

МІНІСТЕРСТВО НАУКИ ТА ОСВІТИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

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

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи №6
з курсу "Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів"
для студентів IV курсу
хіміко-технологічних спеціальностей

*Затверджено
на засіданні кафедри хімічної інженерії
Протокол № 1 від 29.08.2012 р.*

ЛЬВІВ – 2012

Визначення інтегрального дросельного ефекту в процесі дроселювання повітря: Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи №6 з курсу "Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів" для студентів IV курсу хіміко-технологічних спеціальностей /Укл.: Є.М. Семенишин., В.І. Троцький. - Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2012. – 11 с.

Укладачі	Семенишин Є.М., д-р техн. наук, проф., Троцький В.І., канд. техн. наук, доц.
Відповідальний за випуск	Атаманюк В.М., д-р. техн. наук, проф.
Рецензент	Мальований М.С., д-р. техн. наук, проф.

I. МЕТА РОБОТИ

1. Метою роботи є вивчення закономірностей процесу дроселювання, який широко застосовується в хімічній та інших галузях промисловості при 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 дросель - ефекту.

II. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Багато процесів хімічної технології, а саме деякі процеси абсорбції, кристалізації, розділення газів, сублімаційне сушіння, проводять при температурах 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 низько киплячих рідин та розширення попередньо стиснених парів.

Слід зазначити, що охолодження газів можна здійснити двома методами. Перший метод – **дроселювання газів або парів**, тобто, перепускання газів із області з високим тиском в область з низьким тиском. У випадку дроселювання розширення газів відбувається адіабатично без здійснення зовнішньої роботи – ізентальпійний процес.

Другий метод – **розширення газів у детандері**. Процес охолодження при розширенні газу в детандері відбувається також адіабатично, але з виконанням зовнішньої роботи – ізентропійний і відноситься до оборотних процесів..

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 зростає і стає рівною як до перегородки ($w_2 = w_1$). Що стосується тиску, то внаслідок завихрень, мають місце втрати і тиск не відновлюється.

Це пояснюється властивостями реальних газів, які на відміну від ідеальних не підпорядковуються рівнянню Клапейрона, тобто $Pv \neq RT$. Для реального газу залежно від тиску та температури відношення Pv/RT не рівне одиниці і може бути більшим або меншим від одиниці. Це пояснюється наявністю сил взаємного притягання між молекулами газу, які сприяють його стисненню, а наявність об'єму самих молекул не дає змоги йому стискатись. Істотною відмінністю реального газу від ідеального є те, що, в залежності від

зовнішніх умов, реальний газ може знаходитись в трьох агрегатних станах – твердому, рідкому та газоподібному. Явище зменшення тиску потоку в результаті проходження його через перегородку без здійснення зовнішньої роботи називається **дроселюванням**.

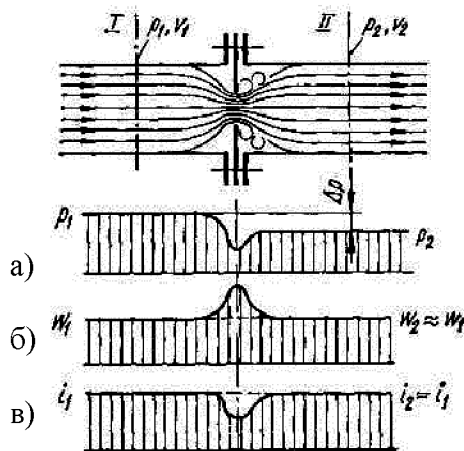


Рис. 1. Дроселювання газу за допомогою діафрагми
а – зміна тиску; б - зміна швидкості ($w_1 = w_2$); в – зміна тепловмісту (ентальпії)

Згідно першого закону термодинаміки для потоку

$$q = \Delta u + l \quad (1)$$

де q – кількість підведеного тепла; Δu - зміна внутрішньої енергії; l - робота ($l = l_p + l_w + l_n + l_m$); l_p - робота перештовхування; l_w - робота, яка витрачається на зміну кінетичної енергії, l_n - робота, яка витрачається на зміну потенціальної енергії; l_m - технічна робота.

При відсутності теплообміну ($q=0$), якщо потік не здійснює роботи ($l_m=0$) для горизонтального трубопроводу ($l_n=0$) перший закон термодинаміки буде мати такий вид

$$0 = (i_2 - i_1) + \left(\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} \right) \quad (2)$$

приймаючи до уваги, що $u + pv = i$, тоді

$$i_1 + \frac{w_1^2}{2} = i_2 + \frac{w_2^2}{2} \quad (3)$$

де i_1 і i_2 - значення ентальпії в перерізах I-I і II-II.

Оскільки $w_1 = w_2$, то

$$i_1 = i_2 \quad (4)$$

Тобто для ідеального газу ентальпія газу не змінюється, як не змінюється температура ($t_1 = t_2$), оскільки $i_1 - i_2 = c_p(t_2 - t_1)$

При дроселюванні реальних газів їх температура може збільшуватися, зменшуватися або залишатися без зміни. Явище зміни температури реальних газів при дроселюванні називають ефектом Джоуля - Томсона.

В процесі адіабатичного дроселювання тепло не підводиться і не відводиться, тобто, процес відбувається при постійній ентропії $dS=0$. У процесі адіабатичного дроселювання газ здійснює роботу, яка витрачається на подолання місцевого опору і яка перетворюється в тепло. Ця робота здійснюється за рахунок зменшення внутрішньої енергії, оскільки для адіабатичного процесу $q=0$

$$\ell = P_2 v_2 - P_1 v_1 = u_2 - u_1 \quad (5)$$

цю роботу ще називають роботою проштовхування,

ℓ – питома робота, Дж/кг газу; P_1, P_2 – тиски газу до і після перегородки Н/м²; v_1 та v_2 – питомі об'єми газу, м³/кг; u_1 та u_2 – питома внутрішня енергія газу, відповідно, до і після перегородки.

Оскільки, $u_1 + P_1 v = u_2 + P_2 v$, то

$$i_1 = i_2 = const \quad (6)$$

Рівняння (6) показує, що в результаті адіабатичного дроселювання ентальпія газу не змінюється, тобто процес відбувається ізоентальпійно.

Ентальпія адіабатичного потоку зберігається постійною тому, що робота, яку здійснює газ (за рахунок його внутрішньої енергії) перетворюється в теплоту тертя q_{mp} , яка засвоюється потоком

Таким чином, постійність ентальпії є властивістю як оборотного так і не оборотного горизонтального адіабатного потоку малої швидкості при відсутності технічної роботи

Вплив температури на процес дроселювання визначається рівнянням:

$$\alpha_i = \left(\frac{dT}{dP} \right)_i = \frac{\left[\left(T \frac{\partial v}{\partial T} \right)_P - v \right]}{C_P} \quad (7)$$

Величину $\alpha_i = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_{i=const}$ називають **диференціальним дросель – ефектом**

або коефіцієнтом адіабатного дроселювання..

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

$$T_2 - T_1 = \int_{P_1}^{P_2} \alpha_i dP \quad (8)$$

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

Дросельний ефект вважається додатним, коли під час дроселювання газ охолоджується, і від’ємним, коли газ нагрівається.

Знак інтегрального дросель ефекту (зменшення (-), збільшення (+)) залежить від співвідношення $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_i$ і $\frac{v}{T}$ правої частини рівняння (7).

$$\text{Якщо } \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_i < \frac{v}{T}, \text{ то } \alpha_i < 0 \quad (6)$$

І тоді в процесі адіабатного дроселювання температура дроселювання підвищується.

$$\text{Якщо } \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_i > \frac{v}{T} \text{ то } \alpha_i > 0 \quad (7)$$

І тоді в процесі адіабатного дроселювання температура газу понижується.

$$\text{Якщо } \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_i = \frac{v}{T} \text{ то } \alpha_i = 0 \quad (8)$$

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. 2 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 буде підвищуватись під час дроселювання. Аналогічні криві інверсії можна одержати для інших речовин.

Як бачимо з рисунку 2, ізобари $P < P_{\text{ін}}$ 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). При тисках $P > P_{\text{ін}}$ при будь якій температурі $\alpha_i < 0$. Точку максимуму кривої інверсії називають критичною точкою інверсії.

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

$$P_{\text{ін}} = 9P_{\text{кр}}, T_{\text{ін}} = 3T_{\text{кр}}, v_{\text{ін}} = v_{\text{кр}}$$

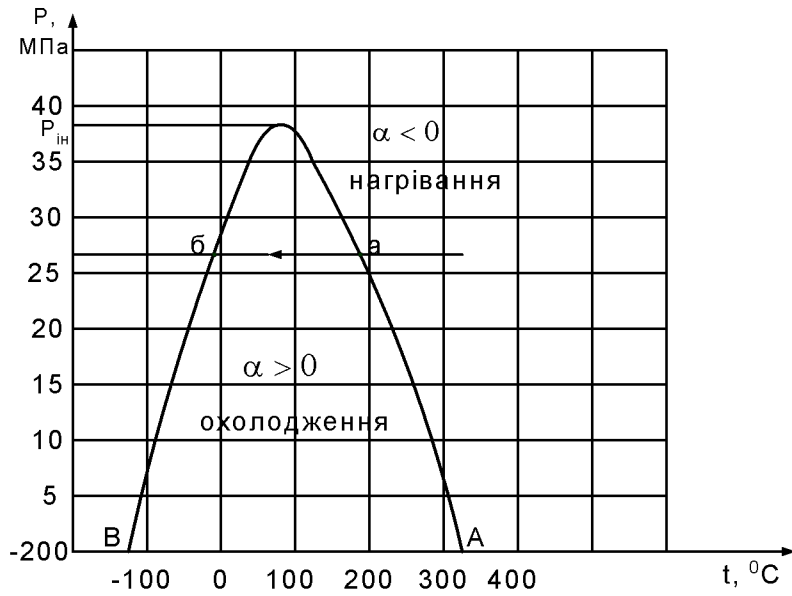


Рис. 2. Інверсійна крива для азоту

III. ОПИС УСТАНОВКИ

Установка (рис. 3) складається з компресора 1, який стискає повітря і подає його в ресивер 2. Тиск повітря в ресивері контролюється манометром 3. Газ із ресивера виходить в атмосферу через дросельний вентиль 4. Температура газу до і після дросельного вентиля фіксується відповідними датчиками 5 та 6, сигнал від яких поступає на електронний прилад 7, який показує значення температур T_1 та T_2 .

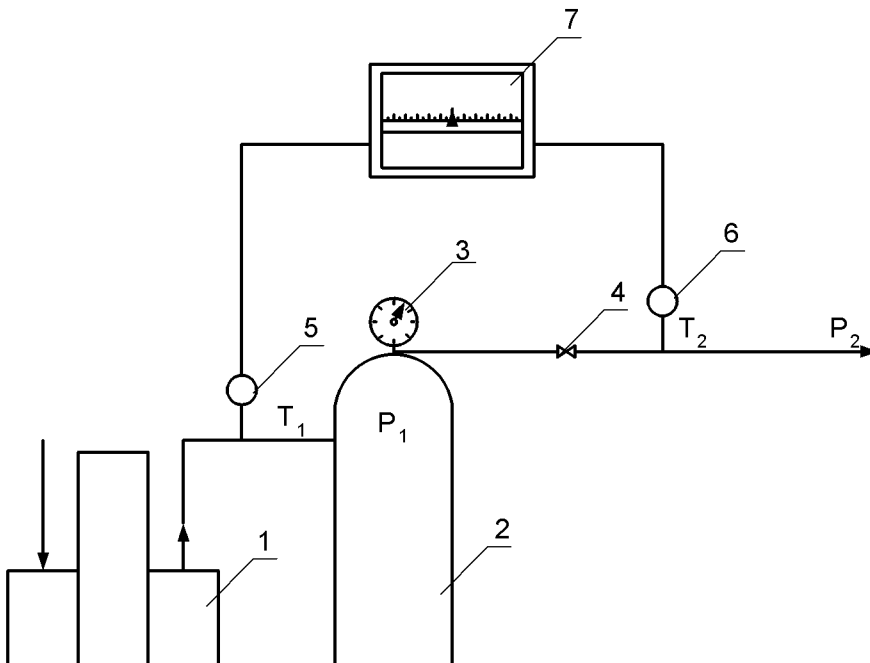


Рис. 3. Схема експериментальної установки

1 – багатоступеневий компресор; 2 – ресивер; 3 – манометр; 4 – дросельний вентиль; 5, 6 – датчики температури; 7 – потенціометр.

IV. ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНОГО ДРОСЕЛЬНОГО ЕФЕКТУ

Визначення величини інтегрального дросельного ефекту зручно виконувати з допомогою i - T діаграми дросельованої речовини (рис. 4). Якщо відомий стан газу перед дроселем, тобто 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.

Необхідно відмітити, що на рис. 4 ізоентальпа 1-2 не є лінією процесу адиабатного дроселювання (адіабатою), оскільки в діаграмах стану відображаються тільки оборотні процеси.

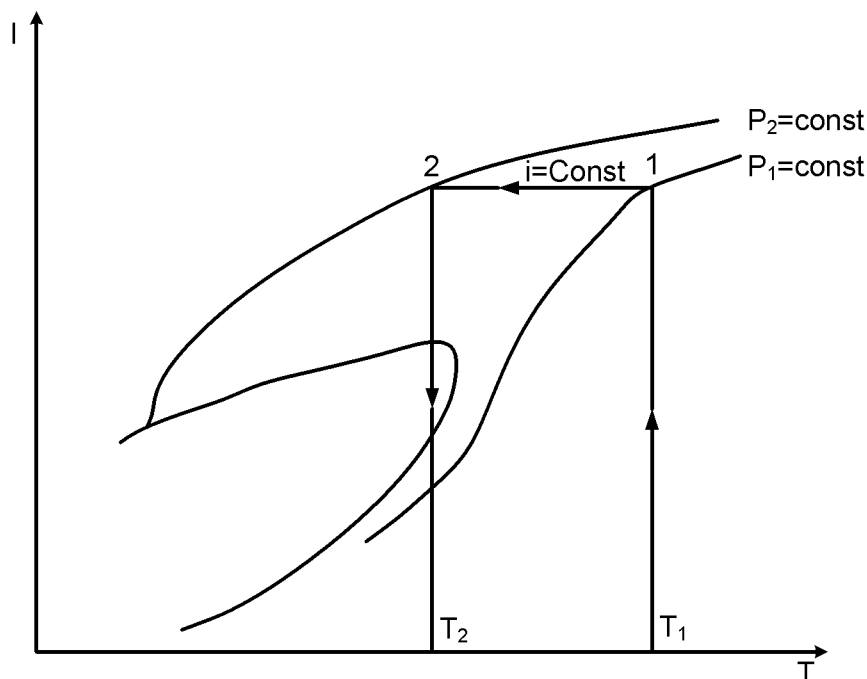


Рис. 4. Схема визначення величини інтегрального дросельного ефекту на i - T діаграмі.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Подають воду у проміжний холодильник газу компресора.
2. Включають електропровід робочого колеса компресора.
3. При досягненні тиску повітря в ресивері близько 4 МПа (40 кгс/см²) виключають привід компресора.
4. Заміряють температуру газу на вході в дросельний вентиль T_1 (температуру навколишнього середовища) та тиск в ресивері P_1 , їх значення заносять у таблицю.

5. Відкривають дросельний вентиль (1-2 витки) та при 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 таблицю.

6. За допомогою i - T діаграми (рис.4) (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 таблицю.

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 ($\Delta P, \Delta T$). Значення $\Delta P, \Delta T_{\text{експ}}$ та $\Delta T_{\text{теор}}$ заносять у таблицю.

8. Порівнюють експериментальні значення величини інтегрального дросельного ефекту та теоретичні, визначені по i - T діаграмі (рис.4), або за T - S діаграмою для повітря.

9. Знаходять співвідношення $\frac{\Delta T_{\text{експ}}}{\Delta T_{\text{теор}}}$ та будують графік у координатах

$\frac{\Delta T_{\text{експ}}}{\Delta T_{\text{теор}}} = f(\Delta P)$ (рис. 4) та визначають відносний інтегральний дросельний ефект

$\frac{\Delta T_{\text{експ}}}{\Delta T_{\text{теор}}}$ для кожної фіксованої точки стану газу.

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	$\frac{\Delta T_{\text{експ}}}{\Delta T_{\text{теор}}}$

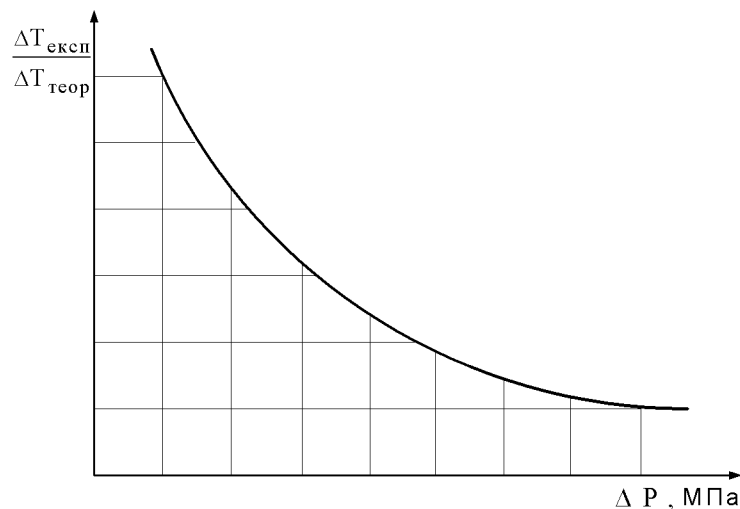


Рис. 5. Залежність відносного інтегрального дросельного ефекту від різниці тисків

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 дросель 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 являється адіабатним, хоча ентальпія є не змінною $i_1=i_2$. Для ідеальних газів $T_1=T_2$, для реальних газів $T_1 \neq T_2$

ЛІТЕРАТУРА

1. Кириллин В.А. и др. «Техническая термодинамика». – М.: «Наука», 1979, -512 с.
2. Архаров А.М. и др. «Криогенные системы: основы теории и расчета». – М.: Машиностроение, 1988, - 164 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

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

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи №6
з курсу "Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів"
для студентів IV курсу
хіміко-технологічних спеціальностей

Укладачі

Семенишин Євген Михайлович
Троцький Володимир Іванович

Редактор

Комп'ютерне верстання