4	13,9	13,0	12,2	11,7	11,2	10,8	10,4	9,9	9,4	9,0	8,7	8,4
2500	30,9	28,5	26,8	25,6	24,5	23,5	22,7	22,1	20,9	20,0	19,3	18,6	18,0	16,8	15,9	15,2	14,6	14,1	13,7	12,9	12,3	11,7	11,3	11,0
2600	39,7	37,1	35,1	33,5	32,1	31,0	30,1	29,2	27,8	26,7	25,7	24,8	24,1	22,6	21,5	20,5	19,7	19,1	18,5	17,5	16,7	16,0	15,5	15,0
2700	47,3	44,7	42,6	40,7	39,2	37,9	36,9	35,9	34,2	33,0	31,8	30,8	29,9	28,2	26,8	25,7	24,8	24,0	23,3	22,1	21,1	20,3	19,6	19,0
2800	57,6	54,5	52,2	50,3	48,7	47,3	46,1	45,0	43,2	41,6	40,4	39,3	38,3	36,2	34,6	33,3	32,2	31,1	30,2	28,8	27,6	26,6	25,8	25,0
2900	65,6	62,8	60,5	58,6	56,9	55,5	54,3	53,2	51,3	49,7	48,3	47,1	46,0	43,7	41,9	40,5	39,2	38,1	37,1	35,4	34,1	32,9	31,9	31,0
3000	72,9	70,6	68,5	66,8	65,1	63,8	62,6	61,6	59,6	58,0	56,6	55,4	54,3	51,9	50,0	48,4	47,0	45,8	44,7	42,9	41,4	40,1	39,0	38,0

Додаток 7

Константи хімічної рівноваги по концентрації для реакцій
 $C+2H_2 \rightleftharpoons CH_4(K_c^{IV})$ та $CO+H_2O \rightleftharpoons CO_2+H_2(K_c^V)$

T, K	$K_{c^{IV}} = \frac{CH_4}{H_2^2}$ $C+2H_2 \rightleftharpoons CH_4(K_c^{IV})$	$K_{c^V} = \frac{(CO_2H_2)}{(COH_2O)}$ $CO+H_2O \rightleftharpoons CO_2+H_2$
500	111,48	27,10
800	1,51	4,074
1000	0,1033	1,403
1200	0,0166	0,7162
1400	0,0044	0,4560
1500	0,0016(при 1600°C)	0,3704
1750	0,00074	0,2644
2000	0,0004	0,2198
2500	0,00011	0,1607
3000		0,1445

для температури (1100...1500)°C

$t_p, ^\circ C$	K_{c^V}
1100	0,491
1200	0,3935
1300	0,339
1400	0,297
1500	0,260

Додаток 8

Масові ізобарні теплоємності твердого (рідкого) палива

Вугілля всіх марок (крім антрациту), торф, гідроторф, кокс

Зольність, А%	<7	9	11	13	> 15
Теплоємність, С, КДж/(кг К)	1,411	1,4026	1,3984	1,3900	1,3816

Вугілля антрицит та деревина - $C=1,31$ кДж/(кгК)

Смола всіх модифікацій, олива МС-20

Температура, t °С	20	50	100	150
Теплоємність, С, КДж/(кг К)	1,411	1,4026	1,3984	1,3816

Олива трансформаторна, нейтральна, парафінова

Температура, t °С	20	50	100	150
Теплоємність, С, КДж/(кг К)	1,62	1,87	2,04	2,21

Мазуг всіх марок

Температура, t °С	20	50	100	150
Теплоємність, С, КДж/(кг К)	1,790	1,895	2,070	2,243

Керосин - $C=2,14$ кДж/(кгК).

Касторова олива - $C=2,09$ кДж/(кгК).

Машинна олива - $C=1,67$ кДж/(кгК).

Гліцерин - $C=1,8$ кДж/(кгК).