

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ЗРІДЖЕННЯ ТА ЗАМОРОЖУВАННЯ ГАЗІВ

$T - S$ діаграма процесів переведення газу в рідкий та твердий стани зображена на рисунку 1. Початковий стан газу в т. 1 – $P_{нс}$ і $T_{нс}$. Розглянемо випадки, коли $T_{нс} > T_{кр}$, оскільки при $T_{нс} < T_{кр}$ рідкий стан газу може бути досягнуто лише ізотермічним стисканням без використання інших процесів. Якщо охолоджувати газ від т. 1 при $P_{нс} = \text{const}$, то температура його буде знижуватися до т. 2, а потім у процесі (2 – 3) відведення теплоти буде супроводжуватися зменшенням ступені сухості до тих пір, поки весь газ не перейде в рідкий стан. Тобто газ буде переведено в рідкий стан при тому ж значенні $P_{нс}$. Кількість теплоти, що при цьому необхідно відвести $q_{зр} = h_1 - h_2$, а мінімальна робота для зворотного проведення цього процесу дорівнюватиме різниці ексергій в кінцевому та початковому станах $l_{зр} = e_3 - e_1$.

Для отримання твердої речовини відведення теплоти необхідно продовжити. При подальшому відведенні теплоти речовина при $T = T_4 = \text{const}$ перейде спочатку в рідкий, а потім в твердий стан т. 5.

Кількість теплоти, що відводиться при цьому, буде більше $q_{зр}$ і дорівнюватиме $q_{замор} = h_1 - h_5$, а мінімальна робота $l_{замор} = e_5 - e_1 > l_{зр}$.

Переведення газу в рідкий і твердий стани може бути здійснено і при $P > P_{нс}$, для чого потрібно стиснути газ до відповідного тиску при $T_{нс}$. Якщо $P < P_{кр}$, то процес протікатиме аналогічно з тією різницею, що конденсація проходитиме при більш високій температурі, а питома теплота пароутворення r зменшиться, поки при $P = P_{кр}$ не стане рівною 0.

При надкритичному тиску $P > P_{кр}$ газ переходить в рідкий стан також при $T = T_{кр}$ (т. 7), але без поступової конденсації. Подальший перехід у рідкий та твердий стани (7 – 8 – 9) відбувається так само, як і при інших тисках. Частина теплоти, що відводиться при $T = T_{нс}$, залежно від тиску, може змінюватися від 0 до 1.

Таким чином, процес зрідження та заморожування газу може бути проведений трьома способами:

1. Відведенням теплоти при $P_{нс} = \text{const}$ і температурах, що змінюються від $T_{нс}$ до температури фазових переходів.

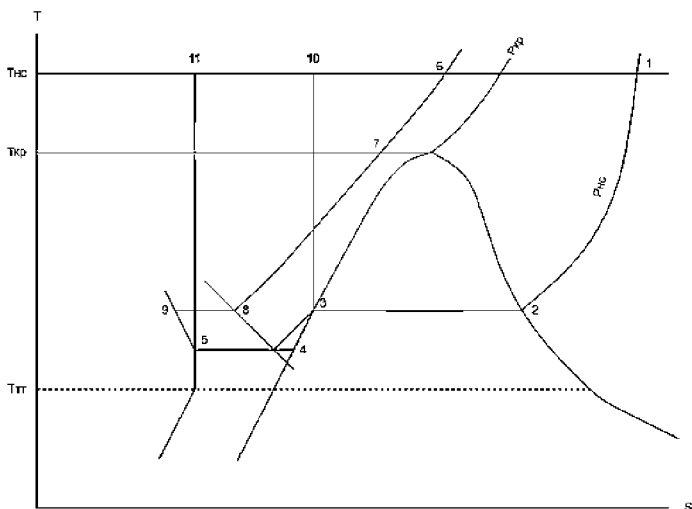


Рисунок 1 – $T-S$ діаграма процесів зрідження та заморожування газів

В таблиці 1 наведено значення мінімальної роботи та теплоти процесів зрідження та заморожування деяких кріоагентів при $P_{нс} = 0,1$ МПа; $T_{нс} = 293$ К, в кДж/кг.

Таблиця 1 – Робота та теплота процесів зрідження та заморожування

Кріоагент	Зрідження		Заморожування	
	$l_{зр}$	$q_{зр}$	$l_{замор}$	$q_{замор}$
Аргон	462,5	270,0	547,2	302,5
Азот	740,5	421,0	1121,0	470,0
Водень	15 500,0	3860,0	18800,0	4000,0
Повітря	710,0	421,0	-----	-----
Гелій	6633,0	1527,0	-----	-----
Метан	1050,0	900,0	1320,0	1030,0
Неон	1572,0	361,0	1812,0	383,0
СО	733,0	220,0	1538,0	658,0
СО ₂	363,0	208,0	656,0	309,0
Кисень	615,0	398,0	861,0	476,0

2. Відведенням всієї теплоти при $T_{нс}$ в процесі ізотермічного стиснення з подальшим ізобарним охолодженням при температурах, що знижуються.

3. Відведенням всієї теплоти при $T_{нс}$ з подальшим адіабатним розширенням до кінцевого тиску $P = P_{кр}$.

Третій спосіб не знайшов застосування, оскільки для його здійснення газ необхідно стискати до тиску в десятки і сотні МПа.

У всіх трьох випадках при зворотному проведенні процесів, сумарна робота повинна бути однаковою за однакових початкових і кінцевих параметрах і дорівнювати різниці ексергій $l_{min} = e_{kin} - e_{поч}$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Двойнос Я.Г. Процеси глибокого охолодження: теорія і практичні завдання: навч.посіб [Текст] / Я.Г. Двойнос. Київ: КПІ, 2019. – 67с.
2. Масліков М.М. Кріогенна техніка і технологія: навч.посіб. [Текст] / М.М. Масліков. Київ: НУХТ, 2010. – 98 с.