

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до курсового проєктування

з курсу «Джерела енергії в теплотехнологіях»
для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика»
заочної форми навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 1 від 16.02.2023 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2023

Методичні вказівки до курсового проектування за курсом «Джерела енергії в теплотехнологіях» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» заочної форми навчання / уклад. : О. В. Кошельнік, О. В. Круглякова. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – 20 с.

Укладачі: О. В. Кошельнік,
О. В. Круглякова

Рецензент Тарасенко О. М.

Кафедра теплотехніки та енергоефективних технологій

ВСТУП

Процеси горіння рідких, твердих та газоподібних палив широко використовуються практично у всіх галузях сучасної техніки та технології. І найважливішу роль процеси горіння грають у теплоенергетиці. Теплові електростанції використовують енергію горіння вугілля, горючих газів та рідких вуглеводнів. Також енергія горіння застосовується у технології отримання чорних та кольорових металів, скла, кераміки, цементу та інших необхідних матеріалів. Важливим напрямом у науці про горіння є екологічні аспекти горіння, що отримали значний розвиток останнім часом. Окремо слід відзначити роль процесів горіння у двигунобудуванні, авіації та ракетній техніці.

Таким чином, вивчення процесів горіння та їх характеристик є базовим для спеціальності 144 «Теплоенергетика». Дисципліна «Джерела енергії в теплотехнологіях» є пререквізитом цілої низки наступних дисциплін, включаючи «Котельні установки» та «Високотемпературні теплотехнологічні установки». Курсова робота для студентів заочної форми навчання охоплює вивчення питань статистики горіння, побудови та використання $I-t$ діаграми продуктів згоряння твердих та газоподібних палив.

1 СТАТИКА ГОРІННЯ ТА I - t ДІАГРАМА ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ ТВЕРДОГО ПАЛИВА

1.1 Визначення теоретичного об'єму повітря горіння та складу продуктів згоряння твердого палива

Для заданого виду твердого органічного палива визначити:

- робочу масу;
- теоретично необхідний об'єм повітря горіння;
- стехіометричний об'єм продуктів згоряння;
- побудувати I - t діаграму продуктів згоряння у діапазоні температури 700–2200 °С;
- за допомогою I - t діаграми продуктів згоряння визначити жаропродуктивність палива, зміну температури продуктів згоряння при відведенні від них певної кількості теплоти Q та одночасної зміни коефіцієнта надлишку повітря α .

Обрати вихідне тверде паливо з табл. Д.1 додатку для заданого варіанту роботи. Елементарний склад палива наводиться в розрахунку до горючої маси палива, зольність вказується для сухої маси палива, а вологість – для робочої маси.

Для розрахунку робочої маси палива необхідно визначити баласт робочої маси, що складається із золи A та вологи W . Зольність робочої маси, %, визначається з балансу маси золи

$$A^p = A^c(100 - W^p)/100. \quad (1)$$

Робоча маса палива відрізняється від горючої наявністю баласту, тоді з балансу маси впливає співвідношення для перерахунку вмісту горючих компонентів, %, у робочій масі палива

$$X^p = X^c \cdot (100 - A^p - W^p)/100, \quad (2)$$

тобто $C^p = C^c \cdot (100 - A^p - W^p)/100$; $H^p = H^c \cdot (100 - A^p - W^p)/100$ й т.і.

У формулах (1) і (2) **вміст компонентів дається у відсотках**. Після розрахунку робочої маси палива перевіряється баланс маси:

$$C^p + H^p + S^p + N^p + O^p + A^p + W^p = 100 \%, \quad (3)$$

який повинен мати розбіжність не більше 0,01%.

Теоретично необхідний об'єм повітря для повного згоряння одиниці

маси твердого палива, $\text{нм}^3/\text{кг}$ палива:

$$V^0 = 0,0889 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p) + 0,265 \cdot H^p - 0,0333 \cdot O^p. \quad (5)$$

При стехіометричному спалюванні палива склад продуктів згоряння включає об'єм триатомних газів, водяної пари та азоту, $\text{нм}^3/\text{кг}$ палива:

$$V_r^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0. \quad (5)$$

Об'єм триатомних газів V_{RO_2} залежить лише від складу робочої маси та визначається як результат повного окислення вуглецю та сірки палива, $\text{нм}^3/\text{кг}$ палива:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,01866 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p). \quad (6)$$

Теоретичний об'єм водяної пари $V_{\text{H}_2\text{O}}^0$ включає вологу палива, результат окислення водню та вологу, внесену з повітрям горіння, $\text{нм}^3/\text{кг}$ палива:

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot V^0. \quad (7)$$

Теоретичний об'єм азоту робочої маси палива складається з азоту повітря горіння та азоту палива, $\text{нм}^3/\text{кг}$ палива:

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + 0,008 \cdot N^p. \quad (8)$$

1.2 Розрахунок ентальпій продуктів згоряння твердого палива та побудова $I-t$ діаграми

В табл. Д.2 задані коефіцієнти надлишку повітря, для яких слід побудувати $I-t$ діаграму продуктів згоряння. Для побудови $I-t$ діаграми продуктів згоряння слід скористатися таблицею об'ємних теплоємностей (табл. Д.3). Необхідно задатися послідовно температурою продуктів згоряння t від 700 до 2300 °C з інтервалом 200 °C та розрахувати ентальпію, $\text{кДж}/\text{м}^3$, продуктів стехіометричного горіння

$$I_{\text{п.з}}^0 = (c'_{p\text{CO}_2} \cdot V_{\text{RO}_2} + c'_{p\text{N}_2} \cdot V_{\text{N}_2} + c'_{p\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot t, \quad (9)$$

а також ентальпію теоретично необхідного повітря горіння

$$I_{\text{пов}}^0 = c'_{p\text{пов}} \cdot V^0 \cdot t. \quad (10)$$

Дійсний об'єм продуктів згоряння можна представити як теоретичну суму об'єму продуктів згоряння й надлишкового повітря горіння, $\text{нм}^3/\text{кг}$:

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^0 + \Delta V_{\text{пов}} = V_{\text{п.з}}^0 + (\alpha - 1) \cdot V^0. \quad (11)$$

Ентальпію продуктів згоряння при заданому коефіцієнті надлишку повітря α можливо розрахувати як, кДж/м³:

$$I_{\text{п.з}} = I_{\text{п.з}}^0 + (\alpha - 1) \cdot I_{\text{пов}}^0. \quad (12)$$

Результати розрахунку ентальпій необхідно звести у таблицю, зразок якої наведено нижче (табл. 1.1).

На підставі даних табл. 1.1 будується I – t діаграма продуктів згоряння. При цьому по осі абсцис відображають температуру, починаючи з 700 °С, а по осі ординат – ентальпію, починаючи з круглого значення, найближчого до найменшого значення табл. 1.1 (зазвичай – ентальпія повітря при 700 °С). Масштаб по осі t повинен бути не менше 10 мм / 100°С, по осі I – 10 мм / 1000 кДж/кг.

Таблиця 1.1 – Результати розрахунку ентальпій

$t, ^\circ\text{C}$	Ентальпія, кДж/кг				
	$I_{\text{п.з}}^0$	$I_{\text{пов}}^0$	$I_{\text{п.з1}}^0$ (для α_1)	$I_{\text{п.з2}}^0$ (для α_2)	$I_{\text{п.з3}}^0$ (для α_3)
700					
900					
...					
2100					
2200					

За допомогою I – t діаграми необхідно визначити жаропродуктивність палива, враховуючи те, що жаропродуктивність – це температура адіабатного горіння без підігріву палива та повітря при стехіометричному горінні, °С:

$$t_{\text{ж}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}}}{c'_{\text{pCO}_2} \cdot V_{\text{RO}_2} + c'_{\text{pN}_2} \cdot V_{\text{N}_2}^0 + c'_{\text{pH}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}^0}. \quad (13)$$

У табл. Д.2 задані температура продуктів згоряння t_1 та кількість відведеної від них теплоти Q . В останньому стовпці таблиці вказано діапазон зміни коефіцієнтів надлишку повітря при відведенні від продуктів згоряння певної кількості теплоти. Потрібно визначити, яку температуру матимуть продукти згоряння після відведення заданої кількості теплоти та одночасній зміні коефіцієнта надлишку повітря α .

З I – t діаграми за заданою температурою та першому із зазначених в

останньому стовпці коефіцієнтів надлишку повітря визначається початкова ентальпія продуктів згоряння $I_{1пз}$. Кінцева ентальпія знаходиться з балансу теплоти, кДж/м³:

$$I_{2пз} = I_{1пз} - Q. \quad (14)$$

За отриманим значенням ентальпій та другим з наведених в останньому стовпці табл. Д.2 коефіцієнтом надлишку повітря за допомогою $I-t$ діаграми визначається шукана температура.

Приклад розрахунку

Елементний склад палива з розрахунку на горючу масу палива:

$$C^Г = 88 \% ; H^Г = 4,4 \% ; N^Г = 0,6 \% ; S^Г = 0,6 \% ; O^Г = 6,4 \% .$$

$$A^C = 20 \% , W^P = 6 \% .$$

Нижча теплотворна здатність палива $Q_H^P = 25460$ кДж/кг.

Розрахунок складу горючої маси палива

Зольність робочої маси

$$A^P = A^C(100 - W^P)/100 = 20 \cdot (100 - 6)/100 = 18,8 \%$$

З урахуванням співвідношення для перерахунку (2) вміст горючих компонентів у робочій масі палива для кожного компонента

$$C^P = C^Г(100 - A^P - W^P)/100 = 88 \cdot (100 - 18,8 - 6)/100 = 66,18 \%,$$

$$H^P = H^Г(100 - A^P - W^P)/100 = 4,4 \cdot (100 - 18,8 - 6)/100 = 3,3 \%,$$

$$N^P = N^Г(100 - A^P - W^P)/100 = 0,6 \cdot (100 - 18,8 - 6)/100 = 0,45 \%,$$

$$O^P = O^Г(100 - A^P - W^P)/100 = 6,4 \cdot (100 - 18,8 - 6)/100 = 4,8 \%,$$

$$S^P = S^Г(100 - A^P - W^P)/100 = 0,6 \cdot (100 - 18,8 - 6)/100 = 0,45 \%$$

Перевіримо баланс маси:

$$\begin{aligned} C^P + H^P + N^P + O^P + S^P + A^P + W^P &= \\ &= 66,18 + 3,3 + 0,45 + 4,8 + 0,45 + 18,8 + 6 = 99,98 \approx 1. \end{aligned}$$

Розрахунок повітря горіння та складу продуктів згорання

Теоретично необхідний об'єм повітря для повного згорання одиниці твердого палива

$$\begin{aligned} V^0 &= 0,0889 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p) + 0,265 \cdot H^p - 0,0333 \cdot O^p = \\ &= 0,0889 \cdot (66,18 + 0,375 \cdot 0,45) + 0,265 \cdot 3,3 - 0,0333 \cdot 4,8 = \\ &= 6,61 \text{ нм}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Об'єм триатомних газів на 1 кг палива

$$\begin{aligned} V_{\text{RO}_2} &= 0,01866 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p) = \\ &= 0,01866 \cdot (66,18 + 0,375 \cdot 0,45) = 1,238 \text{ нм}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Теоретичний об'єм водяної пари на 1 кг палива

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}}^0 &= 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot V^0 = \\ &= 0,111 \cdot 3,3 + 0,0124 \cdot 6 + 0,0161 \cdot 6,61 = 0,547 \text{ нм}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Теоретичний об'єм азоту на 1 кг палива

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + 0,008 \cdot N^p = 0,79 \cdot 6,61 + 0,008 \cdot 0,45 = 5,226 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Теоретичний об'єм продуктів згорання на 1 кг палива

$$V_r^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + V_{\text{N}_2}^0 = 1,238 + 0,547 + 5,226 = 7,011 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Розрахунок ентальпій продуктів згорання твердого палива та побудова $I-t$ діаграми

З вихідних даних:

1. коефіцієнти надлишку повітря: $\alpha_1 = 1,2$; $\alpha_2 = 1,3$; $\alpha_3 = 1,4$;
2. температура продуктів згорання перед відводом тепла $t_1 = 1200^\circ\text{C}$;
3. кількість відведеного тепла $Q = 3500 \text{ кДж/кг}$.
4. зміна коефіцієнтів надлишку повітря: від α_2 до α_3 .

Задаючись послідовно температурою продуктів згорання від 700°C до 2200°C з інтервалом 100°C , розраховуємо:

- ентальпію продуктів стехіометричного горіння за формулою (9)
- ентальпію теоретично необхідного повітря горіння за формулою (10)
- ентальпію продуктів згорання при заданому коефіцієнті надлишку повітря за формулою (12).

Результати розрахунку ентальпії зводимо до таблиці.

Ентальпії продуктів згорання твердого палива

$t, ^\circ\text{C}$	Ентальпія, кДж/кг				
	$I_{\text{п.з}}^0$	$I_{\text{пов}}^0$	$I_{\text{п.з1}}^0$	$I_{\text{п.з2}}^0$	$I_{\text{п.з3}}^0$
700	7402,9	6352,3	8673,3	9308,5	9943,8
800	8570,6	7330,7	10036,8	10769,9	11502,9
900	9757,5	8326,9	11422,9	12255,6	13088,3
1000	10962,5	9332,2	12829,0	13762,2	14695,4
1100	12185,4	10350,6	14255,5	15290,6	16325,7
1200	13422,3	11381,4	15698,6	16836,7	17974,9
1300	14675,4	12420,2	17159,5	18401,5	19643,5
1400	15935,3	13464,6	18628,3	19974,7	21321,2
1500	17206,7	14517,7	20110,3	21562,0	23013,8
1600	18488,0	15578,7	21603,7	23161,6	24719,5
1700	19779,8	16642,4	23108,3	24772,5	26436,8
1800	21073,8	17715,5	24617,0	26388,5	28160,1
1900	22368,2	18790,3	26126,3	28005,3	29884,4
2000	23681,3	19873,2	27656,0	29643,3	31630,6
2100	24997,6	20953,1	29188,2	31283,5	33378,8
2200	26312,4	22042,6	30720,9	32925,2	35129,4
2300	27635,8	23134,4	32262,7	34576,1	36889,6

За даними таблиці будуюмо $I-t$ діаграму продуктів згорання твердого палива.

За допомогою $I-t$ діаграми визначаємо жаропродуктивність $t_{\text{ж}}$ палива. Вона знаходиться для лінії $I_{\text{п.з}}^0 = f(t)$ при $I_{\text{п.з}}^0 = Q_{\text{н}}^{\text{p}} \cdot t_{\text{ж}} = 2135 ^\circ\text{C}$.

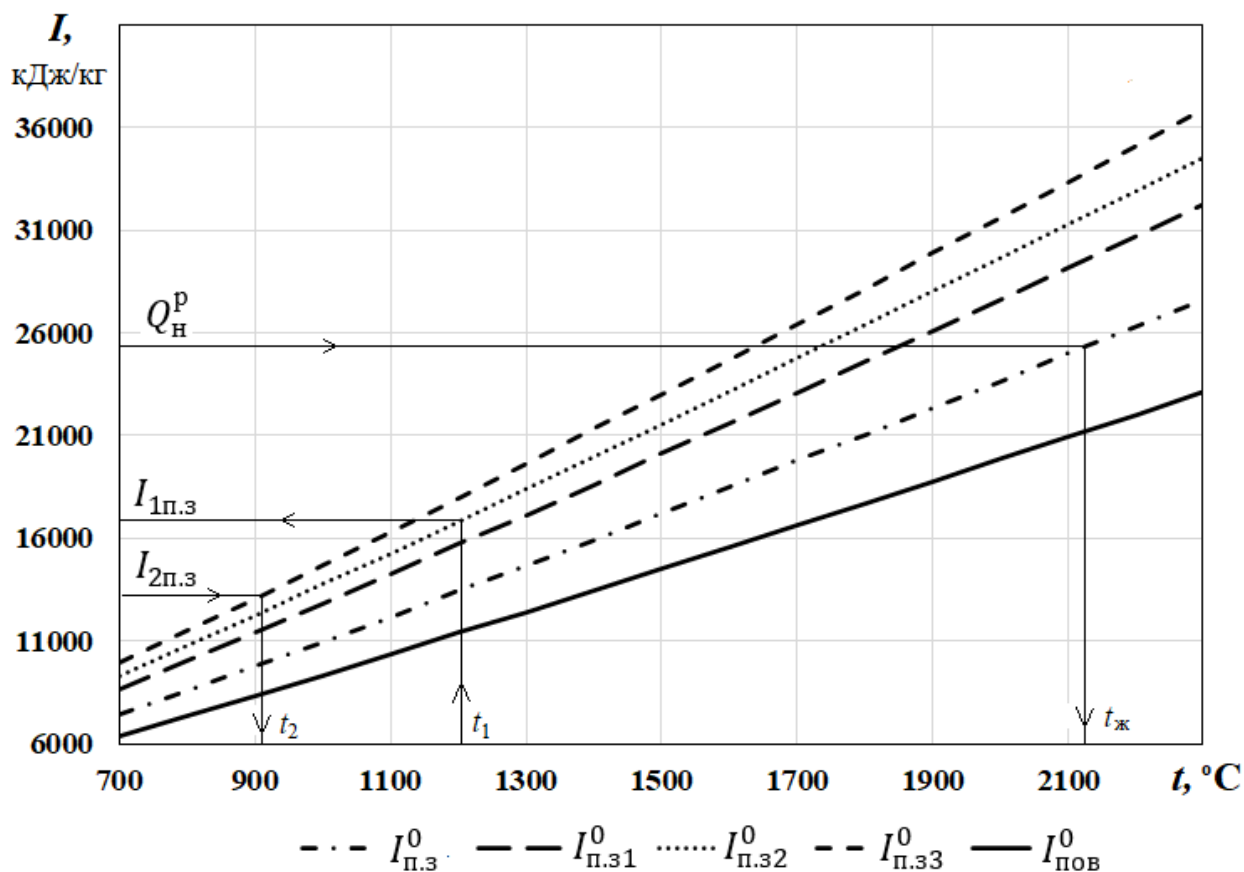
Визначаємо, яку температуру матимуть продукти згорання після відведення заданої кількості теплоти та за одночасної зміни коефіцієнта надлишку повітря.

З $I-t$ діаграми знаходимо початкову ентальпію продуктів згорання при температурі $t_1 = 1200 ^\circ\text{C}$ та $\alpha_2 = 1,3$. Вона дорівнює $I_{\text{п.з}} = 16837$ кДж/кг.

Кінцева ентальпія продуктів згорання

$$I_{2\text{п.з}} = I_{1\text{п.з}} - Q = 16837 - 3500 = 13337 \text{ кДж/кг.}$$

З $I-t$ діаграми при $\alpha_3 = 1,4$ знаходимо кінцеву температуру продуктів згорання $t_2 = 910 ^\circ\text{C}$.



I–*t* діаграма продуктів згорання твердого палива

2 СТАТИКА ГОРІННЯ ТА *I*–*t* ДІАГРАМА ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

2.1 Визначення теоретичного об'єму повітря горіння та складу продуктів згорання газоподібного палива

Для заданого складу природного газу (табл. Д.4) визначити:

- теоретичну витрату повітря горіння; стехіометричний склад продуктів згорання;
- побудувати *I*–*t* діаграму продуктів згорання в діапазоні зміни температури 800–2300 °С при заданих коефіцієнтах надлишку повітря;
- за допомогою *I*–*t* діаграми визначити жаропродуктивність палива та температуру продуктів згорання при відведенні від них кількості теплоти *Q* з одночасною зміною коефіцієнта надлишку повітря.

У зв'язку з тим, що в сухому природному газі присутні лише граничні

вуглеводи метанового ряду та баласт, що складається з азоту та вуглекислого газу, теоретичний об'єм повітря горіння визначається, м³/м³:

$$V^0 = 0,0476 \cdot [\sum (m + n/4) \cdot C_m H_n + 0,5 \cdot (CO + H_2) + 1,5 \cdot H_2S - O_2], \quad (15)$$

де m – кількість атомів вуглецю С граничного вуглеводу, n – кількість атомів водню Н граничного вуглеводу.

У формулі (15) вміст горючих газів CO, H₂, H₂S, CH₄ й т.і. вказується у відсотках за об'ємом.

Продукти згоряння будь-якого органічного палива при стехіометричному горінні мають один і той же склад, тобто, м³/м³:

$$V_r^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0. \quad (16)$$

При спалюванні природного газу об'єм триатомних газів складає, м³/м³:

$$V_{RO_2} = 0,01 \cdot (\sum m \cdot C_m H_n + CO_2 + CO + H_2S). \quad (17)$$

Об'єм водяної пари, м³/м³:

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \cdot \left(\sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n + H_2S + H_2 + 0,124 \cdot d_r + 1,61 \cdot V^0 \right),$$

де d_r – вологовміст газоподібного палива (враховується за умови $d_r > 10$ г/кг сухого газу). У розрахунках прийняти $d_r < 10$ г/кг сух. газу.

Об'єм азоту, м³/м³:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + 0,01 \cdot N_2.$$

2.2 Розрахунок ентальпії продуктів згоряння газоподібного палива та побудова I – t діаграми

Розрахунок, побудова I – t діаграми продуктів згоряння та робота з діаграмою проводиться в тій самій послідовності, що й для твердого палива (див. п. 1.2). Вихідні дані наведені в табл. Д.2 додатку.

Приклад розрахунку

Елементний склад палива:

$$CH_4 = 93,9 \%; \quad C_2H_6 = 3,1 \%; \quad C_3H_8 = 1,1 \%;$$

$$C_4H_{10} = 0,3 \%; C_5H_{12} = 0,1 \%; N_2 = 1,3 \%; CO_2 = 0,2 \%.$$

Нижча теплотворна здатність палива $Q_H^c = 37090$ кДж/м³.

Визначення теоретичного об'єму повітря горіння та складу продуктів згорання

Теоретично необхідний об'єм повітря для повного згорання одиниці об'єму газоподібного палива

$$\begin{aligned} V^0 &= 0,0476 \cdot \left[\sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot C_m H_n + 0,5 \cdot (CO + H_2) + 1,5 \cdot H_2S - O_2 \right] = \\ &= 0,0476 \left[\left(1 + \frac{4}{4} \right) 93,9 + \left(2 + \frac{6}{4} \right) 3,1 + \left(3 + \frac{8}{4} \right) 1,1 + \left(4 + \frac{10}{4} \right) 0,3 + \right. \\ &\quad \left. + \left(5 + \frac{12}{4} \right) 0,1 + 0,5 \cdot (0 + 0) + 1,5 \cdot 0 - 0 \right] = 9,84 \text{ нм}^3/\text{нм}^3. \end{aligned}$$

Об'єм триатомних газів

$$\begin{aligned} V_{RO_2} &= 0,01 \cdot \left(\sum m \cdot C_m H_n + CO_2 + CO + H_2S \right) = \\ &= 0,01(1 \cdot 93,9 + 2 \cdot 3,1 + 3 \cdot 1,1 + 4 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,1 + 0,2 + 0 + 0) = \\ &= 1,05 \text{ нм}^3/\text{нм}^3. \end{aligned}$$

Об'єм водяної пари

$$\begin{aligned} V_{H_2O}^0 &= 0,01 \cdot \left(\sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n + H_2S + H_2 + 0,124 \cdot d_r + 1,61 \cdot V^0 \right) = \\ &= 0,01 \left(\frac{4}{2} \cdot 93,9 + \frac{6}{2} \cdot 3,1 + \frac{8}{2} \cdot 1,1 + \frac{10}{2} \cdot 0,3 + \frac{12}{2} \cdot 0,1 + 0,124 \cdot 0 + \right. \\ &\quad \left. + 1,61 \cdot 9,84 \right) = 2,19 \text{ нм}^3/\text{нм}^3. \end{aligned}$$

Об'єм азоту

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + 0,01 \cdot N_2 = 0,79 \cdot 9,84 + 0,01 \cdot 1,3 = 7,79 \text{ нм}^3/\text{нм}^3.$$

Теоретичний об'єм продуктів згорання

$$V_r^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 = 1,05 + 7,79 + 2,19 = 11,03 \text{ нм}^3/\text{нм}^3.$$

Розрахунок ентальпії продуктів згорання газоподібного палива та побудова $I-t$ діаграми

З вихідних даних:

1. коефіцієнти надлишку повітря: $\alpha_1 = 1,07$; $\alpha_2 = 1,2$; $\alpha_3 = 1,25$;
2. температура продуктів згорання перед відводом тепла $t_1 = 1300$ °С;
3. кількість відведеного тепла $Q = 15000$ кДж/м³.
4. зміна коефіцієнтів надлишку повітря: від α_2 до α_3 .

Задаючись послідовно температурою продуктів згорання від 800 °С до 2300 °С з інтервалом 100 °С, розраховуємо:

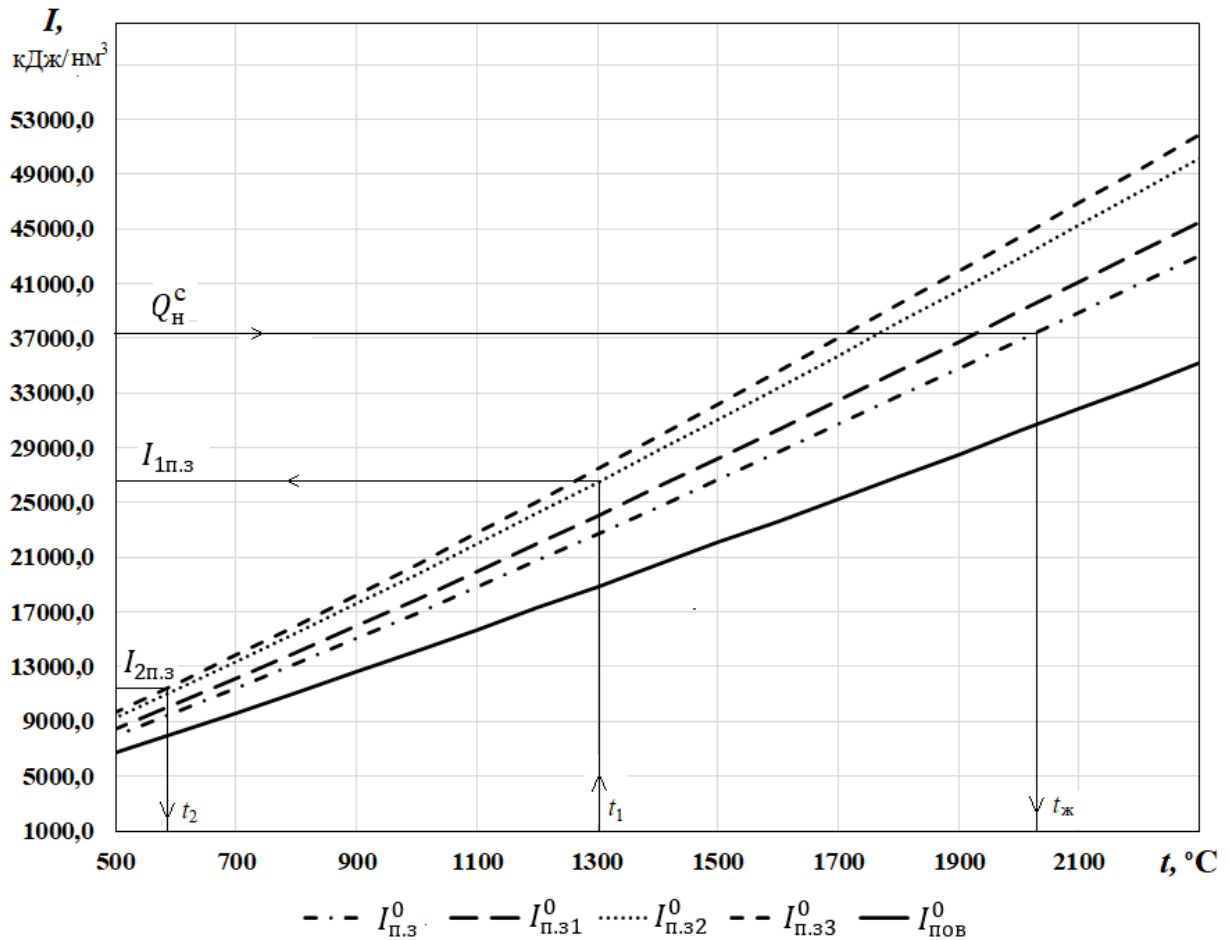
- ентальпію продуктів стехіометричного горіння за формулою (9)
- ентальпію теоретично необхідного повітря горіння за формулою (10)
- ентальпію продуктів згорання при заданому коефіцієнті надлишку повітря за формулою (12).

Результати розрахунку ентальпії зводимо до таблиці.

Ентальпії продуктів згорання газоподібного палива

$t, ^\circ\text{C}$	Ентальпія, кДж/м ³				
	$I_{\text{п.з}}^0$	$I_{\text{пов}}^0$	$I_{\text{п.з1}}^0$	$I_{\text{п.з2}}^0$	$I_{\text{п.з3}}^0$
500	7964,6	6736,3	8436,1	9311,8	9648,7
600	9682,6	8169,9	10254,4	11316,5	11725,0
700	11444,8	9632,9	12119,1	13371,4	13853,0
800	13246,4	11117,7	14024,6	15469,9	16025,8
900	15081,4	12626,2	15965,2	17606,6	18237,9
1000	16947,2	14153,2	17937,9	19777,8	20485,5
1100	18844,2	15703,9	19943,5	21985,0	22770,2
1200	20766,4	17265,1	21974,9	24219,4	25082,7
1300	22716,8	18848,5	24036,2	26486,5	27429,0
1400	24681,5	20443,2	26112,5	28770,2	29792,3
1500	26667,8	22045,2	28210,9	31076,8	32179,1
1600	28671,4	23659,9	30327,6	33403,4	34586,4
1700	30696,0	25277,6	32465,4	35751,5	37015,4
1800	32725,1	26899,2	34608,1	38105,0	39449,9
1900	34762,3	28543,3	36760,3	40471,0	41898,1
2000	36822,9	30185,5	38935,9	42860,0	44369,3
2100	38894,6	31841,6	41123,5	45262,9	46855,0
2200	40966,1	33511,7	43312,0	47668,5	49344,1
2300	43053,4	35195,8	45517,1	50092,6	51852,4

За даними таблиці будуємо $I-t$ діаграму продуктів згорання газоподібного палива.



$I-t$ діаграма продуктів згорання газоподібного палива

З $I-t$ діаграми визначаємо жаропродуктивність $t_{ж}$ палива: $t_{ж} = 2015$ °C.

Визначаємо, яку температуру матимуть продукти згорання після відведення заданої кількості теплоти та за одночасної зміни коефіцієнта надлишку повітря.

З $I-t$ діаграми знаходимо початкову ентальпію продуктів згорання при температурі $t_1 = 1300$ °C та $\alpha_2 = 1,2$. Вона дорівнює $I_{1п.з} = 26486,2$ кДж/нм³.

Кінцева ентальпія продуктів згорання

$$I_{2п.з} = I_{1п.з} - Q = 26486,2 - 15000 = 11486,2 \text{ кДж/нм}^3.$$

З $I-t$ діаграми при $\alpha_3 = 1,25$ знаходимо кінцеву температуру продуктів згорання $t_2 = 588,5$ °C.

Контрольні питання

1. З яких елементів складається горюча маса твердого (рідкого) палива?
2. Що таке «суха» і «робоча» маси палива?
3. Як перерахувати «горючу» масу в «робочу»?
4. Дайте визначення теплотворної здатності палива.
5. Чим відрізняється «вища» теплотворна здатність від «нижчої»?
6. Що таке «теоретично необхідна» кількість повітря горіння?
7. Що таке коефіцієнт надлишку повітря?
8. Теоретичний склад продуктів згорання.
9. Дійсний склад продуктів згорання палива.
10. Принцип визначення коефіцієнта надлишку повітря з аналізу продуктів згорання
11. Що називають «адіабатним горінням»?
12. Запишіть і поясніть тепловий баланс адіабатного горіння.
13. Що таке «адіабатна температура горіння»?
14. Що таке «жаровидатність»?
15. Дайте визначення «калориметричної» температури горіння.
16. Призначення і побудова $I-t$ діаграми продуктів згорання.
17. Наведіть приклад використання $I-t$ діаграми.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Костюк О.П. Паливо та обладнання для його спалювання: Навчальний посібник / О.П. Костюк. – Рівне: НУВГП, 2011. – 121 с.
2. Пономаренко С.М. Основи фізики горіння: навчальний посібник / С. М. Пономаренко. – Київ: НТУ У «КПІ», 2016. – 85 с.
3. Частухин В.И. Топливо и теория горения / В.И. Частухин, В.В. Частухин. – Киев: Вища школа, 1989. – 223 с.

Додаток
Довідкові данні для виконання розрахунків

Таблиця Д.1 – Технічні характеристики твердого палива

№	C ^p , %	H ^p , %	N ^г , %	O ^г , %	S ^г , %	A ^c , %	W ^p , %	Q, МДж/кг
1	75,5	5,5	1,6	13,2	4,2	13	18	21,47
2	81	5,2	2,5	7,8	3,5	7	19,5	24,15
3	89	4,2	1,5	2,2	3,1	17	4,5	27,04
4	93,5	2	0,8	2,3	1,4	14	5,8	27,0
5	78,5	5,6	2,3	13,2	0,4	9,5	10,5	24,95
6	82,4	5,8	2,2	9	0,6	10	8	26,45
7	89	4,4	2	3,8	0,8	19	7	25,58
8	78,3	5,8	1,7	13,6	0,6	21	11	21,68
9	78,9	5,4	1,7	13,3	0,7	13,5	14,5	22,56
10	66	5,2	0,8	27,5	0,5	38,5	22,5	10,13
11	68,5	5,3	1	20,1	5,1	32	37	10,5
12	69,7	5,4	1	21,2	2,7	32	38	10,34
13	80	5,7	1,3	9,2	3,8	28	5	21,56
14	89,5	3,6	1,3	5,0	0,6	22	5	24,62
15	68	4,9	1,2	25,4	0,5	27	26	11,01

Таблиця Д.2 – Вихідні дані для $I-t$ діаграми продуктів згоряння палива

№	Для твердого палива					Для газоподібного палива					Діапазон зміни α
	α_1	α_2	α_3	$t_1, ^\circ\text{C}$	$Q,$ МДж/кг	α_1	α_2	α_3	$t_1, ^\circ\text{C}$	$Q,$ МДж/м ³	
1	1,35	1,5	1,65	1600	7,0	1,07	1,18	1,26	1650	10,0	$\alpha_1 - \alpha_2$
2	1,4	1,55	1,65	1400	6,0	1,05	1,15	1,25	1750	8,5	$\alpha_1 - \alpha_3$
3	1,45	1,65	1,75	1500	5,0	1,07	1,17	1,3	1800	9,5	$\alpha_1 - \alpha_2$
4	1,55	1,7	1,8	1600	4,5	1,05	1,1	1,15	1850	10,0	$\alpha_2 - \alpha_3$
5	1,3	1,45	1,55	1500	5,0	1,06	1,15	1,25	1650	8,0	$\alpha_1 - \alpha_3$
6	1,35	1,45	1,55	1800	7,0	1,06	1,16	1,26	1850	11,0	$\alpha_2 - \alpha_3$
7	1,45	1,55	1,6	1750	6,0	1,05	1,15	1,2	1800	11,5	$\alpha_1 - \alpha_3$
8	1,4	1,5	1,6	1700	5,5	1,04	1,12	1,22	1750	10,0	$\alpha_1 - \alpha_2$
9	1,3	1,4	1,5	1600	4,5	1,06	1,17	1,25	1700	9,5	$\alpha_2 - \alpha_3$
10	1,3	1,45	1,6	1750	6,5	1,05	1,1	1,15	1600	11,0	$\alpha_1 - \alpha_3$
11	1,3	1,45	1,5	1800	4,0	1,05	1,15	1,2	1800	11,0	$\alpha_1 - \alpha_3$
12	1,35	1,45	1,55	1700	5,0	1,06	1,1	1,25	1700	10,0	$\alpha_2 - \alpha_3$
13	1,4	1,5	1,6	1800	6,0	1,04	1,12	1,2	1750	9,0	$\alpha_1 - \alpha_2$
14	1,5	1,6	1,7	1700	7,0	1,05	1,12	1,22	1850	11,0	$\alpha_1 - \alpha_3$
15	1,3	1,4	1,5	1850	8,0	1,05	1,15	1,25	1800	10,5	$\alpha_1 - \alpha_2$

Таблиця Д.3 – Середня об'ємна теплоємність газів при постійному тиску, кДж/(нм³·°С)

$t, ^\circ\text{C}$	$c'_{p\text{N}_2}$	$c'_{p\text{CO}_2}$	$c'_{p\text{H}_2\text{O}}$	$c'_{p\text{H}_2}$	$c'_{p\text{CO}}$	$c'_{p\text{пов}}$ (вологе повітря)
0	1,2946	1,5998	1,4943	1,2766	1,2992	1,3186
100	1,2958	1,7003	1,5022	1,2908	1,3017	1,3240
200	1,2996	1,7873	1,5223	1,2971	1,3071	1,3136
300	1,3067	1,8627	1,5424	1,2992	1,3167	1,3420
400	1,3163	1,9297	1,5654	1,3021	1,3284	1,3542
500	1,3276	1,9887	1,5897	1,3050	1,3427	1,3680
600	1,3402	2,0411	1,6148	1,3080	1,3574	1,3826
700	1,3536	2,0884	1,6412	1,3121	1,3720	1,3973
800	1,3670	2,1311	1,6680	1,3167	1,3682	1,4111
900	1,3796	2,1692	1,6957	1,3226	1,3996	1,4245
1000	1,3917	2,2035	1,7229	1,3284	1,4126	1,4371
1100	1,4034	2,2349	1,7501	1,3360	1,4248	1,4496
1200	1,4143	2,2638	1,7769	1,3431	1,4361	1,4609
1300	1,4252	2,2898	1,8028	1,3511	1,4465	1,4722
1400	1,4348	2,3136	1,8280	1,3591	1,4566	1,4827
1500	1,4440	2,3354	1,8527	1,3674	1,4658	1,4923
1600	1,4528	2,3555	1,8761	1,3754	1,4746	1,5015
1700	1,4612	2,3743	1,8996	1,3833	1,4825	1,5098
1800	1,4687	2,3915	1,9213	1,3917	1,4901	1,5174
1900	1,4758	2,4047	1,9423	1,3996	1,4972	1,5254
2000	1,4825	2,4221	1,9628	1,4076	1,5039	1,5325
2100	1,4892	2,4359	1,9824	1,4551	1,5102	1,5396
2200	1,4951	2,4484	2,0009	1,4227	1,5160	1,5467
2300	1,5010	2,4602	2,0189	1,4302	1,5215	1,5538
2400	1,5064	2,4710	2,0365	1,4373	1,5269	1,5609
2500	1,5177	2,4811	2,0528	1,4449	1,5320	1,5680

Таблиця Д.4 – Технічні характеристики газоподібного палива

№	CH ₄ , %	C ₂ H ₆ , %	C ₃ H ₈ , %	C ₄ H ₁₀ , %	C ₅ H ₂ , %	N ₂ , %	CO ₂ , %	Q, МДж/м ³
1	84,5	3,8	1,9	0,9	0,3	7,8	0,8	35,8
2	89,4	3,6	2,6	0,9	0,2	3,2	0,1	35,3
3	91,9	2,1	1,3	0,4	0,1	3	1,2	36,13
4	93,8	2,0	0,8	0,3	0,1	2,6	0,4	36,09
5	92,8	2,8	0,9	0,4	0,1	2,5	0,5	36,55
6	91,2	3,9	1,2	0,5	0,1	2,6	0,5	37,01
7	89,7	5,2	1,7	0,5	0,1	2,7	0,1	37,42
8	85,8	0,2	0,1	0,1	-	13,7	0,1	30,98
9	98,9	0,3	0,1	0,1	-	0,4	0,2	35,87
10	95,6	0,7	0,4	0,2	0,2	2,8	0,1	35,5
11	98,5	0,2	0,1	-	-	1,0	0,2	35,5
12	92,8	3,9	1,1	0,4	0,1	1,6	0,1	37,3
13	92,8	3,9	1,0	0,4	0,3	1,5	0,1	37,3
14	94,1	3,1	0,6	0,2	0,8	1,2	-	37,86
15	81,7	5,3	2,9	0,9	0,3	8,8	0,1	36,8

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсового проектування

за курсом «Джерела енергії в теплотехнологіях»

для студентів заочної форми навчання

спеціальності 144 «Теплоенергетика»

Укладачі: КОШЕЛЬНІК Олександр Вадимович
КРУГЛЯКОВА Ольга Володимирівна

Відповідальний за випуск проф. М. П. Кунденко
Роботу рекомендував до видання проф. В. П. Суботович

В авторській редакції

План 2023 р., поз. 84.

Підписано до друку 16.02.2023. Формат 60х84 1/16.

Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 0,5.

Наклад 40 прим. Зам. №. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХПІ», 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ» (ФО-П Миронов М.В.,
Свідоцтво ВО4№022953) м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1 Тел. 7-170-354
www.modelist.in.ua