

Міністерство освіти і науки України
Дніпродзержинський державний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання практичних робіт
з дисципліни

«БЕЗВІДХОДНІ ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

підготовки докторів філософії зі спеціальності
161 «Хімічні технології та інженерія»

Затверджено
редакційно-видавничою
секцією
науково-методичної ради ДДТУ
_____, протокол № ____

Кам'янське,
2016 р.

Розповсюдження і тиражування без офіційного дозволу Дніпродзержинського державного технічного університету заборонено.

Методичні вказівки виконання практичних робіт з дисципліни «Безвідходні хімічні технології» для підготовки докторів філософії зі спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», Уклад. А.В. Іванченко. – Каям'яське: ДДТУ, 2016. – 25 с.

Укладач: к.т.н., доцент Іванченко А.В.

Відповідальний за випуск
завідувач кафедри ХТНР Волошин М.Д.

Затверджено на засіданні кафедри ХТНР (протокол № 4 від 22.03.2016 р.)

Практичне заняття № 1,2

Розрахунок матеріального балансу очисних споруд з урахуванням установки анаеробного зброджування (метантенку)

Розрахунок матеріального балансу станції очищення стічних вод з заданою виробничою потужністю з урахуванням установки анаеробного зброджування (метантенку) 18 000 м³/год по промислових і побутових стічних водах. Потужність становить:

Промислові стічні води: 8000 м³/год

Побутові стічні води: 10000 м³/год

Об'єм відходів, затриманих на решітках за добу, м³/добу:

$$W_{\text{пок}} = \frac{a_0 \cdot N_{\text{пр}}}{1000 \cdot 365},$$

де a_0 – об'єм відходів на одного жителя на рік за СНіП 2.04.03-85, $a_0 = 8 \text{ дм}^3$ для решіток з шириною отвору 16 – 20 мм; $N_{\text{пр}}$ – наведена кількість жителів.

$$N_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{ББП}}}{a_1},$$

де Q – витрата стічних вод, м³ на добу; a_1 – добовий БСК_{повн} на одного жителя, г/добу (за СНіП 2.04.37-85, табл. 3 – 40 г/добу).

Кількість відходів, затриманих на решітках за добу за вагою:

$$G_{\text{пок}} = \gamma_{\text{пок}} \cdot W_{\text{пок}},$$

де $\gamma_{\text{пок}}$ – густина відходів за СНіП 2.04.03-8, $\gamma_{\text{пок}} = 0,75 \text{ т/м}^3$.

Отже, для промислових стічних вод:

$$N_{\text{пр}} = \frac{8000 \cdot 220}{40} = 44000 \text{ жителів};$$

$$W_{\text{пок}} = \frac{8 \cdot 44000}{1000 \cdot 365} = 0,96 \text{ м}^3/\text{добу};$$

$$G_{\text{пок}} = 0,96 \cdot 0,75 = 0,72 \text{ т/добу}.$$

Для побутових стічних вод:

$$N_{\text{пр}} = \frac{10000 \cdot 200}{40} = 50000 \text{ жителів};$$

$$W_{\text{пок}} = \frac{8 \cdot 50000}{1000 \cdot 365} = 1,09 \text{ м}^3/\text{добу};$$

$$G_{\text{пок}} = 1,09 \cdot 0,75 = 0,82 \text{ т/добу}.$$

Відходи транспортером подаються на дробарки, після чого надходять в основний потік води перед решітками.

Згідно з нормативними документами об'єм затриманого піску має становити 0,02 дм³ на одного жителя на добу, вологість піску – 60%, густина піску – 1,5 т/м³, вміст піску в осаді – 60%.

Отже, об'єм затриманого піску, м³/добу, обчислюється за формулою:

$$W_{\text{ніск}} = \frac{N \cdot 0,02}{1000}.$$

Вага затриманого піску, т/добу,

$$G_{\text{ніск}} = W_{\text{ніск}} \cdot 1,5.$$

Кількість води, що збирається з піском, т/добу:

$$G_{води} = G_{ніск} \cdot 0,6.$$

Для промислових стічних вод:

$$W_{ніск} = \frac{44000 \cdot 0,02}{1000} = 0,88 \text{ м}^3/\text{добу};$$

$$G_{ніск} = 0,88 \cdot 1,5 = 1,32 \text{ т/добу};$$

$$G_{води} = 1,32 \cdot 0,6 = 0,79 \text{ т/добу}.$$

Для побутових стічних вод:

$$W_{ніск} = \frac{50000 \cdot 0,02}{1000} = 1 \text{ м}^3/\text{добу};$$

$$G_{ніск} = 1 \cdot 1,5 = 1,5 \text{ т/добу};$$

$$G_{води} = 1,5 \cdot 0,6 = 0,9 \text{ т/добу}.$$

Кількість осаду, виділеного з первинних відстійників усіх типів, слід визначити виходячи з концентрації змулених речовин в освітленій воді.

Концентрація змулених речовин розраховується за формулою:

$$C_1 = \frac{a \cdot N_{np}}{Q},$$

де a – кількість змулених речовин на одного жителя, за СНіП 2.04.03-85, $a = 65 \text{ г/добу}$.

Для промислових стічних вод:

$$C_1 = \frac{65 \cdot 44000}{8000} = 357,5 \text{ мг/дм}^3.$$

Для побутових стічних вод:

$$C_1 = \frac{65 \cdot 50000}{10000} = 325 \text{ мг/дм}^3.$$

Концентрація змулених речовин в освітлених стічних водах, що подаються в аеротенк або на біологічні фільтри, не має перевищувати 150 мг/дм^3 .

Отже, концентрація змулених речовин на виході з первинних відстійників як промислових, так і побутових стічних вод $C_2 = 150 \text{ мг/дм}^3$.

Кількість осаду за сухою речовиною, т/добу:

$$Q_{сух} = \frac{Q(C_1 - C_2)}{10^6}.$$

Об'єм осаду, м³/добу:

$$V_{ос} = \frac{Q(C_1 - C_2)}{(100 - P) \cdot \rho \cdot 10^4},$$

де ρ – густина осаду, приймається $1,05 \text{ т/м}^3$; P – вологість осаду, %, її приймають в залежності від способу транспортування осаду. Під час транспортування під гідростатичним тиском (само стікання) $P = 95\%$, за наявності пре аерації $P = 94,5\%$, а в разі передачі плунжерним насосом $P = 93,5\%$.

Візьмемо $P = 93,5\%$ (транспортування за допомогою плунжерних насосів).

Кількість осаду за сухою речовиною для промислових стічних вод:

$$Q_{сух} = \frac{8000 \cdot (357,5 - 150)}{10^6} = 1,66 \text{ т/добу}.$$

Об'єм осаду для промислових стічних вод:

$$V_{ос} = \frac{8000 \cdot (357,5 - 150)}{(100 - 93,5) \cdot 1,05 \cdot 10^4} = 24,32 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Кількість осаду за сухою речовиною для побутових стічних вод:

$$Q_{\text{сух}} = \frac{10000 \cdot (325 - 150)}{10^6} = 1,75 \text{ т/добу.}$$

Об'єм осаду для промислових стічних вод:

$$V_{\text{ос}} = \frac{10000 \cdot (325 - 150)}{(100 - 93,5) \cdot 1,05 \cdot 10^4} = 25,6 \text{ м}^3/\text{добу.}$$

Осад після первинних відстійників промислових стічних вод надходить на мулові майданчики, а побутових стічних вод – у метантенк.

Вологість осаду після первинних відстійників промислових стічних вод на мулових майданчиках знижується до 75 – 80%, тому приблизно 20% об'єму осаду повертається в первинні відстійники у вигляді мулових вод.

$$V_{\text{м.в.}} = V_{\text{ос}} \cdot 0,2 = 25,6 \cdot 0,2 = 5,12 \text{ м}^3/\text{добу.}$$

Кількість сухої речовини активного мулу, що відводиться з вторинних відстійників:

$$M_{\text{сух}} = \frac{(0,8C \cdot (1 - E) + \alpha \cdot L_a - b) \cdot Q}{10^6},$$

де C – концентрація змулених речовин у воді, що надходять на первинні відстійники, мг/дм^3 ; E – ефективність затримання змулених речовин, частки одиниці; L_a – БСК_{повн} стічної води, що надходить в аеротенки, мг/дм^3 , α – коефіцієнт приросту активного мулу, $\alpha = 0,3 - 0,5$; b – концентрація активного мулу після вторинних відстійників, мг/дм^3 ; Q – середньодобова витрата стічних вод, $\text{м}^3/\text{добу}$.

Концентрація змулених речовин у промислових стічних водах – $357,5 \text{ мг/дм}^3$, у побутових 325 мг/дм^3 , а середня для суміші вод:

$$C = \frac{357,5 \cdot 8000 + 325 \cdot 10000}{18000} = 339 \text{ мг/дм}^3$$

Для суміші стічних вод:

$$BCK_{\text{повн}} = \frac{220 \cdot 8000 + 200 \cdot 10000}{18000} = 208 \text{ мг/дм}^3.$$

Враховуючи те, що ефективність зниження БСК під час відстоювання без інтенсифікації досягає 15 – 25%, маємо:

$$L_a = 208 \cdot (1 - 0,25) = 156 \text{ мг/дм}^3.$$

Ефективність затримання для промислових стічних вод у первинних відстійниках:

$$E_{\text{пр}} = \frac{357,5 - 150}{357,5} = 0,58$$

для побутових стічних вод:

$$E_{\text{поб}} = \frac{325 - 150}{325} = 0,54$$

Середня ефективність для промислових та побутових стічних вод:

$$E = \frac{339 - 150}{339} = 0,56$$

Середньодобова витрата стічних вод:

$$Q = 8000 + 10000 = 18000 \text{ м}^3/\text{добу.}$$

Беремо $b = 15 \text{ мг/дм}^3$, $\alpha = 0,4$. Тоді

$$M_{\text{сух}} = \frac{(0,8 \cdot 339 \cdot (1 - 0,56) + 0,4 \cdot 156) \cdot 18000}{10^6} = 3,3 \text{ т/добу.}$$

Об'єм надлишкового активного мулу, $\text{м}^3/\text{добу}$:

$$V_{\text{мулу}} = \frac{100 \cdot M_{\text{сух}}}{(100 - P) \cdot \rho_{\text{мул}}},$$

де: P – вологість мулу після вторинних відстійників (може бути 99,2 – 99,7%, приймаємо 99,2 %);

$\rho_{\text{мул}}$ – густина мулу після вторинних відстійників; $\rho_{\text{мул}} = 1 \text{ т/м}^3$.

$$V_{\text{мулу}} = \frac{100 \cdot M_{\text{сух}}}{(100 - P) \cdot \rho_{\text{мул}}} = \frac{100 \cdot 3,3}{(100 - 99,2) \cdot 1} = 412,5 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Доза активного мулу під час розрахунку аеротенків-витіснювачів без регенерації береться такою, що дорівнює $3 - 5 \text{ мг/дм}^3$, а в разі регенерації – $2 - 4,5 \text{ г/дм}^3$.

Концентрація змулених речовин у процесі подачі на аеротенки не має бути більшою від 150 мг/дм^3 , а БСК_{повн} залежить від конструкції аеротенку. Коли БСК_{повн} у воді, що надходить на очищення, перевищує 150 мг/дм^3 , а також за наявності шкідливих промислових домішок необхідно застосовувати аеротенк з регенерацією.

Ми беремо аеротенк з регенерацією, а дозу активного мулу 3 г/дм^3 .

Кількість активного мулу, що виноситься зі стічними водами з аеротенка, становить:

$$\frac{18000 \cdot 3}{1000} = 54 \text{ т/добу}.$$

Активний мул, що повертається в аеротенк, за винятком приросту активного мулу:
 $60 - M_{\text{сух}} = 54 - 3,3 = 50,7 \text{ т/добу}.$

Якщо вологість $99,2 \%$, його об'єм:

$$V = \frac{50,7 \cdot 100}{(100 - 99,2)} = 6337,5 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Весь добовий приріст активного мулу, який за вологості $99,2 \%$ становить $416,25 \text{ м}^3/\text{добу}$, надходить в ущільнювач мулу. В ущільнювачі його вологість зменшується до $98,71 \%$. Тоді кількість мулу, який подається на метантенк, буде:

$$\frac{3,3 \cdot 100}{100 - 98,71} = 255,8 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Кількість відділеної мулової води становитиме:

$$412,5 - 255,8 = 156,7 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

На метантенк надходить осад після первинних відстійників побутових стічних вод, а також надлишковий мул. Загальний об'єм осаду:

$$V_s = V_{oc} + V_M,$$

де V_{oc}, V_M – об'єм відповідно осаду та мулу, $\text{м}^3/\text{добу}$.

$$V_s = 25,6 + 255,8 = 281,4 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

За сухою речовиною загальна кількість осаду:

$$M_{\text{сух}}^3 = Q_{\text{сух}} + M_{\text{сух}},$$

де $Q_{\text{сух}}, M_{\text{сух}}$ – кількість відповідно осаду та мулу за сухою речовиною, т/добу;

$$M_{\text{сух}}^3 = 1,66 + 3,3 = 4,96 \text{ т/добу}.$$

Кількість беззольної речовини осаду $Q_{\text{без}}$ та активного мулу $M_{\text{без}}$, т/добу, відповідно обчислюється за формулами:

$$Q_{\text{без}} = \frac{Q_{\text{сух}}' (100 - B_{\Gamma}') \cdot (100 - Z_{oc}')}{100 \cdot 100};$$

$$M_{\text{без}} = \frac{M_{\text{сух}}' (100 - B_{\Gamma}') \cdot (100 - Z_{\text{мул}}')}{100 \cdot 100};$$

де B_{Γ}, B_{Γ}' – гігроскопічна вологість осаду і мулу, %; $Z_{oc}, Z_{\text{мул}}$ – зольність сухої речовини осаду і мулу.

Візьмемо зольність осаду 30%, активного мулу 25%, гігроскопічну вологу B_{Γ} і $B_{\Gamma}' - 5\%$.

$$Q_{\text{без}} = \frac{1,66 \cdot (100 - 5) \cdot (100 - 30)}{100 \cdot 100} = 1,1 \text{ т/добу};$$

$$M_{\text{без}} = \frac{3,3 \cdot (100 - 5) \cdot (100 - 25)}{100 \cdot 100} = 2,3 \text{ т/добу}.$$

Середні значення вологості та зольності мулу, що надходять на переробку в метантенк, обчислюємо за формулами:

$$B_{\text{сум}} = 100 \cdot \left(1 - \frac{M_{\text{сх}}^3}{V^3} \right);$$

$$Z_{\text{сум}} = 100 \cdot \left(1 - \frac{M_{\text{без}}^3}{\frac{Q_{\text{сум}}' (100 - B_{\Gamma})}{100} + \frac{M_{\text{сх}} \cdot (100 - B_{\Gamma}')}{100}} \right)$$

$$B_{\text{сум}} = 100 \cdot \left(1 - \frac{5,43}{228,91} \right) = 97,6\%$$

$$Z_{\text{сум}} = 100 \cdot \left(1 - \frac{3,3}{\frac{1,66 \cdot (100 - 5)}{100} + \frac{3,3 \cdot (100 - 5)}{100}} \right) = 30\%$$

Границя розкладу суміші осаду та мулу в метантенку обчислюється за формулою:

$$a_{\text{сум}} = \frac{(a_0 Q_{\text{без}} + a_m M_{\text{без}})}{M_{\text{без}}^3},$$

де a_0, a_m – границі розкладу осаду і мулу, які обчислюють за даними хімічного аналізу, а в разі їх відсутності дозволяється брати $a_0 = 53\%, a_m = 44\%$

$$a_{\text{сум}} = \frac{(53 \cdot 1,1 + 44 \cdot 2,3)}{3,3} = 53,1\%$$

Вихід газу $y', \text{ м}^3$, на 1 кг завантаженої беззольної речовини (густина газу беремо такою, що дорівнює 1), вираховуємо за формулою:

$$y' = \frac{(a_{\text{сум}} - H \cdot D)}{100},$$

де H – експериментальний коефіцієнт, за табл. 61 СНІП 2.04.03-85 ($H = 0,56$); D – добове завантаження осаду в метантенк, %, береться за таблицею 1.1.

Таблиця 1.1 – Добове завантаження осаду в метантенк

Режим бродіння	Доза завантаження, %, при вологості осаду, що завантажується, %, не більше				
	93	94	95	96	97
Мезофільний	7	8	8	9	10
Термофільний	14	16	17	18	19

Для нашого випадку, якщо $B = 97,6\%$; $D = 10$; тоді:

$$y' = \frac{53,1 - 0,56 \cdot 10}{100} = 0,475 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Сумарний вихід газу:

$$\Gamma = y' \cdot M_{\text{без}}^3 \cdot 1000 = 0,475 \cdot 3,3 \cdot 1000 = 1567,5 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Знаючи ступінь розкладу $a_{\text{сум}}$ легко можна обчислити масу беззольної речовини у збродженій суміші:

$$M_{\text{без}} = \frac{3,3 \cdot (100 - 53,1)}{100} = 1,5 \text{ т/добу}.$$

Зольна частина осаду становить:

$$M = M_{\text{сух}} - M_{\text{без}}' = 4,96 - 3,3 = 1,66 \text{ т/добу}.$$

Маса сухої речовини в збродженій суміші:

$$M_{\text{сух}} = M_z + M_{\text{без}}' = 1,66 + 1,5 = 3,16 \text{ т/добу}.$$

Приймаючи об'єм осаду, що виходить з метантенку, рівним об'єму осаду, що надходить, визначимо вологість зброженої суміші із співвідношення:

$$V_{\text{сум}} = 100 - \frac{M_{\text{сух}}'}{V_{\text{сух}}} \cdot 100 = 100 - \frac{3,16 \cdot 100}{281,4} \cdot 100 = 98,88\%$$

У мулі міститься води:

$$\frac{98,88 \cdot 281,4}{100} = 278,25 \text{ т/добу}.$$

Із них 20%, тобто 57,05 т/добу повертається з мулових майданчиків у первинний відстійник стічних вод.

Питома витрата повітря, $\text{м}^3/\text{м}^3$ очищеної води за пневматичної аерації аеротенка:

$$q_{\text{повн}} = \frac{q_o \cdot (L_a - L_t)}{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_m (C_a - C_o)},$$

де: q_o – питома витрата кисню, мг на 1 мг знятої БСК_{повн}; в разі очищення до БСК_{повн} 15 – 20 мг/г $q_o = 1,1$; K_1 – коефіцієнт, що враховує тип аератору.

За дрібнобульбашкової аерації прийmemo $K_1 = 1,47$.

K_2 – коефіцієнт, що залежить від глибини занурення аератора, прийmemo $K_2 = 2,64$;

K_3 – коефіцієнт якості води; для міських стічних вод $K_3 = 0,75$.

$$K_T = 1 + 0,02 / (T_w - 20) = \frac{1 + 0,02}{21 - 20} = 1,02$$

де: T_w – середньомісячна температура за літній період; $T_w = 21^\circ\text{C}$.

C_a – середня концентрація кисню в аеротенку, $\text{мг}/\text{дм}^3$:

$$C_a = \left(1 + \frac{h_a}{20,6} \right) \cdot C_T,$$

де: h_a – глибина занурення аератора, м; в нашому випадку $h_a = 4,5$ м;

C_T – розчинність кисню повітря у воді залежно від температури й тиску, становить:

$T, ^\circ\text{C}$	5	10	12	14	16	18	20	21	22	24
C_m мг/дм ³	17,79	11,27	10,75	10,26	9,82	9,4	9,02	8,84	8,67	8,33

C_0 – середня концентрація кисню в аеротенку, $\text{мг}/\text{дм}^3$, в першому наближенні можна взяти $2 \text{ мг}/\text{дм}^3$.

Для нашого випадку $L_a = 165 \text{ мг/дм}^3$, $L_t = 15 \text{ мг/дм}^3$. Концентрацію кисню C_o беремо рівною 2 мг/дм^3 .

Візьмемо дрібнобульбашковий аератор із співвідношенням площі аерації до площі аеротенка $\frac{f_{az}}{f_{at}} = 0,1$; $h_a = 4,3 \text{ м}$.

Тоді $K_1 = 1,47$; $K_2 = 2,64$; $K_3 = 0,75$; $q_0 = 1,1$; $C_T, 21^\circ\text{C} = 8,84$;

$$C_a = \left(1 + \frac{4,3}{20,6}\right) \cdot 8,84 = 10,69 \text{ мг/дм}^3.$$

Питома витрата повітря:

$$q_{повн} = \frac{1,1 \cdot (156 - 15)}{1,47 \cdot 2,64 \cdot 1,02 \cdot 0,75 \cdot (10,69 - 2)} = 6,44 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

На $18000 \text{ м}^3/\text{добу}$ води потрібно повітря: $6,44 \cdot 18000 = 115920 \text{ м}^3/\text{добу}$.

Отриманні результати зводимо в таблицю матеріального балансу.

Таблиця 1.2 – Матеріальний баланс станції очищення стічних вод потужністю $18000 \text{ м}^3/\text{год}$

Прихід			Витрати		
Склад потоків	Об'ємна витрата, $\text{м}^3/\text{год}$	Об'ємна частка, %	Склад потоків	Об'ємна витрата, $\text{м}^3/\text{год}$	Об'ємна частка, %
Промислові СВ	8000	45	Об'єм відходів, що затримується на решітках	0,96 1,09	0,005 0,006
Побутові СВ	10000	55	Об'єм піску, що затримується на пісколовках	0,88 1	0,005 0,005
			Об'єм осаду з первинних відстійників	24,32 25,6	0,135 0,142
			Об'єм надлишкового активного мулу	412,5	2,292
			Об'єм осаду, який надходить на метантенк	281,4	1,563
			Об'єм активного мулу, що повертається в аеротенк	6337,5	35,208
			Об'єм очищених СВ	10914,75	60,638
Всього	18000	100	Всього	18000	100

Практичне заняття 3

Теплоємність газів

Розрізняють мольну теплоємність $M \cdot C$ $\left(\frac{\text{кДж}}{\text{КмольК}} \right)$, масову теплоємність C $\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$, об'ємну теплоємність C' $\left(\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \text{К}} \right)$.

$$\text{Масова теплоємність } C = \frac{MC}{M}, \text{ об'ємна } C' = \frac{MC}{22,4} \quad (1)$$

$$C' = C \rho_H \quad (\rho_H - \text{густина газу в нормальних умовах)}$$

Середня теплоємність в межах $t_1 \dots t_2$ дорівнює:

$$C_T = q / (t_2 - t_1), \text{ а дійсна (істинна) теплоємність}$$

$$C = \frac{dq}{dt},$$

тут q - кількість тепла, переданого до одиниці кількості газу.

Між мольною теплоємністю при $P = \text{const}$ і при $V = \text{const}$ є зв'язок: $MC_P - MC_V = MR = 8.314 \text{ кДж/ (кмоль} \cdot \text{К)}$, а $C_P/C_V = K$ (для одноатомних газів $K = 1,67$; для двоатомних $K = 1,4$; для трьохатомних і багатоатомних $K = 1,29$). Залежність теплоємності від температури є нелінійною:

$$C = a + bt + dt^2,$$

де a, b, d - константи для кожного газу. В розрахунках часто нелінійну залежність заміняють близькою до неї лінійною:

$$C = a + bt,$$

а середня теплоємність при зміні температури від t_1 до t_2 складає:

$$C_m = a + \frac{b}{2}(t_1 + t_2)$$

В табл. 3.1 наведені формули для підрахунку середніх значень масової та об'ємної теплоємності газів за лінійним законом зміни температури.

Таблиця 3.1- Середня масова та об'ємна теплоємність газів (лінійна залежність)

Газ	Теплоємність за масою, кДж/кг·К	Об'ємна теплоємність, кДж/ (м³·К)
O ₂	$C_{pm} = 0.9203 + 0.0001065t$ $C_{vm} = 0.6603 + 0.0001065t$	$C_{pm} = 1.3188 + 0.00001577t$ $C_{vm} = 0.9429 + 0.0001577t$
N ₂	$C_{pm} = 1.024 + 0.00008855t$ $C_{vm} = 0.7272 + 0.00008855t$	$C_{pm} = 1.2799 + 0.0001107t$ $C_{vm} = 0.9089 + 0.0001107t$
Повіт	$C_{pm} = 0.9956 + 0.00009299t$ $C_{vm} = 0.7088 + 0.00008855t$	$C_{pm} = 1.2866 + 0.0001201t$ $C_{vm} = 0.9157 + 0.0001201t$
H ₂ O	$C_{pm} = 1.833 + 0.0003111t$ $C_{vm} = 1.3716 + 0.0003111t$	$C_{pm} = 1.4733 + 0.0002498t$ $C_{vm} = 1.1024 + 0.0002498t$
CO ₂	$C_{pm} = 0.8654 + 0.0002443t$ $C_{vm} = 0.6764 + 0.0002443t$	$C_{pm} = 1.699 + 0.0004798t$ $C_{vm} = 1.3281 + 0.0004798t$

Приклад 3.1. Визначити середню теплоємність C_{pm} повітря при $P = \text{const}$ в межах $200 \dots 800^\circ\text{C}$, виходячи із нелінійної залежності теплоємності від температури.

Кількість теплоти, яка передається від t_1 до t_2 складає:

$$q_p = C_{pm2} \cdot t_2 - C_{pm1} \cdot t_1, \text{ а}$$

$$C_{pm} \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{C_{pm2} \cdot t_2 - C_{pm1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$$

Табульовані значення теплоємності)

$$C_{pm} \Big|_0^{800} = 1.0710 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}$$

$$C_{pm} \Big|_0^{200} = 1.0115 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}, \text{ тоді}$$

$$C_{pm} \Big|_{200}^{800} = \frac{1,0710 \cdot 800 - 1,0115 \cdot 200}{800 - 200} =$$

$$= 1,091 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}$$

При змішуванні газів, які не реагують хімічно, мають різні температури та тиск, розрізняють 2 випадки:

1 - змішування при $V = \text{const}$ (сумарний об'єм газів перед і після змішування).
Параметри стану визначаються за формулами:

$$T = \frac{\sum_1^n \frac{p_i V_i}{K_{i-1}}}{\sum_1^n \frac{P_1 V_1}{(K_1 - 1) T_i}}$$

$$P = \frac{T}{V} \sum_1^n \frac{P_1 V_1}{T_i}$$

$$V = \sum_1^n V_i$$

Для газів із однаковими мольними теплоємностями (та однаковими значеннями K).

$$T = \frac{\sum_1^n P_i V_i}{\sum_1^n \frac{P_i V_i}{T_i}}, \quad P = \frac{\sum_1^n P_i V_i}{V}$$

2 - змішування газових потоків (масові витрати $M_i - \frac{\text{кг}}{\text{год}}$, об'ємні витрати $V_i - \text{м}^3/\text{год}$, тиск P_i , температура - T_i) при відношенні теплоємностей окремих газів $K_1, K_2 \dots K_n$:

$$T = \frac{\sum_1^n \frac{K_i}{K_{i-1}} \cdot P_i V_i}{\sum_1^n \frac{K_i}{(K_1 - 1)} \cdot \frac{P_i V_i}{T_i}}$$

$$V = \frac{T}{P} \sum_1^n \frac{P_1 V_i}{T_i} \quad (1.8)$$

при температурі T , тиску P .

Якщо гази перебувають під однаковим тиском, то

$$T = \frac{\sum_1^n V_i}{\sum_1^n \frac{V_i}{T_i}}, \quad V = T \sum_1^n \frac{V_i}{T_i}.$$

Приклад 1-9. У двох посудинах утримуються гази: посудина А - 50 л азоту, при $P_1 = 2 \text{ МПа}$, $t_1 = 200^\circ \text{C}$; посудина В - 200 л диоксиду вуглецю при $P_2 = 0,5 \text{ МПа}$, $t_2 = 600^\circ \text{C}$. Визначити тиск і температуру, які будуть встановлені після приєднання посудин.

$$\text{Значення } K_{N_2} = \frac{C_{P200}}{C_{V200}} = \frac{29.471}{21.156} = 1.39;$$

$$K_{CO_2} = \frac{C_{P600}}{C_{V600}} = \frac{52.452}{44.137} = 1.19;$$

$$T = \frac{\sum_1^n \frac{p_i V_i}{K_{i-1}}}{\sum_1^n \frac{P_1 V_i}{(K_i - 1) T_i}} = \frac{\left(\frac{2 \cdot 0.05}{0.39} + \frac{0.5 \cdot 0.2}{0.19} \right) 10^6}{\left(\frac{2 \cdot 0.05}{0.39 \cdot 473} + \frac{0.5 \cdot 0.2}{0.19 \cdot 873} \right) 10^6} = 684 \text{ K} = 411^\circ \text{C}$$

$$P = \frac{T}{V} \sum_1^n \frac{P_1 V_i}{T_i} = \frac{64}{0.25} \left(\frac{2 \cdot 0.05 \cdot 10^6}{473} + \frac{0.5 \cdot 0.2 \cdot 10^6}{873} \right) = 0.89 \text{ МПа}.$$

Практичне заняття 4

I закон термодинаміки. Процес підведення або відбирання теплоти

Аналітичний вираз I закону термодинаміки має вигляд:

$$dQ = dU + dL,$$

де dQ - кількість теплоти, яку робоче тіло отримало зовні,

dU - зміна внутрішньої енергії робочого тіла,

dL - робота, яку здійснило робоче тіло ("зовнішня робота розширення").

Для нескінченно малої зміни стану робочого тіла

$$dq = du + pdu =$$

$$= d(u + pu) - udr.$$

$I = u + pu$ є параметром стану, має назву ентальпії.

Для ідеального газу

$$i = \int_0^t C_p dT = C_{pm} T$$

де C_{pm} - середня масова теплоємність при $p = \text{const}$ в межах $0 \dots T$.

Для теплотехнічних розрахунків необхідно знати зміну ентальпії, а не її абсолютне значення. При $p = \text{const}$ кількість теплоти $q_p = i_2 - i_1$, тобто різниця ентальпій кінцевого і вихідного стану.

Приклад 4.1. В котельній електростанції за 20 год. спалено 62т кам'яного вугілля, яке має теплоту згорання 28900 кДж/кг. Визначити середню потужність станції, якщо в електричну енергію перетворено 18% теплоти, отриманої від спалення вугілля.

Кількість теплоти, яка перетворена в електричну енергію, складає:

$$Q = 62 \cdot 1000 \cdot 28900 \cdot 0,18 \text{кДж.}$$

Еквівалентна електрична енергія або робота

$$L = \frac{62 \cdot 1000 \cdot 28900 \cdot 0,18}{3600} = 89590 \text{кВт} / \text{год}$$

Середня електрична потужність станції

$$T = \frac{89590}{20} = 4479 \text{кВт}$$

Процес підведення або відбирання теплоти

Процес може бути ізохорним ($V = \text{const}$), ізобарним ($p = \text{const}$), ізотермічним ($t = \text{const}$), адіабатним ($dq = 0$), політропним ($PV^m = \text{const}$, де m - стала величина, показник політропи).

При $V = \text{const}$ залежність між параметрами початкового і кінцевого стану має вигляд:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

Зміна внутрішньої енергії

$$\Delta U_V = q_V = C_{Vm}(t_2 - t_1) \quad (11). \quad \text{При } p = \text{const}: \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}, \text{ а}$$

1 кг газу може виконати роботу

$$L = P(V_2 - V_1) \text{ або } L = R(T_2 - T_1) \quad (13)$$

При $t = \text{const}$: $PV = \text{const}$, $\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_1}{V_2}$, а 1 кг ідеального газу виконує роботу:

$$l = RT \ln \frac{V_2}{V_1}; \quad l = RT \ln \frac{P_2}{P_1}; \quad l = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}; \quad l = P_1 V_1 \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (14)$$

Адіабатний процес: при $C_V = \text{const}$, $PV^K = \text{const}$ (тут $K = \frac{C_P}{C_V}$ - показник адіабати).

Залежність між початковими і кінцевими параметрами:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^K$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{K-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}}$$

а робота 1 кг газу складає:

$$l = \frac{1}{K-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2); \quad l = \frac{P_1 V_1}{K-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{K-1} \right]$$

$$l = \frac{R}{K-1} (T_1 - T_2); \quad l = \frac{P_1 V_1}{K-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \quad (18)$$

Політропний процес: $PV^m = \text{const}$; характеристикою таких процесів є величина

$$\varphi = \Delta u / q, \quad \text{або} \quad \varphi = \frac{m-1}{m-K} \quad (\text{де } K = \frac{C_p}{C_v})$$

Для процесу розширення:

а) $m < 1 \dots (q > 0)$ - підведення тепла, ($\Delta u > 0$) - зростання внутрішньої енергії; б) $K > m > 1 \dots (q > 0)$, але ($\Delta u < 0$); в) $m > K \dots (q < 0)$ - відведення теплоти, ($\Delta u < 0$).

Для процесу стискування:

а) $m < 1 \dots$ теплота відводиться, внутрішня енергія зменшується;

б) $K > m > 1 \dots$ теплота відводиться, внутрішня енергія зростає;

в) $m > K \dots$ теплота підводиться, внутрішня енергія зростає.

Залежність між початковими і кінцевими параметрами:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{1}{m}}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{m-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}}$$

Робота 1 кг газу в політропному процесі визначається за співвідношеннями:

$$l = \frac{1}{m-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2); \quad l = \frac{P_1 V_1}{m-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{m-1} \right]; \quad l = \frac{P_1 V_1}{m-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} \right]; \quad l = \frac{R}{m-1} (T_1 - T_2)$$

Якщо кількість теплоти, яка приймає участь в процесі, відома, то робота обчислюється за формулою:

$$l = \frac{K-1}{K-m} q$$

Теплоємність політропного процесу:

$$C = \frac{V_2}{\varphi} = C_v \frac{m-k}{m-1}$$

Кількість теплоти, яка сприймається або відбирається від газу:

$$q = C(t_2 - t_1) = C_v \frac{m-k}{m-1} (t_2 - t_1)$$

Зміна внутрішньої енергії газу:

$$\Delta u = C_{vm} (t_2 - t_1), \quad \text{або} \quad \Delta u = \frac{m-1}{1-k} l \quad (25) \quad \text{Показник політропи } m = \frac{C_p - C}{C_v - C}$$

Якщо відомі 2 параметра початкового і кінцевого стану, то

$$m = \frac{\lg \frac{P_1}{P_2}}{\lg \frac{V_2}{V_1}}$$

$$m - 1 = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{V_1}{V_2}}$$

$$\frac{m - 1}{m} = \frac{\lg \frac{T_2}{T_1}}{\lg \frac{P_2}{P_1}}$$

Приклад 4.1. В закритій посудині розміщується газ під розрідженням $P_1 = 6667$ Па і $t_1 = 70^\circ\text{C}$. Показчик барометра - 101325 Па. До якої температури потрібно охолодити газ, щоб розрідження становило $P_2 = 13332$ Па?

Тут $V = \text{const}$ і $P_1/P_2 = T_1/T_2$, тоді

$$\frac{101325 - 6667}{101325 - 13332} = \frac{273 + 70}{T_2}, \text{ звідси } T_2 = 318,8\text{K}, t_2 = 45,8^\circ\text{C}.$$

Приклад 4.2. В закритій посудині $V = 0,6\text{m}^3$ міститься повітря при $P_1 = 0,5$ МПа і $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Після охолодження посудині повітря втрачає 105 кДж. Визначити, який тиск і температура повітря встановляться у посудині.

Із рівняння стану $PV = MRT$ визначаємо масу повітря в посудині:

$$M = \frac{PV}{RT} = \frac{0,5 \cdot 10^6 \cdot 0,6}{287 \cdot 293} = 3,57\text{кг}$$

Кількість теплоти $Q = MC_{vm}(t_2 - t_1)$, звідси

$$t_2 = \frac{Q}{MC_{vm}} + t_1 = \frac{-105}{3,57 \cdot 0,723} + 20 = -20,7^\circ\text{C}.$$

$$\text{Тут } C_{vm} = \frac{MC_{vm}}{M} = \frac{20,93}{28,96} = 0,723.$$

Для ізохорного процесу

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 0,5 \frac{273 - 20,7}{293} = 0,43\text{МПа}.$$

Приклад 4.3. Визначити, яка кількість теплоти, що підведена до газу в ізобарному процесі витрачається на роботу і яка - на зміну внутрішньої енергії.

І закон термодинаміки - $dq = du + dl$ можна представити як

$$\frac{du}{dq} + \frac{dl}{dq} = 1. \text{ Величина } \frac{dl}{dq} = -\frac{du}{dq} \text{ визначає частку теплоти, підведеної до газу, яка}$$

здійснює роботу розширення. Для ідеального газу $P = \text{const}$, то $du = C_v dt$ і $dq = C_p dt$, тоді

$$\frac{dl}{dq} = 1 - \frac{C_v dt}{C_p dt}. \text{ Приймаємо } K = 1,4, \text{ тоді отримаємо } \frac{dl}{dq} = 1 - \frac{1}{1,4} = 0,285 \text{ (тут } K = \frac{C_p}{C_v}). \text{ Це}$$

означає, що в ізобарному процесі лише 28,5% підведеної теплоти до газу перетворюється в роботу, а решта 71,5% теплоти збільшує внутрішню енергію системи.

Приклад 4.4. 1 кг повітря при температурі $t_1 = 30^{\circ}\text{C}$ і вихідному тиску $P_1 = 0,1$ МПа стискується ізотермічно до кінцевого тиску $P_2 = 1$ МПа. Визначити кінцевий об'єм, витрачену роботу і кількість теплоти, яка відводиться від газу.

$$\text{Із рівняння стану } V_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{283 \cdot 303}{0,1 \cdot 10^6} = 0,87 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

$$\text{При } t = \text{const } P_1 V_1 = P_2 V_2 \text{ і } V_2 = V_1 \frac{P_1}{P_2} = 0,87 \cdot \frac{0,1}{1} = 0,087 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Робота стиснення складає:

$$l = RT \ln \frac{P_1}{P_2} = -2,303 RT \lg \frac{P_1}{P_2} = -2,303 \cdot 287 \cdot 303 \cdot \lg 10 = -200 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Кількість відведеної від газу теплоти дорівнює кількості роботи на стискання газу, $q = -200 \text{ кДж/кг}$.

Приклад 4.5.. Адіабатне стискання привело до підвищення температури повітря в двигуні і спалаху пального. Об'єм зменшився в 14 разів.

Визначити кінцеву температуру і кінцевий тиск повітря, якщо $P_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 100^{\circ}\text{C}$.

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{K-1} = 373 \left(\frac{14}{1} \right)^{1,4-1} = 1067 \text{ K} \quad (\text{тут } K = 1,4).$$

$$\text{Кінцевий тиск } P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{K}{K-1}} = 0,1 \left(\frac{1067}{373} \right)^{\frac{1,4}{0,4}} = 4 \text{ МПа}.$$

Приклад 4.6. 1 кг повітря при $P_1 = 0,5$ МПа, $t_1 = 111^{\circ}\text{C}$ розширюється політропно до тиску $P_2 = 0,1$ МПа. Визначити параметри кінцевого стану повітря, зміну внутрішньої енергії, кількість підведеної теплоти і отриману роботу, якщо показник політропи $m = 1,2$.

$$\text{Початковий об'єм повітря: } V_1 = RT_1 / P_1 = \frac{287 \cdot 384}{0,5 \cdot 10^6} = 0,22 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

$$\text{Кінцевий об'єм повітря: } V_2 = V_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{m}} = 0,22 \cdot 5^{\frac{1}{1,2}} = 0,84 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

Кінцеву температуру отримаємо із характеристичного рівняння

$$T_2 = \frac{P_2 V_2}{R} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 0,84}{287} = 293 \text{ K}.$$

Визначаємо роботу:

$$l = \frac{R}{m-1} (T_1 - T_2) = \frac{287}{0,2} (384 - 293) = 131,6 \text{ кДж/кг}$$

Зміна внутрішньої енергії:

$$\Delta U = C_V(T_2 - T_1) = 0.72(293 - 384) = -65.8 \text{ кДж / кг}$$

Кількість підведеної теплоти складає:

$$q = C_V \frac{m-k}{m-1} (t_2 - t_1) = 0.72 \cdot \frac{1.2-1.4}{1.2-1} (20 - 111) = 65.8 \text{ кДж / кг}$$

Тут зовнішня робота відбувається за рахунок підведення теплоти та зменшення внутрішньої енергії.

$$q = \Delta U + l; \quad l = q - \Delta U = 65.8 - (-65.8) = 131.6 \text{ кДж / кг}.$$

Приклад 4.7.10 л повітря при тиску $P_1=1\text{МПа}$ і температурі $t_1=25^\circ\text{C}$ розширюється в циліндрі із рухомих поршнем до $0,1\text{МПа}$. Визначити кінцеві об'єм, температуру, роботу, здійснену газом, підведену теплоту, якщо розширення відбувається: а) ізотермічно; б) адіабатно; в) політропно.

а) ізотермічний процес ($PV = \text{const}$)

$$V_2 = V_1 \frac{P_1}{P_2} = 0.01 \cdot \frac{1}{0.1} = 0.1 \text{ м}^3, \quad t_1 = t_2 = \text{const.} \quad \text{Робота}$$

$$L = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = 1 \cdot 10^6 \cdot 0.01 \cdot 2.303 \lg 10 = 23000 \text{ Дж}.$$

Підведено теплоти $Q = L = 23 \text{ кДж}$.

б) Адіабатний процес ($PV^k = \text{const}$) $P_1 V_1^k = P_2 V_2^k$, звідси

$$V_2 = V_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0.01 \cdot 10^{1.4} = 0.05188 \text{ м}^3$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 298 \left(\frac{0.1}{1} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 1543 \text{ К} = -1187^\circ \text{C},$$

$$L = \frac{P_1 V_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{1 \cdot 10^6 \cdot 0.01}{0.4} \left(1 - \frac{0.1}{1} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 12 \text{ кДж}.$$

в) Політропний процес ($PV^m = \text{const}$)

$$V_2 = V_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{m}} = 0.01 \cdot 10^{1.3} = 0.05885 \text{ м}^3,$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} = 298 \cdot \left(\frac{0.1}{1} \right)^{\frac{0.3}{1.3}} = 175.2 \text{ К} = -97.8^\circ \text{C}.$$

$$\text{Робота } L = \frac{P_1 V_1}{m-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} \right] = \frac{1 \cdot 10^6 \cdot 0.01}{0.3} \left(1 - \frac{0.1}{1} \right)^{\frac{0.3}{1.3}} = 13.7 \text{ кДж}.$$

$$\text{Підведена теплота: } Q = L \frac{k-m}{k-1} = 13.7 \cdot \frac{0.1}{0.4} = 3.425 \text{ кДж}$$

Приклад 4.8. Для сушіння керамічних виробів використовують повітря, яке підігрівається в зоні охолодження печі від 17 до 80°C. Яка кількість теплоти необхідна на 1 год. сушіння виробів, якщо за цей час витрачається 8 тис. м³ повітря при сталому тиску 750 мм рт. ст. (100 кПа).

$$Q = MC_p(t_2 - t_1).$$

Масу повітря визначаємо із рівняння стану PV = MRT:

$$M = \frac{PV}{RT} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 8000}{8314 \cdot (273 + 17)} = 9620 \text{ кг / год}, \quad Q = 9620 \cdot \frac{29.3}{29} (80 - 17) = 613 \text{ мДж?}$$

тут $C_p = \frac{MC_p}{M}$ (MC_p - 29,3 кДж/кмоль для двоатомних газів - довідкова величина).

Практичне заняття 5

II ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

Ентропія згідно із другим законом термодинаміки для оборотних процесів складає:
 $dQ = TdS$

де dS - нескінченно малий приріст ентропії системи, dQ - нескінченно мала кількість теплоти, T - абсолютна температура джерела теплоти.

Об'єднавши I і II закони термодинаміки, отримаємо

$$TdS = dU + pdU$$

Основним рівнянням для визначення зміни ентропії є вираз

$$dS = \frac{dq}{T}$$

Для газів рахують, що значення ентропії дорівнює нуль при P=101325 Па і T = 273,15К. Ентропія для будь-якого стану газів відраховується від нормального стану.

За змінною теплоємністю

$$S = a_v \ln \frac{T}{273} + R \ln \frac{V}{V_H} + b(T - 273) \quad (32), \quad S = a_p \ln \frac{T}{273} + R \ln \frac{P}{P_H} + b(T - 273) \quad (33)$$

$$S = a_v \ln \frac{P}{P_H} + a_p \ln \frac{V}{V_H} + b(T - 273) \quad (34)$$

За сталою теплоємністю

$$S = C_V \ln \frac{T}{273} + R \ln \frac{V}{V_H}$$

$$S = C_P \ln \frac{T}{273} + R \ln \frac{P}{P_H}$$

$$S = C_V \ln \frac{P}{P_H} + C_P \ln \frac{V}{V_H}$$

Зміна ентропії між станом 1 і 2:

$$S_2 - S_1 = a_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} + b(T_2 - T_1)$$

$$S_2 - S_1 = a_P \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} + b(T_2 - T_1)$$

$$S_2 - S_1 = a_V \ln \frac{P_2}{P_1} + a_P \ln \frac{V_2}{V_1} + b(T_2 - T_1)$$

При сталій теплоємності

$$S_2 - S_1 = C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$S_2 - S_1 = C_P \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$S_2 - S_1 = C_V \ln \frac{P_2}{P_1} + C_P \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Рівняння ізохори: $S_2 - S_1 = C_V \ln \frac{T_2}{T_1}$

Ізобари: $S_2 - S_1 = C_P \ln \frac{T_2}{T_1}$

Ізотерми: $S_2 - S_1 = R \ln \frac{V_2}{V_1} = R \ln \frac{P_1}{P_2}$

Адiabати: $S = \text{const}$,

Політропи: $S_2 - S_1 = C \ln \frac{T_2}{T_1}$ (тут $C = C_V \frac{m-K}{m-1}$)

Приклад 5.1. Визначити ентропію 1 кг кисню при $P_1=0,8\text{мПа}$ і $t_1=250^\circ\text{C}$. Теплоємність приймається стала

$$S = C_P \ln \frac{T}{273} - R \ln \frac{P}{P_H}$$

Для двоатомних газів $M_{C_P} = 29,3$ кДж/кмоль,

а $R = 8,314$ кДж/кмоль, то

$$S = \frac{29.3}{32} 2.303 \lg \frac{523}{273} - \frac{8.314}{32} 2.303 \lg \frac{8}{1.013} = 0.0605 \text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K})$$

Приклад 5.2. Визначити ентропію 1 кг кисню при $P_1=0,8\text{мПа}$ і $t_1=250^\circ\text{C}$. Теплоємність лінійно залежить від температури.

$$\text{Тоді } S = a_p \ln \frac{T}{273} - R \ln \frac{P}{P_H} + b(T - 273).$$

Для кисню $C_{pm} = 0.9127 + 0.00012724t$ кДж/ (кг·К)

або $C_p = 0,9127 + 0,00025448 (T-273)$ кДж/ (кг·К),

звідси $C_p = 0,8432 + 0,00025448T$ кДж/ (кг·К).

Таким чином, $a = 0,8432$, $b = 0,00025448$.

Значення ентропії

$$S = 0.8432 \cdot 2.303 \lg \frac{523}{273} - \frac{8.314}{32} \cdot 2.303 \lg \frac{0.8}{0.1013} + \\ + 0.00025448(523 - 273) = 0.0739 \text{ кДж} / (\text{ кг} \cdot \text{ К})$$

Приклад 5.3. 1 кг кисню при $t_1 = 127^\circ\text{C}$ розширюється в 5 разів; температура його падає до $t_2 = 27^\circ\text{C}$. Визначити зміну ентропії за умов сталої теплоємності.

$$S_2 - S_1 = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} = 2.303 \left(\frac{20.93}{32} + \lg \frac{300}{400} + \frac{0.314}{32} \lg 5 \right) = \\ = 0.2324 \text{ кДж} / (\text{ кг} \cdot \text{ К})$$

Приклад 5.4. 1 кг повітря стискується адіабатно так, що об'єм зменшується в 6 разів, потім при $V = \text{const}$ тиск підвищується в 1,5 рази. Визначити загальну зміну ентропії повітря за сталою теплоємністю.

Зміна ентропії повітря в адіабатному процесі дорівнює нулю. Зміна в ізохорному процесі

$$\Delta S_v = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} = C_v \ln \frac{P_2}{P_1} = C_v \ln 1.5 = 2.303 \frac{20.93}{28.96} \lg 1.5 = \\ = 0.293 \text{ кДж} / (\text{ кг} \cdot \text{ К})$$

Приклад 5.5. 10 м^3 повітря, яке перебувало в нормальних умовах, стискується до набуття температури 400°C :

- 1) ізобарно;
- 2) ізохорно;
- 3) адіабатно;
- 4) політропно. Визначити ентропію повітря на кінець кожного процесу.

Приймаємо ентропію в нормальних умовах $S_0 = 0$, теплоємність повітря - стала.

Маса повітря в нормальних умовах:

$$M = \frac{RV}{RT} = \frac{0.1013 \cdot 10^6 \cdot 10}{287 \cdot 273} = 12.9 \text{ кг}$$

Зміна ентропії при стисканні:

$$1) \text{ ізобарно } \Delta S_1 = MC_p \ln \frac{T}{273} = 12.9 \cdot 1.0117 \cdot 2.303 \lg \frac{673}{273} = 11.7 \text{ кДж} / \text{ К}$$

$$2) \text{ ізохорно } \Delta S_2 = MC_v \ln \frac{T}{273} = 12.9 \cdot 0.723 \cdot 2.303 \lg \frac{673}{273} = 8.42 \text{ кДж} / \text{ К}$$

$$3) \text{ адіабатно } \Delta S_3 = S_3 = 0$$

$$4) \text{ політропно } \Delta S_4 = MC_v \frac{m-k}{m-1} \ln \frac{T}{273} = 12.9 \cdot 0.723 \cdot \frac{2.2-1.4}{2.2-1} \cdot 2.303 \lg \frac{673}{273} = \\ = 5.61 \text{ кДж} / \text{ К}$$

Приклад 5.6. В процесі політропного розширення повітря температура його зменшилася від $t_1=25^0\text{C}$ до $t_2=-37^0\text{C}$. Початковий тиск повітря $P_1 = 0,4\text{МПа}$, кількість його $M = 2$ кг. Визначити зміну ентропії цього процесу, якщо відомо, що кількість підведеної до повітря теплоти складає $89,2$ кДж.

Кількість теплоти, яка надається газу в політропному процесі складає:

$$Q = MC_V \frac{m-k}{m-1} (t_2 - t_1) \frac{m-k}{m-1} = \frac{89.2}{2 \cdot 0.723 \cdot (-37 - 25)} = -0.995$$

Звідси $m = 1,2$.

$$\text{Кінцевий тиск: } \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{m}{m-1}} ;$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{m}{m-1}} = 0.4 \cdot \left(\frac{236}{298} \right)^6 = 0.1\text{МПа}$$

$$\begin{aligned} \text{Зміна ентропії: } S_2 - S_1 &= \left[C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \right] M = \\ 2 * 2.3 &\left[\frac{29.3}{28.96} \lg \frac{236}{298} - \frac{287}{1000} - \lg \frac{0.1}{0.4} \right] = 0.323\text{кДж} / \text{К} \end{aligned}$$

Робота, яку здійснює газ при розширенні є максимальною за умов переходу від початкового стану до стану середовища оберненим шляхом. Максимальна корисна робота менша за максимальну роботу на величину роботи витискання повітря навколишнього середовища.

Максимальну корисну роботу можна визначити за співвідношенням:

$$l_{\max}^{kop} = U_1 - U_2 - T_0(S_1 - S_2) - P_0(V_2 - V_1)$$

(тут параметри 1 і 2 належать до початкового і кінцевого стану джерела роботи, а параметр з індексом 0 належить до робочого середовища).

Виходячи з того, що $U_1 - U_2$ та $T_0(S_1 - S_2)$ являють собою абсолютну роботу адіабатного та ізотермічного процесу, формулу можна представити як

$$l_{\max}^{kop} = l_{ad} - l_{iz} - P_0(V_2 - V_1)$$

Приклад 5.7. В посудині об'ємом 300 л перебуває повітря при тиску $P_0 = 5$ МПа, температурі $t_1 = 20^0\text{C}$. Визначити максимальну корисну роботу, яку може виконати стиснене повітря.

Температура повітря у вихідному стані дорівнює температурі середовища, тому максимальна робота може бути здійснена повітрям лише за умов ізотермічного розширення від $P_1 = 5\text{МПа}$ до $P_2 = 0,1$ МПа.

$$l_{\max}^{kop} = T_0(S_2 - S_1) - P_0(V_2 - V_1), \text{ або } l_{\max}^{kop} = MT_0(S_2 - S_1) - P_0(V_2 - V_1)$$

$$\text{Маса повітря в посудині } M = \frac{PV}{RT} = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot 0.3}{287 \cdot 293} = 17.83\text{кг}$$

Об'єм повітря після ізотермічного розширення

$$V = \frac{P_1 V_1}{P_2} = \frac{5 \cdot 0.3}{0.1} = 15 \text{ м}^3$$

Зміна ентропії в ізотермічному процесі

$$S_2 - S_1 = R \ln \frac{P_1}{P_2}, \text{ то } l_{\max}^{kop} = MT_0 R \ln \frac{P_1}{P_2} - P_0 (V_2 - V_1) = \\ = 17.83 \cdot 287 \cdot 2.3 \cdot 1.699 - 1 \cdot 10^5 (15 - 0.3) = 4377 \text{ кДж}$$

Практичне заняття 6

ЦИКЛ КАРНО

Круговим процесом або циклом називають сукупність термодинамічних процесів, внаслідок яких робоче тіло повертається у вихідний стан. Робота кругового процесу l_0 в діаграмі PV визначається площею замкненого контуру циклу. Робота є позитивною, якщо цикл відбувається у напрямку годинникової стрілки (прямий цикл) і від'ємна - якщо проти годинникової стрілки (обернений цикл).

Прямий цикл є характерним для теплових двигунів ($l_0 > 0$), обернений - для холодильних машин ($l_0 < 0$).

Якщо q_1 - кількість тепла, яке передане 1 кг робочого тіла зовнішнім (верхнім) джерелом теплоти, а q_2 - кількість тепла, яку віддає робоче тіло зовнішньому охолоджувачу, то корисно використана в циклі теплота $q_1 - q_2 = l_0$. В діаграмі $T-S$ ця теплота дорівнює площі контуру цикла, вона адекватна роботі за один цикл і є позитивною, як і в діаграмі $P-V$, якщо цикл відбувається проти годинникової стрілки.

$$\text{Термічний К. к. д. дорівнює: } \eta = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_0}{q_1}.$$

Наприклад, цикл Карно складається із двох адіабат і двох ізотерм.

$$\text{Кількість підведеної теплоти } q_1 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$\text{Кількість відведеної теплоти } q_2 = RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

Робота циклу Карно $q_1 - q_2 = l_0$, термічний к. к. д.

$$\eta_i = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

де T_1, T_2 - температури, відповідно верхнього та нижнього джерел теплоти, К.

В поршневих компресорах цикл в діаграмі $P-V$ складається із процесів: всмоктування газу, стискання (тиск зростає, об'єм зменшується), нагнітання. Закликає цикл стан $V=0; P_1$).

Приклад 26. Компресор всмоктує 100 м³/год повітря під тиском $P_1 = 0,1$ МПа, температурі $t_1 = 27^{\circ}\text{C}$. Кінцевий тиск повітря - 0,8 МПа. Визначити теоретичну потужність двигуна приводу компресора та витрату води охолодження, якщо температура її

підвищується на 13°C . Розрахувати ізотермічний адіабатний і політропний процеси ($m=1.2$; $C_{\text{H}_2\text{O}}=4.19\text{кДж/кг}$).

1) Ізотермічне стискання. Роботу компресора визначаємо за рівнянням

$$L_0 = P_1 V_1 \ln \frac{P_2}{P_1} = RT \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$L_0 = 2.303 \cdot 0.1 \cdot 10^6 \cdot 100 \cdot \lg 8 = 20.8 \text{ МДж/год.}$$

Теоретична потужність двигуна:

$$N = \frac{L_0}{1000 \cdot 3600} = \frac{20.8 \cdot 10^6}{1000 \cdot 3600} = 5.8 \text{ кВт}$$

Теплота, яка відводиться з водою охолодження складає:

$$Q = L_0 = 20.8 \text{ МДж/год}$$

Витрата води охолодження

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{20.8 \cdot 10^6}{13 \cdot 4.19} = 382 \text{ кг/год}$$

2) Адіабатне стискання. З рівняння

$$L_0 = \frac{K}{K-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$L_0 = \frac{1.4}{0.4} \cdot 0.1 \cdot 10^6 \cdot 100 \left[8^{\frac{0.4-1}{1.4}-1} \right] = 28.4 \text{ МДж/год}$$

Потужність двигуна

$$N = \frac{L_0}{1000 \cdot 3600} = \frac{28.4 \cdot 10^6}{1000 \cdot 3600} = 7.9 \text{ кВт}$$

3) Політропне стискання. З рівняння

$$L_0 = \frac{m}{m-1} P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

$$L_0 = \frac{1.2}{0.2} \cdot 0.1 \cdot 10^6 \cdot 100 \left[8^{\frac{0.2-1}{1.2}-1} \right] = 24.8 \text{ МДж/год}$$

Потужність двигуна

$$N = \frac{L_0}{1000 \cdot 3600} = \frac{24.8 \cdot 10^6}{1000 \cdot 3600} = 6.9 \text{ кВт}$$

Кількість теплоти, яка відводиться від повітря, знайдемо за рівнянням:

$$Q = MC(t_2 - t_1) = MC_v \frac{m-k}{m-1} (t_2 - t_1)$$

$$M = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = \frac{0.1 \cdot 10^6 \cdot 100}{287 \cdot 300} = 116 \text{ кг/год};$$

$$C_V * \frac{m-k}{m-1} = 0.723 * \frac{-0.2}{0.2} = -0.723 \text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{K});$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} = 8^{\frac{0.2}{1.2}} = 1.414 ;$$

$$T_2 = T_1 * 1.414 = 300 * 1.414 = 424 \text{K} = 151^\circ \text{C}$$

$$Q = -116 * 0.723 * 124 = -10400 \text{кДж} / \text{год} .$$

Витрати води охолодження

$$M_{H_2O} = \frac{10400}{13 * 4.19} = 190 \text{кг} / \text{год} .$$

При адіабатному стисканні теоретична робота компресора в K разів більша ніж робота адіабатного стискання; при політропному стисканні робота компресора в m разів більша, ніж робота політропного стискання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гомеля М.Д., Крисенко Т.В., Дейкун І.М. Очисні споруди. Основи проектування – Київ НТУУ «КПІ», -2007.-169 с.
2. Демидов П.Г., Щеглов П.П. Горение и свойство горючих. – М.: 1981. 272 с.
3. Кириллин В.А., Сычев В.В. Техническая термодинамика. - М.: Высшая школа, 1983,- 344с.
4. Сборник задач по технической термодинамике.- М-Л. : Энергия/ под ред. М. П. Вукаловича. – 200 с.
5. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче/Под ред. Б.Н.Юдаева – М.: Высшая школа, 1964. – 369 с.
6. Литвин А.М. Теоретические основы теплотехники.- М-Л: Энергия. -1964.-367 с.
7. Машины и аппараты химических производств/ под ред. И.В. Доманского. - Л.: Машиностроение, 1982. – 384 с.
8. Технологические расчеты установок переработки нефти/Под ред. М.А. Танатарова и др. М.: Химия, 1987.- 311 с.
9. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии/ К.Ф.Павлов и др. - Л.: Химия 1987.- 576 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Методичні вказівки виконання практичних робіт з дисципліни «Безвідходні хімічні технології» для підготовки докторів філософії зі спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія»

Укладач: Іванченко Анна Володимирівна, к.т.н., доцент

Підписано до друку _____
Формат _____ Обсяг _____ др.арк.
Тираж _____ прим. Замовлення № _____
51918, м. Кам'янське, вул. Дніпробудівська, 2