

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

**ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ДРОСЕЛЬНОГО ЕФЕКТУ В
ПРОЦЕСІ ДРОСЕЛЮВАННЯ ПОВІТРЯ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для самостійної підготовки до лабораторної роботи №4
з курсу «Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів» для студентів
базового напрямку 6.051301 «Хімічна технологія», 6.051302 «Хімічна інженерія»
та з курсу «Енергозбереження в хімічних технологіях» для студентів базового
направку 6.050503 «Машинобудування»

*Затверджено
на засіданні кафедри
хімічної інженерії
Протокол № від .2013 р.*

ЛЬВІВ – 2013

Визначення інтегрального дросельного ефекту в процесі дроселювання повітря: Методичні вказівки для самостійної підготовки до лабораторної роботи №4 з курсу «Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів» для студентів базового напрямку 6.051301 «Хімічна технологія», 6.051302 «Хімічна інженерія» та з курсу «Енергозбереження в хімічних технологіях» для студентів базового напрямку 6.050503 «Машинобудування» /Укладачі — д.т.н., проф. Семенишин Є.М., к.т.н., доц. Троцький В.І., к.т.н., доц. Кіндзера Д.П., к.т.н., ст. викл. Римар Т.І./- Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 15 с.

Укладачі:

Семенишин Є.М., д-р техн. наук, проф.,
Троцький В.І., канд. техн. наук, доц.,
Кіндзера Д.П., канд. техн. наук, доц.,
Римар Т.І. канд. техн. наук, ст. викл.

Відповідальний за випуск

Атаманюк В.М., д-р. техн. наук, проф.

Рецензент

Мальований М.С., д-р. техн. наук, проф.

Метою роботи є вивчення закономірностей процесу дроселювання, що широко застосовується в хімічній та інших галузях промисловості під час експлуатації холодильних машин для одержання штучного холоду та інших процесів, в основу яких покладено ефект Джоуля-Томсона. Визначення параметрів потоку під час дроселювання повітря. Визначення інтегрального дросельного ефекту.

I. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Багато процесів хімічної технології, а саме деякі процеси абсорбції, кристалізації, розділення газів, сублимаційне сушіння, проводять за температур значно нижчих, від тих, які можна отримати використовуючи такі холодильні агенти як повітря, воду та лід. У процесах штучного охолодження, зниження температури холодильного агенту досягається за допомогою випаровування низькокиплячих рідин (холодильних агентів) та розширення попередньо стиснених їх парів.

Варто зазначити, що охолодження газів можна здійснити двома методами. Перший метод – **дроселювання газів або парів**, тобто, перепускання газів із області високих тисків в область низьких тисків. У випадку дроселювання розширення газів відбувається адіабатно без здійснення зовнішньої роботи (ізоентальпійний процес).

Другий метод – **розширення газів у детандері** (у машині, в якій виконується робота). Процес охолодження під час розширення газу в детандері здійснюється також адіабатно, але з виконанням зовнішньої роботи (ізоентропійний процес).

З практики відомо, коли на шляху потоку газу або рідини (рис. 1), які протікають трубопроводом чи каналом, поставити перегородку з невеликим отвором, яка зменшує їх переріз, то швидкість потоку різко зростає, а тиск падає. Далі за перегородкою швидкість знову зменшується і стає рівною як до перегородки ($\omega_2 = \omega_1$). Що стосується тиску, то внаслідок завихрень, мають місце втрати тиску і він не відновлюється.

Це пояснюється властивостями реальних газів, які на відміну від ідеальних не підпорядковуються рівнянню Клапейрона, тобто $P \cdot v \neq R \cdot T$. Для реального газу залежно від тиску та температури відношення $P \cdot v / R \cdot T$ не рівне одиниці і може бути більшим або меншим одиниці, що зумовлене наявністю сил взаємного притягання між молекулами газу, які сприяють його стисненню, а також наявністю об'єму самих молекул, що не дає змоги йому стискатись.

Реальні гази підпорядковуються рівнянню Ван-дер-Ваальса:

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right) \cdot (v - b) = R \cdot T, \quad (1)$$

де член $\left(\frac{a}{v^2}\right)$ – враховує вплив сил взаємодії між молекулами;

член $(v - b)$ – враховує наявність вільного об'єму, у якому молекули можуть вільно рухатись.

Істотною відмінністю реального газу від ідеального є те, що залежно від зовнішніх умов реальний газ може знаходитись в трьох агрегатних станах: твердому, рідкому та газоподібному. Явище зменшення тиску потоку внаслідок проходження його через перегородку без здійснення зовнішньої роботи називається **дроселюванням**.

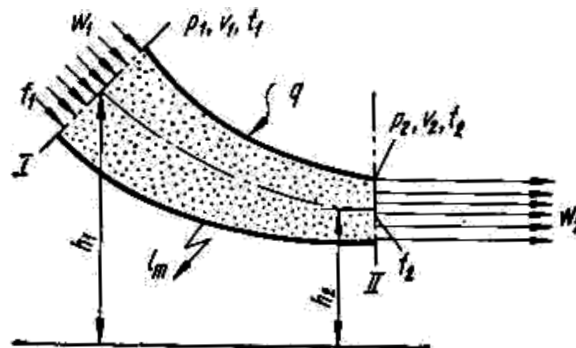


Рис. 1. Схема потоку через канал довільної форми

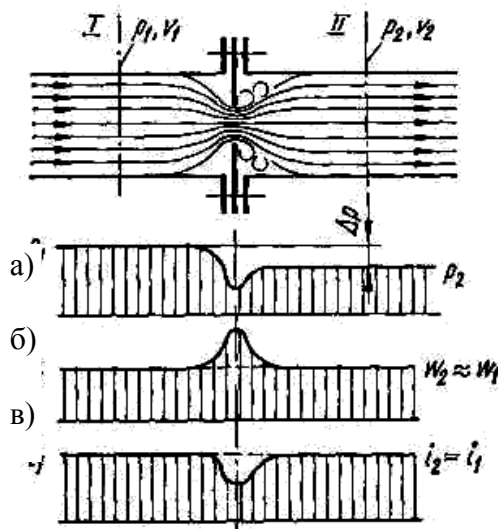


Рис. 2. Дроселювання газу за допомогою діафрагми:

а – зміна тиску; б – зміна швидкості ($\omega_1 = \omega_2$); в – зміна тепловмісту (ентальпії)

Щоб зрозуміти фізичну суть процесів, які відбуваються під час дроселювання потоку, розглянемо перший закон термодинаміки для потоку в самому загальному вигляді:

– перша форма:

$$q = u_2 - u_1 + l_p, \quad (2)$$

– друга форма:

$$q = i_2 - i_1 - \int_{p_1}^{p_2} v \cdot dp, \quad (3)$$

де u_2, u_1 – внутрішня енергія в січеннях II-II та I-I; i_2, i_1 – ентальпія газу, яка знаходиться за залежністю: $i = u + p \cdot v$; $\int_{p_1}^{p_2} v \cdot dp$ – наявна робота; l_p – робота

розширення газу, яка знаходиться як: $l_p = \int_{v_1}^{v_2} p \cdot dv$.

Для потоку газу термодинамічна робота газу, який рухається по трубопроводу (соплу), включає такі складові:

$$l_p = l_{\pi} + \frac{\Delta \omega^2}{2} + g \cdot \Delta h + l_T, \quad (4)$$

де l_{π} – робота, яку необхідно затратити на проштовхування газу через сопло, або робота проти сил тиску на вході і виході з сопла:

$$l_{\pi} = p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1.$$

Ця робота витрачається на подолання місцевого опору і перетворюється в тепло.

$\frac{\Delta \omega^2}{2}$ – робота, яка витрачається на зміну зовнішньої кінетичної енергії.

$$\frac{\Delta \omega^2}{2} = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2};$$

$g \cdot \Delta h$ – робота, яка витрачається на зміну зовнішньої потенційної енергії ($\Delta h = h_1 - h_2$);

l_T – робота проти сил реакції стінок лопаток робочого колеса або технічна робота.

Для адіабатного процесу тепло не підводиться і не відводиться ($q=0$) і згідно рівняння (2) маємо:

$$(u_2 - u_1) = (p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1), \quad (5)$$

або

$$u_1 + p_1 \cdot v_1 = u_2 + p_2 \cdot v_2. \quad (6)$$

Звідки

$$i_1 = i_2 \quad \text{де} \quad u + p \cdot v = i. \quad (7)$$

Рівняння (6) свідчить, що в адіабатному процесі робота здійснюється за рахунок внутрішньої енергії. Одночасно можна сформулювати важливий висновок, що внаслідок адіабатного процесу протікання газу по трубопроводу, в якому газ проходить через малий отвір діафрагми (рис. 2), значення ентальпії робочого тіла (газу) до місцевого опору і після нього однакове, хоча тиск за діафрагмою зменшується внаслідок втрати роботи на подолання місцевого опору.

Під час проходження газу або рідини через отвір діафрагми ентальпія газу може змінюватися, оскільки січення зменшується, а швидкість збільшується, що призводить до збільшення кінетичної енергії за рахунок зменшення ентальпії. Після дроселя січення збільшується до початкового значення.

Таким чином, рівняння першого закону термодинаміки для будь-якого потоку за відсутності тертя та за його наявності описується рівнянням (3). З врахуванням (4), рівняння (3) зводиться до виду:

$$q = i_2 - i_1 + \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2} + g \cdot (h_2 - h_1) + l_T. \quad (8)$$

Для випадку адіабатного процесу ($q=0$), горизонтального потоку $g \cdot (h_2 - h_1) = 0$, швидкість потоку можна прийняти $\omega_1 = \omega_2$, такий потік розглядаємо під час дроселювання за відсутності технічної роботи $l_T = 0$ ентальпія не змінюється і згідно рівняння (8) маємо:

$$i_2 = i_1. \quad (9)$$

Таким чином, властивості постійної ентальпії будь-якого оборотного і необоротного горизонтального потоку малої швидкості ($\omega_1 = \omega_2$) за відсутності технічної роботи ($l_T = 0$) справедливе рівняння (9), тобто процес дроселювання протікає при постійній ентальпії.

Розглянемо тепер аналогічний процес дроселювання за наявності тертя. Тоді рівняння (3) буде мати вигляд:

$$\frac{\Delta \omega^2}{2} = - \int_{p_1}^{p_2} v \cdot dp - l_{\text{тр}}. \quad (10)$$

$$\text{Для умов} \quad \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2} = 0 \quad l_{\text{тр}} = \int_{p_2}^{p_1} v \cdot dp \quad (11)$$

Як бачимо в процесі дроселювання відбувається падіння тиску ($dp < 0$) внаслідок затрати роботи $l_{тр} > 0$ на подолання сил тертя (рис. 2).

Якщо б тертя було відсутнє, тобто $l_p = 0$, то тиск вздовж потоку залишався б незмінним. Ентальпія цього адиабатного процесу є незмінною тому, що робота здійснюється потоком за рахунок внутрішньої енергії проти сил тертя ($l_{тр}$) і перетворюється в теплоту тертя $q_{тр}$, яка поглинається потоком. Це видно з рівняння (3), в якому величина q' представляє собою суму $q_{зовн}$ і теплоти тертя.

$$\text{Тому:} \quad q' = q_{зовн} + q_{тр},$$

і рівняння (3) набуває вигляду:

$$dq' = dq_{зовн} + dq_{тр} = di - v \cdot dp, \quad (12)$$

для адиабатного ізольованого потоку кількість підведеної теплоти рівна нулю ($dq_{зовн} = 0$), тому одержуємо:

$$dq_{тр} = di - v \cdot dp. \quad (13)$$

Оскільки теплота тертя еквівалентна роботі тертя ($dq_{тр} = -v \cdot dp$), то $di = 0$, і тому маємо:

$$i_2 = i_1$$

Проаналізуємо тепер вплив температури на процес дроселювання. Для ідеального газу згідно рівнянь про постійність ентальпії в процесі дроселювання отримаємо:

$$i_2 - i_1 = c_p \cdot (T_2 - T_1), \quad (14)$$

звідки

$$T_2 = T_1. \quad (15)$$

Тобто під час дроселювання ідеального газу температура газу не змінюється. Що стосується реального газу, то під час дроселювання газу його температура може збільшуватися, зменшуватися або залишатися без зміни. Явище зміни температури реальних газів під час дроселювання називають **ефектом Джоуля - Томсона**.

Використовуючи диференціальне рівняння, яке зв'язує ентальпію, тиск, ентропію та температуру реального газу можна одержати таку залежність, яка описується рівнянням Ван-дер-Ваальса:

$$\alpha_i = \left(\frac{dT}{dP} \right)_i = \frac{\left[\left(T \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right]}{c_p}. \quad (16)$$

Величину $\alpha_i = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{i=const}$ називають **диференційним дросельним**

ефектом або коефіцієнтом адіабатного дроселювання.

Зміну температури газу в процесі адіабатного дроселювання за значного перепаду тиску на дроселі називають **інтегральним дросельним ефектом**. Він розраховується згідно рівняння:

$$T_2 - T_1 = \int_{P_1}^{P_2} \alpha_i \cdot dp, \quad (17)$$

де T_1 та T_2 – температури газу до дроселя і за дроселем.

Дросельний ефект вважається додатнім, коли під час дроселювання газ охолоджується, і від'ємним, коли газ нагрівається.

Знак інтегрального дросельного ефекту (зменшення (-), збільшення (+)) залежить від співвідношення $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$ і $\frac{v}{T}$ правої частини рівняння (16).

$$\text{Якщо } \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p < \frac{v}{T}, \text{ то } \alpha_i < 0 \quad (18)$$

Оскільки $dp < 0$, то в процесі адіабатного дроселювання температура газу буде підвищуватись.

$$\text{Якщо } \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p > \frac{v}{T}, \text{ то } \alpha_i > 0, \quad (19)$$

тоді в процесі адіабатного дроселювання температура газу буде знижуватись.

$$\text{Якщо } \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{v}{T}, \text{ то } \alpha_i = 0, \quad (20)$$

тоді температура газу в даному випадку не змінюється, що справедливо для ідеального газу, який дроселюється без зміни температури.

Отже, ефект Джоуля - Томсона існує тільки для реальних газів і α_i може мати різні значення (-) або (+) в різних областях стану.

Такий стан газу, в якому $\alpha_i = 0$ називається **точкою інверсії**. Геометричне місце точок інверсії на діаграмі стану цього газу називають **кривою інверсії**.

Для прикладу, на рис. 3 показана крива інверсії азоту в P-T діаграмі. Згідно з цією діаграмою всередині області, обмеженої кривою інверсії, $\alpha_i > 0$, газ в процесі дроселювання буде охолоджуватись. За межами вище вказаної області

$\alpha_i < 0$ і температура газу під час дроселювання буде підвищуватись. Аналогічні криві інверсії можна одержати для інших речовин.

Як бачимо з рис 3, ізобари $P < P_{ін}$ двічі перетинають криву інверсії (точка **а** та **б**). Переміщаючись по ізобарі з області високих температур, де $\alpha_i < 0$ (нагрівання газу в процесі дроселювання), потрапляємо в область, де $\alpha_i > 0$ (охолодження газу в процесі дроселювання), а далі знову в область де $\alpha_i < 0$ (нагрівання газу в процесі дроселювання). За тисків $P > P_{ін}$ та за будь-якої температури – $\alpha_i < 0$ тому газ під час дроселювання нагрівається. Точку максимуму кривої інверсії називають **критичною точкою інверсії**.

Для Ван-дер-Ваальсівського газу параметри критичної точки такі:

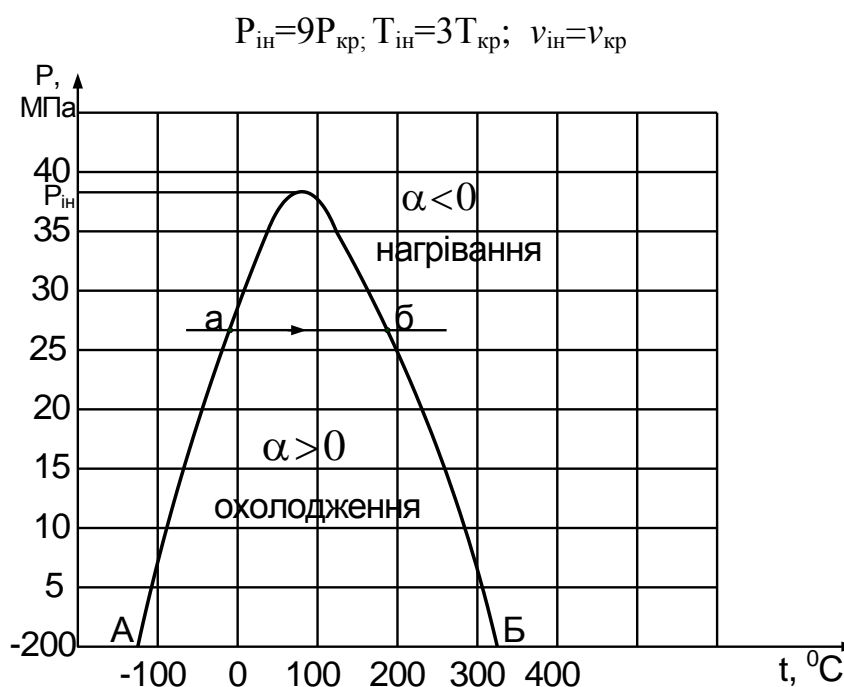


Рис. 3. Інверсійна крива для азоту

II. ОПИС УСТАНОВКИ

Установка (рис. 4) складається з компресора, який стискає повітря в чотирьох ступенях (I, II, III, IV) і подає його в ресивер V.

Тиск повітря в ресивері контролюється манометром 5. Газ із ресивера виходить в атмосферу через дросельний вентиль VIII. Температура газу до і після дросельного вентиля фіксується відповідними датчиками або термометрами, сигнал від яких поступає на електронний прилад 7, який показує значення температур T_1 та T_2 , або візуально за показами термометра.

Тиск здросельованого повітря вимірюється манометром 6.

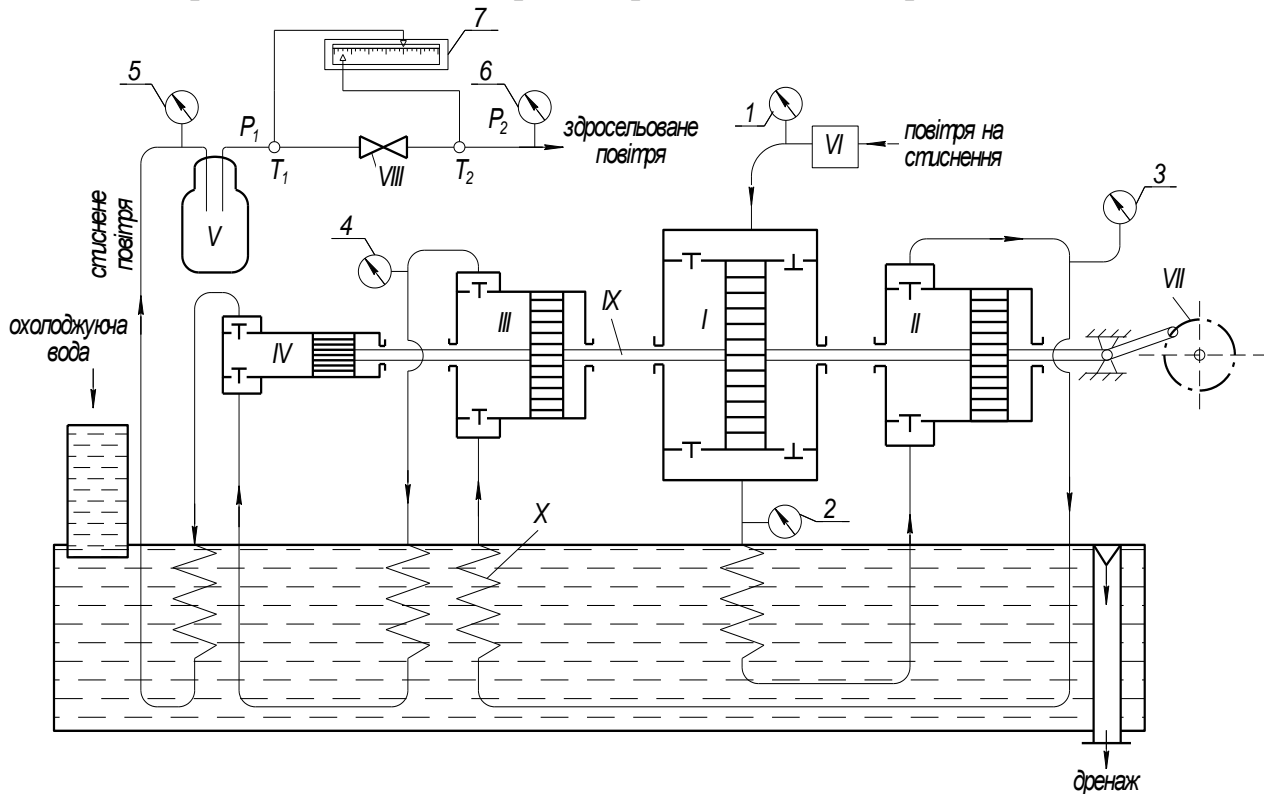


Рис. 4. Схема експериментальної установки: I, II, III, IV – ступені компресора; V – ресивер; VI – лічильник об’єму повітря; VII – кривошипно-шатунний механізм компресора; VIII – дросель; IX – шток компресора; X – змійовики для охолодження повітря; 1, 2, 3, 4, 5, 6 – манометри; 7 – потенціометр для визначення температури повітря після дроселювання, 8 – ручка потенціометра, ручку переключення ставлять в положення 5.

III. ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ДРОСЕЛЬНОГО ЕФЕКТУ

Покажем для прикладу, що визначення величини інтегрального дросельного ефекту зручно з допомогою $i - T$ діаграми дросельованого газу (рис. 5). Якщо відомий стан газу перед дроселем (тиск P_1 та температура T_1), то відомим є тиск газу за дроселем P_2 . Знайшовши точку з вказаними параметрами на діаграмі (точка 1) і знайшовши точку перетину ізоентальпи $i = \text{const}$ з ізобарою $P_2 = \text{const}$ (точка 2), отримаємо температуру T_2 за дроселем.

Зауважимо, що на рис. 5 ізоентальпія 1-2 не є лінією процесу адиабатного дроселювання (адиабатою), оскільки в діаграмах стану відображаються тільки оборотні процеси. Ізоентальпа 1-2 є лінією оборотного процесу, який здійснюється між станами газу, який здійснюється в необоротних процесах.

Нагадаємо, що інтегральний дросельний ефект характеризується зміною температури газу при відсутності підводу чи відводу тепла до газу ($i_1 = i_2$). Однак ізоентальпійний ефект розширення газу при дроселюванні може кількісно

виражатись в одиницях енергії як різниця ентальпій стисненого та розширеного газу при однаковій початковій температурі газу T_1 (перед дроселюванням), оскільки ця різниця ентальпій визначає кількість тепла, яке необхідно підвести до газу для того, щоб нагріти його до температури перед дроселюванням. Такий дросельний ефект одержав назву ізотермічного дросельного ефекту. Для його визначення також можна використати діаграму T-S для повітря (рис.6). Покажемо процес дроселювання в робочій діаграмі T-S, наведений на рис.7, яка виконана в наглядному масштабі. На ізобарі P_1 , яка відповідає тиску після процесу стиснення в компресорі, наприклад 10 МПа, і температурі $T_1=205\text{K}$ (точка 1) здійснюється процес дроселювання ($i_2=i_1$). Оскільки процес дроселювання здійснюється при постійній ентальпії, то опускаючись з точки 1, що відповідає значенню ентальпії $i_1=const$ до атмосферного тиску P_2 , що відповідає температурі $T_2=150\text{K}$ і ентальпії $i_1=16,8$ кДж/кг в точці 2. Таким чином дросельний ефект складає $\Delta T=T_1-T_2=55\text{K}$. Для визначення ізотермічного дросельного ефекту по ізобарі P_1 з точки 2, що відповідає температурі $T_2=150\text{K}$ піднімаємось в точку 3, яка лежить на ізотермі T_1 . В точці 3 ентальпія газу $i_3=4,19 \cdot 10^5$ Дж/кг. Таким чином ізотермічний дросельний ефект визначається як різниця ентальпій в точці 3 і 1, тобто $\Delta i=i_1-i_3=-10,6-4,19 \cdot 10^5$ Дж/кг

За відсутності потенціометра температуру досліджуваного газу після дроселювання T_2 визначають за температурою оточуючого середовища.

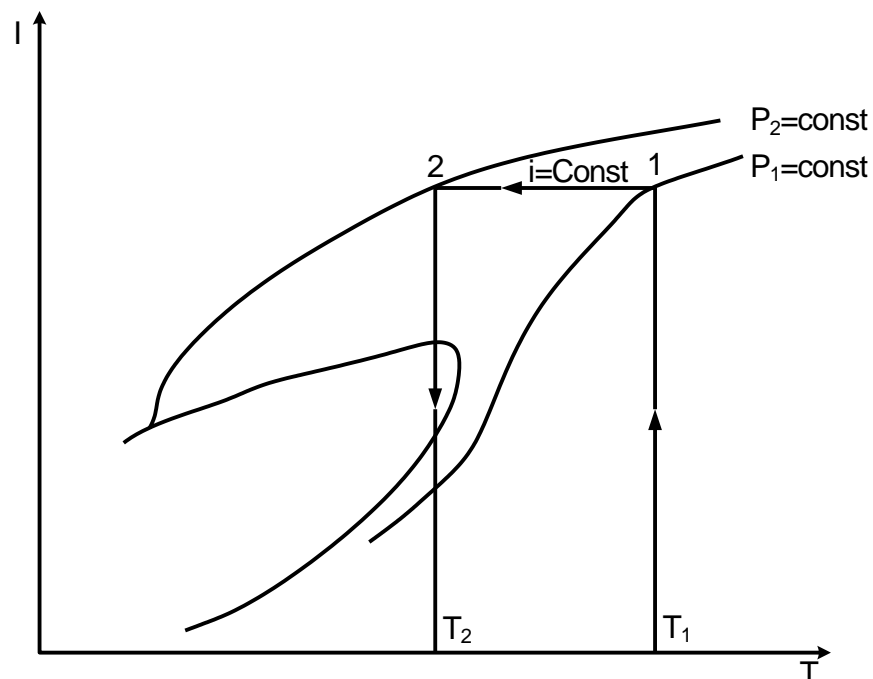


Рис. 5. Діаграма залежності тиску від температури для азоту

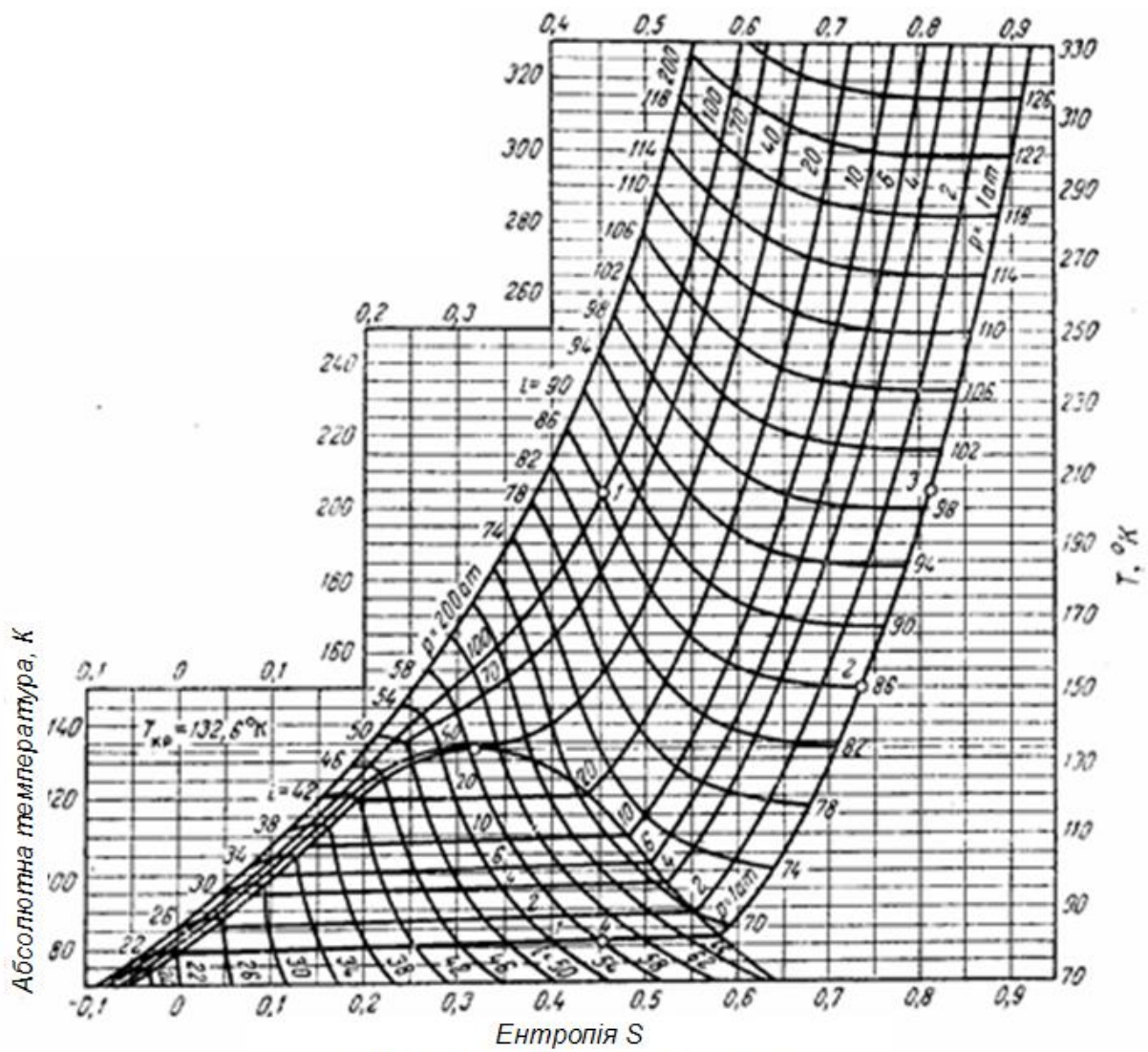


Рис.6. Діаграма T-S для повітря

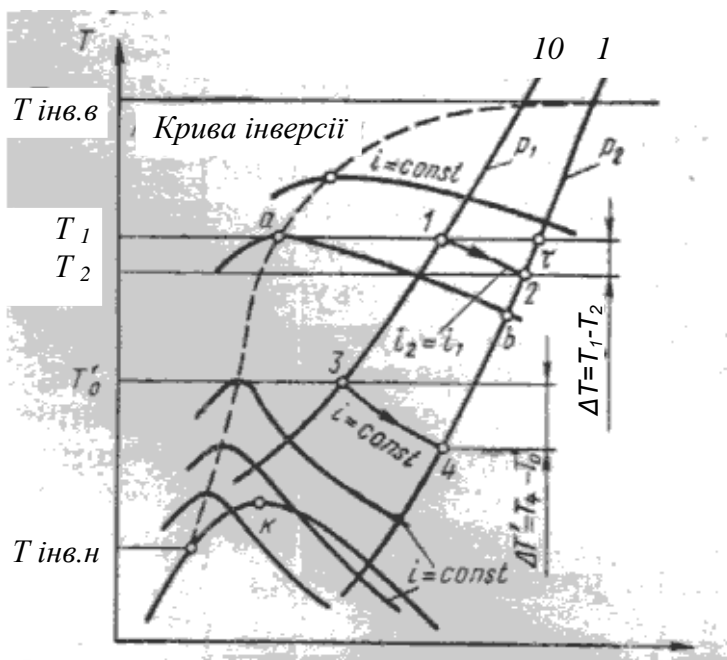


Рис. 7. Процес дреселювання в діаграмі T-S.

IV. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Подають воду у проміжний холодильник газу компресора.
2. Включають електропривід компресора.
3. За досягнення тиску повітря в ресивері близько 4 МПа (40 кгс/см²) виключають привід компресора.
4. Заміряють температуру газу на вході в дросельний вентиль T_1 та тиск в ресивері P_1 , їх значення заносять у табл. 1.
5. Миттєво відкривають дросельний вентиль (1-2 витки) та за фіксованих значеннях тиску P_1 визначають температуру газу на виході із дроселя $T_{2\text{експ}}$. Тиск навколишнього середовища P_2 визначають за показами барометра. Значення величин заносять у табл.1.
6. За допомогою i - T діаграми (рис. 5) (або T - S діаграми для повітря), маючи початкові параметри газу T_1 , P_1 та тиск P_2 , визначають температуру газу на виході із дроселя $T_{2\text{теор}}$ і заносять у табл. 1.
7. Визначають величини змін тиску ΔP та температури $\Delta T_{\text{експ}} = T_1 - T_{\text{експ}}$, $\Delta T_{\text{теор}} = T_1 - T_{\text{теор}}$ під час дроселювання повітря (ΔP , ΔT). Значення ΔP , $\Delta T_{\text{експ}}$ та $\Delta T_{\text{теор}}$ заносять у табл. 1.
8. Порівнюють експериментальні значення величини інтегрального дросельного ефекту та теоретичні, визначені за i - T діаграмою (рис. 5), або за T - S діаграмою для повітря.

Таблиця 1

Експериментальні значення для визначення величини інтегрального дросельного ефекту

T_1 , К	P_1 , МПа	$T_{2\text{експ}}$, К	P_2 , МПа	$T_{2\text{теор}}$, К	$\Delta T_{\text{експ}}$, К	$\Delta T_{\text{теор}}$, К	ΔP , МПа	$\frac{\Delta T_{\text{експ}}}{\Delta T_{\text{теор}}}$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ:

1. За допомогою яких методів можна досягнути глибокого охолодження газів?
2. Що називають диференційним та інтегральним дросельними ефектами? Чи можна їх величини визначити теоретично?
3. Коли дросельний ефект вважається додатнім, а коли від'ємним?
4. Від співвідношення яких величин залежить знак інтегрального дросельного ефекту (зменшення (-), збільшення (+))?
5. Як визначити величину інтегрального дросельного ефекту з допомогою i -T діаграми (або T-S діаграми для повітря)?
6. Чому процес дроселювання газу не є адіабатним, хоча ентальпія є не змінною $i_1=i_2$. Чому для ідеальних газів $T_1=T_2$, для реальних газів $T_1 \neq T_2$

ЛІТЕРАТУРА

1. Семенишин Є.М., Мальований М.С. Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів: навч. посібник / Видавництво Львівської політехніки, Львів.: 2005. – 407 с.
2. Сухий М.П., Карпенко О.О. Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів: навч. посібник / Український держ. хіміко-технологічний ун-т. – Д.: УДХТУ, 2006. — 202с.
3. Колієнко А.Г. Термодинаміка. – Львів, 2006. – 128 с.
4. Чепурний М.М., Ткаченко С.Й. Основи технічної термодинаміки. Вінниця, – „Поділля-2000”. – 2004. – 352с.
5. Константанів С.М. Технічна термодинаміка. – К.: Політехніка, 2001. – 368с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

**ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ДРОСЕЛЬНОГО ЕФЕКТУ
В ПРОЦЕСІ ДРОСЕЛЮВАННЯ ПОВІТРЯ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для самостійної підготовки до лабораторної роботи №4
з курсу «Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів» для студентів
базового напрямку 6.051301 «Хімічна технологія», 6.051302 «Хімічна
інженерія» та з курсу «Енергозбереження в хімічних технологіях» для
студентів базового напрямку 6.050503 «Машинобудування»

Укладачі

Семенишин Є.М., д-р техн. наук, проф.,
Троцький В.І., канд. техн. наук, доц.,
Кіндзера Д.П., канд. техн. наук, доц.,
Римар Т.І. канд. техн. наук, ст. викл.