

---

---

## НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНІ РОЗРОБКИ

---

---

УДК [621.1.016+536.2](075.8)+536.7

Г.О. Сіренко, Л.В. Базюк, Я.І. Артус

### Тепло- і масообмін у хемічній технології. Лекція. «Теплові та холодникові устави: II. Холодникові устави»

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76025, Україна*

Спеціальний курс лекцій «Тепло- і масообмін у хемічній технології», розроблений на основі більшого за обсягом курсу «Технічна термодинаміка та теплопередача», є однією з базових дисциплін у хемічній технології і займає проміжне місце між хемічною і технічною термодинамікою та процесами і апаратами хемічної технології. Спеціальний курс лекцій адресується студентам спеціальності «Хемія» університетів класичного типу і буде корисний викладачам, які читають курс лекцій «Процеси і апарати хемічної технології», та науковцям, які досліджують теплофізичні властивості газів, рідин і твердих тіл. Літ. джерел 26.

Друкується за рішенням кафедри неорганічної та фізичної хемії (протокол № 7 від 2 березня 2011 року).

**Ключові слова:** холодникові устави, холодоагент, холодниковий коефіцієнт, наднизьке охолодження, адсорбційна устава, пароежекторна устава.

*Методична розробка постуила до редакції 11.03.2011; прийнята до друку 20.04.2011.*

## Розділ I

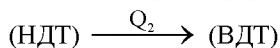
### II. Цикли холодникових устав

#### 2.1. Загальні положення.

##### Трансформатори (перетворювачі) тепла.

- Устави, у яких здійснюються перенесення енергії у формі тепла від джерел з низькою температурою  $T_{\min}$  (НДТ) до джерел з високою температурою  $T_{\max}$  (ВДТ) називають **устанами підвищення потенціалу тепла**.

- Процес перенесення енергії у формі тепла:



несамочинний і вимагає компенсаційного самочинного процесу – виконання роботи у зворотньому циклі:

$$Q_0 \xleftarrow{\Delta T} L_0$$

при наявності різниці температур  $\Delta T$  між  $T_1=T_{\max}$  та  $T_2=T_{\min}$ .

- Підвищення потенціалу тепла можливе при витраті енергії у будь-якій формі:

- 1) механічній;
- 2) електричній;
- 3) хемічній;
- 4) потоку газу або пари тощо.

- Схеми циклів трансформаторів тепла показано на рис. 1:

- 1) тепла помпа;
- 2) холодильник;
- 3) комбінований цикл.

На рис. 1 позначено:

I – компресор (машина для стискання пари);  
II – конденсатор;  
III – детандер (машина для розширення пари);  
IV – випаровувач.

Температури:

$T_1$  – ВДТ;

$T_2$  – НДТ;

$T_{\text{о.с.}}$  – основного стану.

**Ідеальний цикл Карно парового трансформатора тепла** (зворотній цикл) у T-S-координатах зображено на рис. 2. На рис. 2 позначено:

$Q_2$  – кількість енергії у формі тепла, що відбирається від холодоагенту у випаровувач IV ( $Q_2$  – холодовиробність);

$Q_1$  – кількість енергії у формі тепла, що відводиться в конденсаторі II;

aK – насичений (р) холодоагент у стані кипіння при певному тиску;

Ka' – суха насичена пара холодоагенту;

$Q_0 = Q_1 - Q_2$  – кількість енергії у формі тепла, що отримують у циклі.

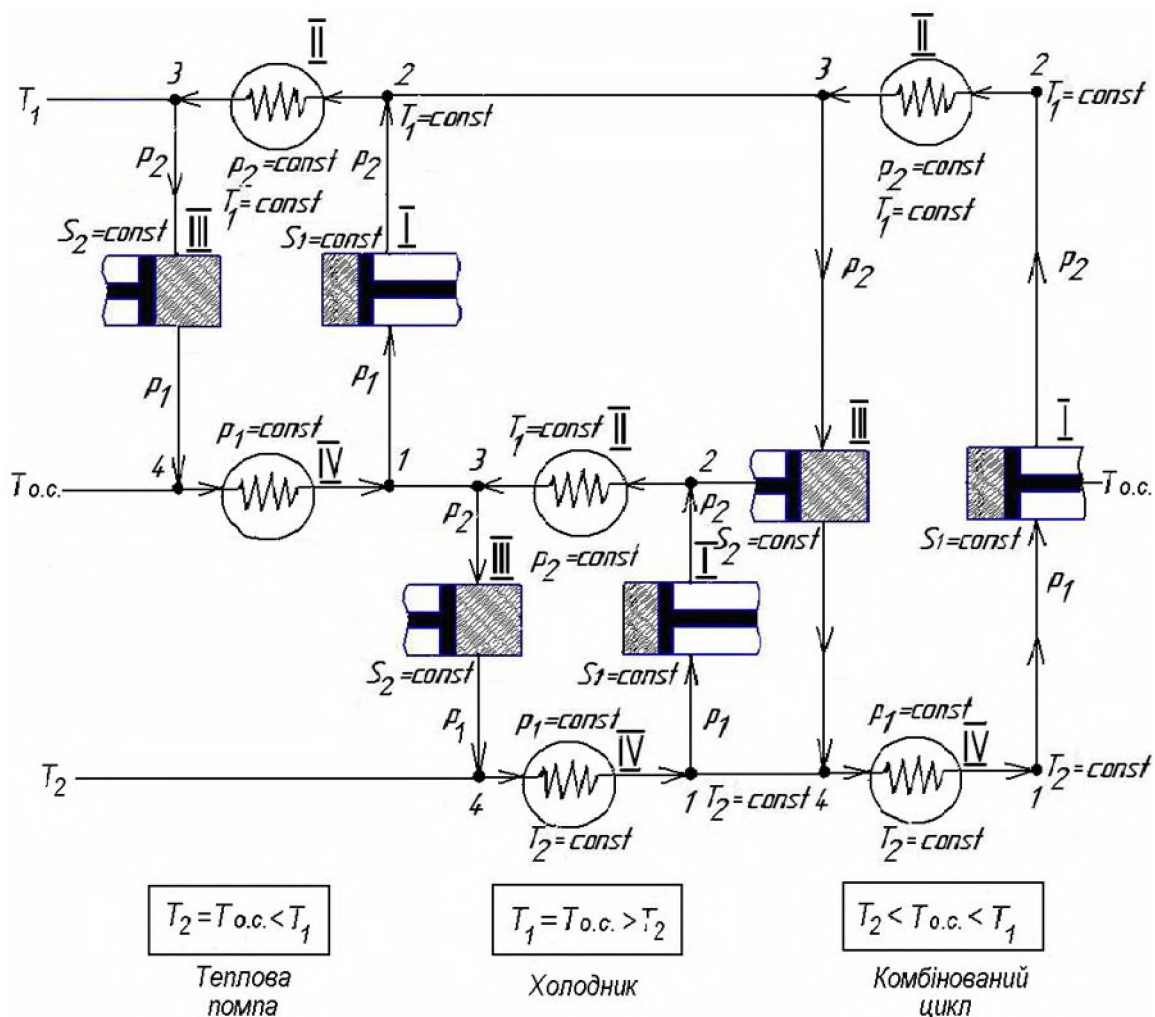


Рис. 1. Схеми трансформаторів тепла: I – компресор; II – конденсатор; III – детандер; IV – випаровувач;  $T_1$  – температура верхнього джерела тепла;  $T_2$  – температура нижнього джерела тепла;  $T_{o.c.}$  – температура основного стану.

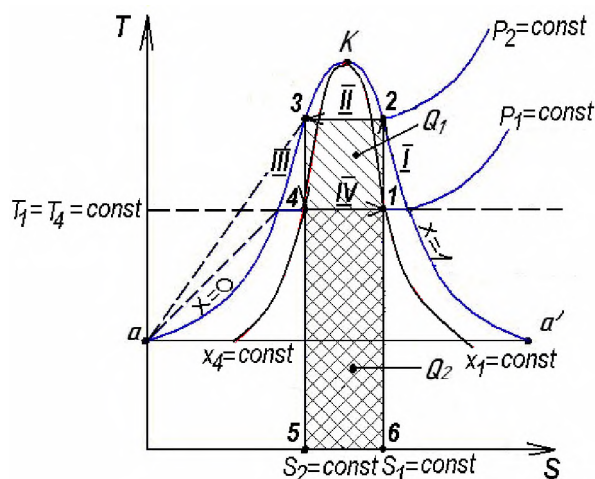


Рис. 2. Паровий трансформатор тепла за зворотнім циклом Карно у  $T$ - $S$ -координатах.

## 2.2. Холодоагенти та вимоги до них.

### 2.2.1. Холодоагенти.

1. Для парових холодильникових установ використовують такі холодоагенти:

- неорганічні сполуки:  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $N_2O$ ,  $NH_3$ ,  $SF_6$ ,...;
- циклічні органічні сполуки, наприклад, октафлуорциклобутан  $C_4F_8$ ;
- насичені вуглеводні:  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $C_4H_{10}$ ,  $(CH_3)_3CH$ ,  $C_5H_{12}$ ;
- ненасичені вуглеводні, в тому числі й  $Cl$ -,  $Br$ -,  $F$ -похідні:  $C_2H_4$ ,  $CH_2=CH_2$ ,  $CH_2=CH-CH_3$ ,  $CHCl=CHCl$ ,  $CH_2=CF_2$ ,  $CHCl=CF_2$ ,  $CH_2=CHBr$ ;
- аліфатичні аміни:  $CH_3-NH_2$ ,  $C_2H_5-NH_2$ ;
- кисневі органічні сполуки:  $C_2H_6O$  – диметилловий етер;  $C_4H_{10}O$  – діетилловий етер;  $HCOOCH_3$  – метилформіят;
- галоїдні сполуки насичених вуглеводнів  $C_mH_n$ , отриманих заміною атомів Гідрогену атомами  $F$ ,  $Cl$ ,  $Br$  («фреони») із загальною формулою:  $C_mH_xF_yCl_zBr_k$  ( $F, Cl, Br$  – фреони):  $CCl_4$ ,  $CFCl_3$ ,  $CF_2Cl_2$ ,  $CF_3Cl$ ,  $CF_4$ ,  $CF_3Br$ ,  $CHFC_2$ ,  $CHF_2Cl$ ,  $CHF_3$ ,  $CH_2Cl_2$ ,  $CHCl_3$ ,  $CH_3Cl$ ,  $CFCl_2-CF_2Cl$ ,  $CF_2Cl-CF_2Cl$ ,  $CF_2Cl-CF_3$ ,  $CH_3-CF_2Cl$ ,  $CH_3-CF_3$ ,  $CH_3-CHF_2$ ,  $CH_3-CH_2Cl$ ,  $n-C_4H_{10}$ .

Позначення фреонів:

- база фреону:
 

$\text{CH}_4$	1
$\text{C}_2\text{H}_6$	11
$\text{C}_3\text{H}_8$	21
$\text{C}_4\text{H}_{10}$	31
- справа пишуть число атомів Флуору:
 

$\text{CF}_2\text{Cl}_2$	фреон Ф-12
$\text{CCl}_4$	фреон Ф-10
$\text{C}_3\text{F}_4\text{Cl}_4$	фреон Ф-214
- при наявності атомів Н їх число додають до числа десятків:
 

$\text{CFCl}_3$	фреон Ф-11
$\text{CF}_2\text{Cl}_2$	фреон Ф-12
$\text{CHFCl}_2$	фреон Ф-21
$\text{CHF}_2\text{Cl}$	фреон Ф-22
- при наявності Вг додають букву В:
 

$\text{CF}_2\text{Br}_2$	фреон Ф-12В2.
--------------------------	---------------

2. Для газових холодильних устатків використовують такі холодоагенти:

$\text{N}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{Ne}$ ,  $\text{Kr}$ ,  $\text{Xe}$ , повітря.

3. Для абсорбційних холодильних устатків використовують такі холодоагенти:

- холодникові агенти (холодоагенти):  
 $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{-NH}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CHFCl}_2$ ,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ .
- абсорбенти:  
 $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{LiNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ,  $\text{LiBr}$ ,  $\text{CaCl}_2$ , диметилетертетраетилен, гліколь, роданистий амоніак, наприклад, пара: холодоагент – абсорбент:  
 $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{H}_2\text{O} - \text{LiBr}$ ;  $\text{H}_2\text{O} - \text{NaOH}$ ;  $\text{H}_2\text{O} - \text{CaCl}_2$ .

4. Холодоносії для транспортування (трансформації) холоду:

- розсіл (ропа):  
 $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$  ( $t_{\text{тр.}} = -21,2^\circ\text{C}$ );  
 $\text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$  ( $t_{\text{тр.}} = -55^\circ\text{C}$ ).

## 2.2.2. Вимоги до холодоагентів:

- низький тиск конденсації;
- тиск випаровування (насичення) повинен бути більше атмосферного (боротьба з текучістю);
- максимально можливе тепло пароутворення (визначає холодовиробність  $Q_2$ );
- мінімальна теплоємність (зменшення втрат при дроселюванні);
- питомий об'єм пари повинен бути:
  - мінімальний – для поршневих компресорних устатків (зменшення габаритів);
  - максимальний – для турбокомпресорних устатків (підвищення внутрішнього к.к.д. холодильних устатків).
- мала в'язкість (для покращення теплообміну та зниження гідравлічних втрат), але дуже низька в'язкість небажана з-за текучості холодоагенту через ущільнення;
- холодоагент і олива для мащення не повинні розчинятися один в одному;
- вибухонебезпечність, негорючість, нетоксичність, екологічна безпека;
- хімічна стабільність і корозійна інертність щодо металевих конструкцій;
- недефіцитність; низька початкова вартість.

## 2.3. Парова компресійна холодильна устатка.

### 2.3.1. Одноступенева устатка.

На рис. 3 приведена схема циклу одноступеневої парової компресійної холодильної устатки.

Суха насичена пара холодоагенту при тиску  $p_1$  після випаровувача IV ( $\bullet 1$ ) стискається у компресорі I за адиабатним оборотним процесом  $S_1 = \text{const}$  (процес  $1 \rightarrow 2$ ) від тиску  $p_1$  до  $p_2$ . Після компресора I пара стає перегрітою і подається в конденсатор II, в якому за допомогою охолоджувальної рідини

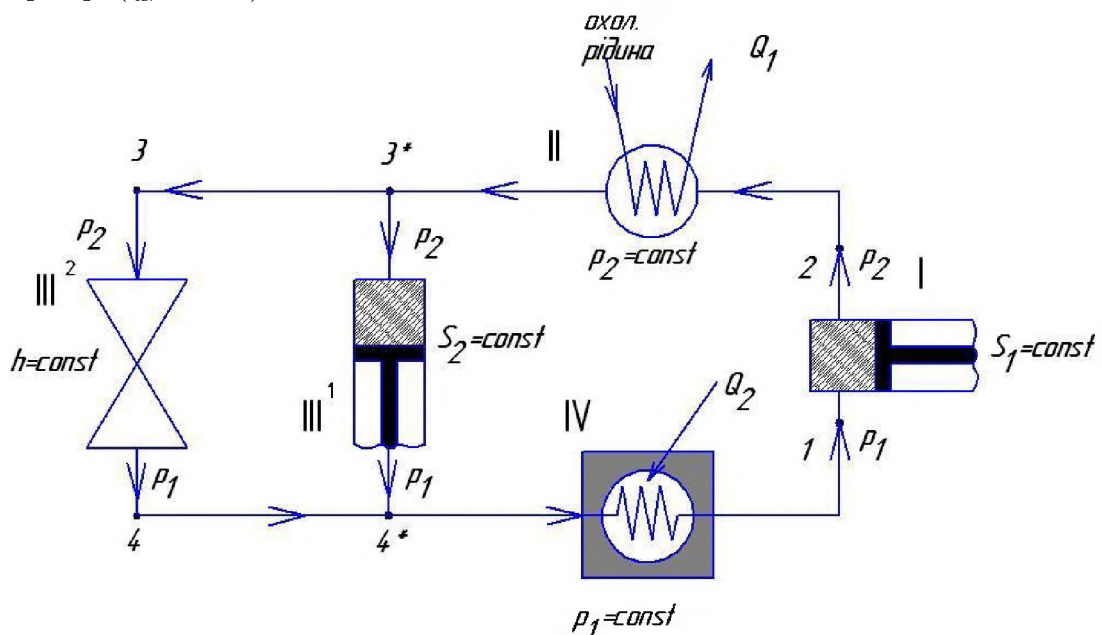


Рис. 3. Схема циклу одноступеневої парової компресійної холодильної устатки: I – компресор; II – конденсатор; III<sup>1</sup> – детандер; III<sup>2</sup> – дросель; IV – випаровувач.

за ізобарним процесом  $p_2 = \text{const}$  (процес 2→3) відбувається охолодження перегрітої пари і конденсація її до насиченої при  $p_2$  рідини (\*3\*). Ця рідина подається в детандер III<sup>1</sup>, де за оборотнім адіабатним процесом ( $S_2 = \text{const}$ ) відбувається розширення (процес 3\*→4\*), тиск падає від  $p_2$  до  $p_1$ , температура також знижується від  $T_3$  до  $T_4$ . Рідина перетворюється у насичену вологу пару близьку до випаровування при тиску  $p_1$  (\*4\*). Така насичена волога пара подається у випарувач IV, де за ізобарним процесом ( $4^* \rightarrow 1$ ) відбувається пароутворення за  $p_1 = \text{const}$ , внаслідок чого насичена волога пара стає сухою насиченою за тиску  $p_1$ .

При випаровуванні відбирається енергія у формі тепла  $Q_2$  від стінок камери і трубопроводу та холодоносія і, таким чином, досягається холодниковий ефект.

Ефективність цього процесу визначається холодниковим коефіцієнтом  $\varepsilon_1$  за  $Q_2$ :

$$\varepsilon_1 = \frac{Q_2}{L_0} = \frac{Q_2}{Q_0} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}, \quad (1)$$

де  $L_0$  – робота циклу;

$Q_0$  – тепло циклу.

У зв'язку з тим, що детандер є дорогою і складною машиною, то його замінюють дроселем III<sup>2</sup>.

Під час проходження насиченої рідини холодоагенту (\*3) при тиску  $p_2$  через дросель III<sup>2</sup> за ізентальпним процесом  $h = \text{const}$  відбувається зменшення тиску від  $p_2$  до  $p_1$  і зменшення температури від  $T_3$  до  $T_4$  (процес 3→4). Насичена волога пара холодоагенту (\*4) подається у випарувач IV і процес продовжується. Стан насиченої вологої пари при  $p_1$  після дроселя (\*4) відрізняється більшим ступенем сухості ( $x$ ), ніж після детандера:

$$x = \frac{m_{\text{сухої пари}}}{m_{\text{вол. пари}}} = \frac{m_{\text{сухої пари}}}{m_{\text{сухої пари}} + m_{\text{рідини}}};$$

$$(0 \leq x \leq 1) \text{ або } (0\% \leq x \leq 100\%)$$

Суха насичена пара (\*1) холодоагенту повертається у цикл. Цей цикл та відповідні процеси зображені на рис. 4 у T-S-координатах. Точки на діаграмі рис. 4 відповідають рис. 3.

Холодниковий ефект цього циклу дорівнює:

$$Q_{\Sigma} = Q_2. \quad (2)$$

### 2.3.2. Двоступенева устава.

На рис. 5 приведена схема циклу двоступенєвої парової холодникової устави. Суха насичена пара холодоагенту 1-го ступеня при тиску  $p_1''$  (\*1'') стискається компресором I<sup>1</sup> за адіабатним оборотнім процесом ( $S_1 = \text{const}$ ) (1'→2') від  $p_1'$  до  $p_2'$ . Пара стає перегрітою (\*2') і подається в конденсатор II<sup>1</sup>, в якому за допомогою охолоджувальної рідини (вода, росіл тощо) і відведення енергії у формі тепла  $Q_1'$  за ізобарним процесом  $p_2' = \text{const}$  (процес 2'→3') відбувається охолодження перегрітої пари і конденсація до насиченої рідини (\*3'). При подальшому охолодженні насиченої рідини холодоагенту під час проходження через дросель III<sup>1</sup> за ізентальпним процесом  $h_1 = \text{const}$  відбувається зменшення тиску від  $p_2'$  до  $p_1'$  і рідина перетворюється в насичену вологу пару (процес 3'→4'). Ця пара холодоагенту 1-го ступеня (\*4') подається у випарувач IV<sup>1</sup> (1-го ступеня), що є одночасно конденсатором II<sup>2</sup> (2-го ступеня). Під час випаровування відбирається енергія у формі тепла  $Q_2'$  від стінок випарувача, трубопроводу, через який проходить холодоагент 2-го ступеня, внаслідок чого насичена волога пара стає сухою насиченою при тиску  $p_1' = \text{const}$  (4'→1'). За рахунок відведення енергії у формі тепла  $Q_2' = Q_1''$  від стінок камери частина насиченої вологої пари холодоагенту 2-го ступеня за ізобарно-ізотермним процесом  $p_2'' = \text{const}$  і  $T_2'' = T_3'' = \text{const}$  конденсується (2''→3'') у конденсаторі II<sup>2</sup> і пара стає насиченою рідиною (\*3''). При проходженні такої рідини через дросель III<sup>2</sup> за ізентальпним процесом  $h_2'' = \text{const}$  відбувається зменшення тиску від  $p_2''$  до  $p_1''$  і температури від  $T_3''$  до  $T_4''$  (процес 3''→4'').

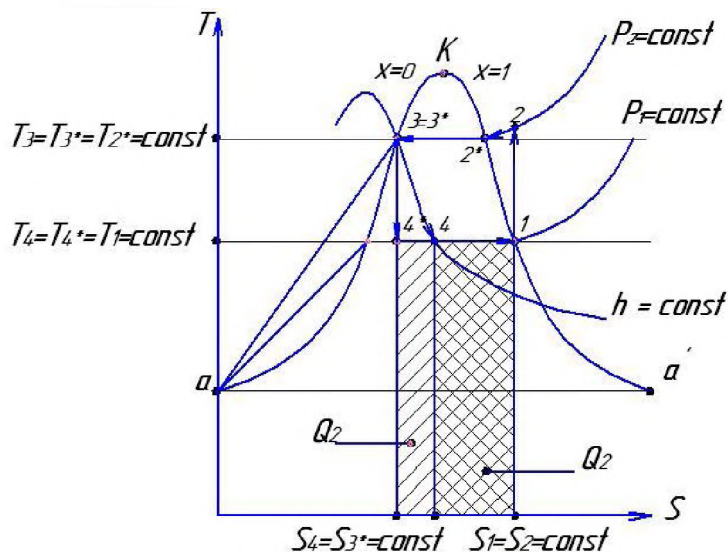


Рис. 4. T-S-діаграма циклу одноступенєвої парової компресійної холодникової устави.

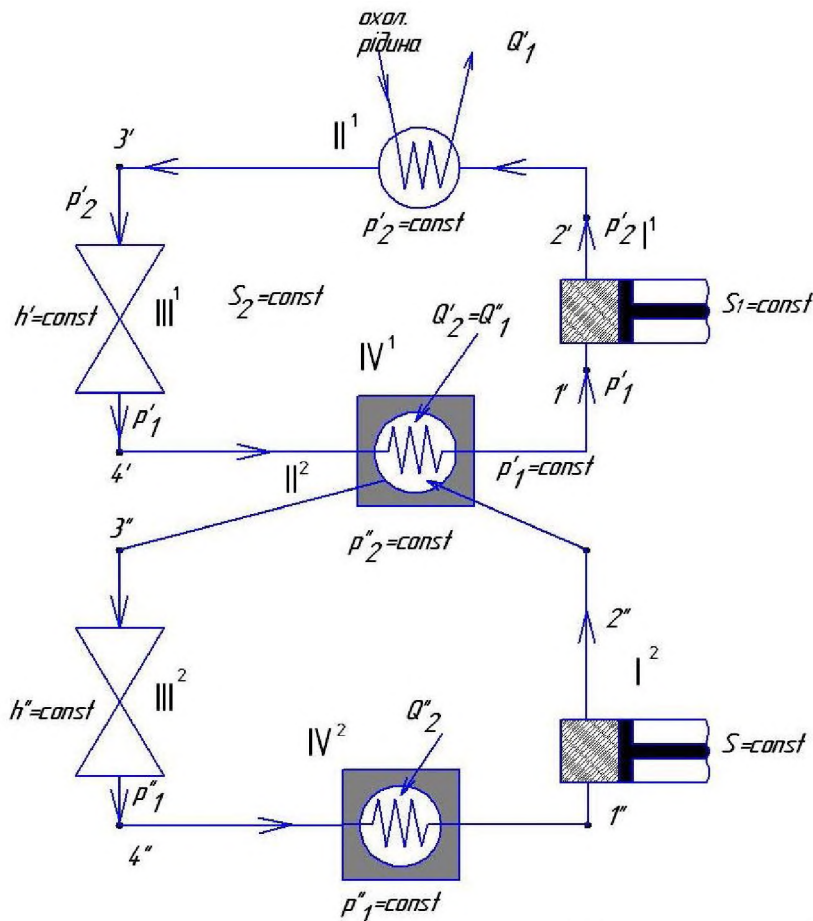


Рис. 5. Схема циклу двоступеневої парової компресійної установи: I', I'' – компресори; II', II'' – конденсатори; III', III'' – дроселі; IV', IV'' – випаровувачі.

Насичена рідина холодоагенту 2-го ступеня стає насиченою вологою парою при тиску  $p_1''$  (•4''). Ця пара подається у випаровувач IV<sup>2</sup>, де за ізобарним процесом  $p_1'' = \text{const}$  відбувається пароутворення (процес 4''→1''), внаслідок чого від стінок випаровувача відбирається енергія у формі тепла  $Q_2''$  і насичена волога пара холодоагенту 2-го ступеня стає сухою насиченою при тиску  $p_1''$  (•1''). Ця суха насичена пара стискається компресором I<sup>2</sup> за оборотнім адіабатним процесом

$S_2'' = \text{const}$  (процес 1''→2'') від тиску  $p_1''$  до  $p_2''$  і пара стає перегрітою (•2''). Ця пара при  $p_2'' = \text{const}$  і подається в конденсатор-випаровувач II<sup>2</sup>=IV<sup>1</sup> і цикл замикається.

Холодниковий ефект цього циклу дорівнює:

$$Q_{\Sigma} = Q_2' + Q_2'' \quad (3)$$

Цей процес зображено на рис. 6 у T-S-координатах.

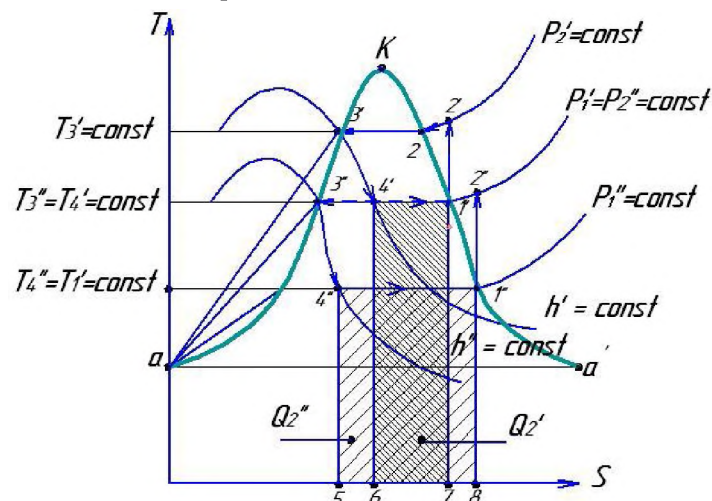


Рис. 6. T-S-діаграма циклу двоступеневої парової компресійної установи.

#### 2.4. Цикл наднизького охолодження.

Ще один приклад використання дроселя у циклах наднизького охолодження. Схема циклу наднизького охолодження приведена на рис. 7. Перегріта пара холодоагенту ( $\bullet 1$ ) при тиску  $p_1$  всмоктується в компресорі I, який стискає її від  $p_1$  до  $p_2$  за ізотермним процесом  $T_1=T_2=\text{const}$  (процес  $1\rightarrow 2$ ). Ця перегріта пара при  $p_2$  послідовно проходить через два теплообмінники (холодники)  $\Pi^1$  і  $\Pi^2$ , у яких за  $p_2=\text{const}$  (процес  $2\rightarrow 3$  та  $3\rightarrow 4$ ) послідовно через стінку теплообмінника охолоджується зустрічним холодним потоком перегрітої пари ( $8\rightarrow 9\rightarrow 1$ ) при  $p_1=\text{const}$ . У ( $\bullet 3$ ) перегріта пара відбирається після теплообмінника-холодника  $\Pi^2$  при тиску  $p_2$  і подається в детандер V, де за оборотнім адіабатним процесом (процес  $3\rightarrow 8$ ) або за необоротнім адіабатним процесом (процес  $3\rightarrow 8'$ ) розширюється від  $p_2$  до  $p_1$  та охолоджується від  $T_3$  до  $T_8$  або  $T_{8'}$  ( $\bullet 8$ ) або ( $\bullet 8'$ ). Далі пара закритичного стану ( $\bullet 4$ ) проходить через дросель III, де за ізентальпним процесом  $h=\text{const}$  (процес

$4\rightarrow 5$ ) відбувається її розширення – зменшення тиску від  $p_2$  до  $p_1$  і температури від  $T_4$  до  $T_5$ , внаслідок чого ця пара стає насиченою вологою при  $p_1$ . Така пара, поступаючи у збірник-конденсатор IV, конденсується до насиченої при  $p_1$  рідкого холодоагенту за ізобарним процесом  $p_1=\text{const}$  (він же ізотермний процес  $T_5=T_6=T_7=\text{const}$ ). Насичена рідина холодоагенту ( $\bullet 6$ ) частково охолоджується за ізобарним процесом  $p_1=\text{const}$  до  $T_6$  (процес  $6\rightarrow 6'$ ). Несконденсована пара холодоагенту у збірнику-конденсаторі IV, випаровуючись із насиченої вологої пари ( $\bullet 5$ ) за  $p_1=\text{const}$ ,  $T_5=T_7=\text{const}$ , стає сухою насиченою і далі в ( $\bullet 8$ ), змішується із холодоагентом, після розширення в детандері V. Така пара надходить у теплообмінник-холодник  $\Pi^2$ , де забирає тепло у прямохідної пари при  $p_1=\text{const}$ , а далі проходить через теплообмінник-холодник  $\Pi^1$  і далі повертається в цикл у ( $\bullet 1$ ). Цей процес зображений у T-S-координатах на рис. 8. Точки на рис. 7 та 8 співпадають.

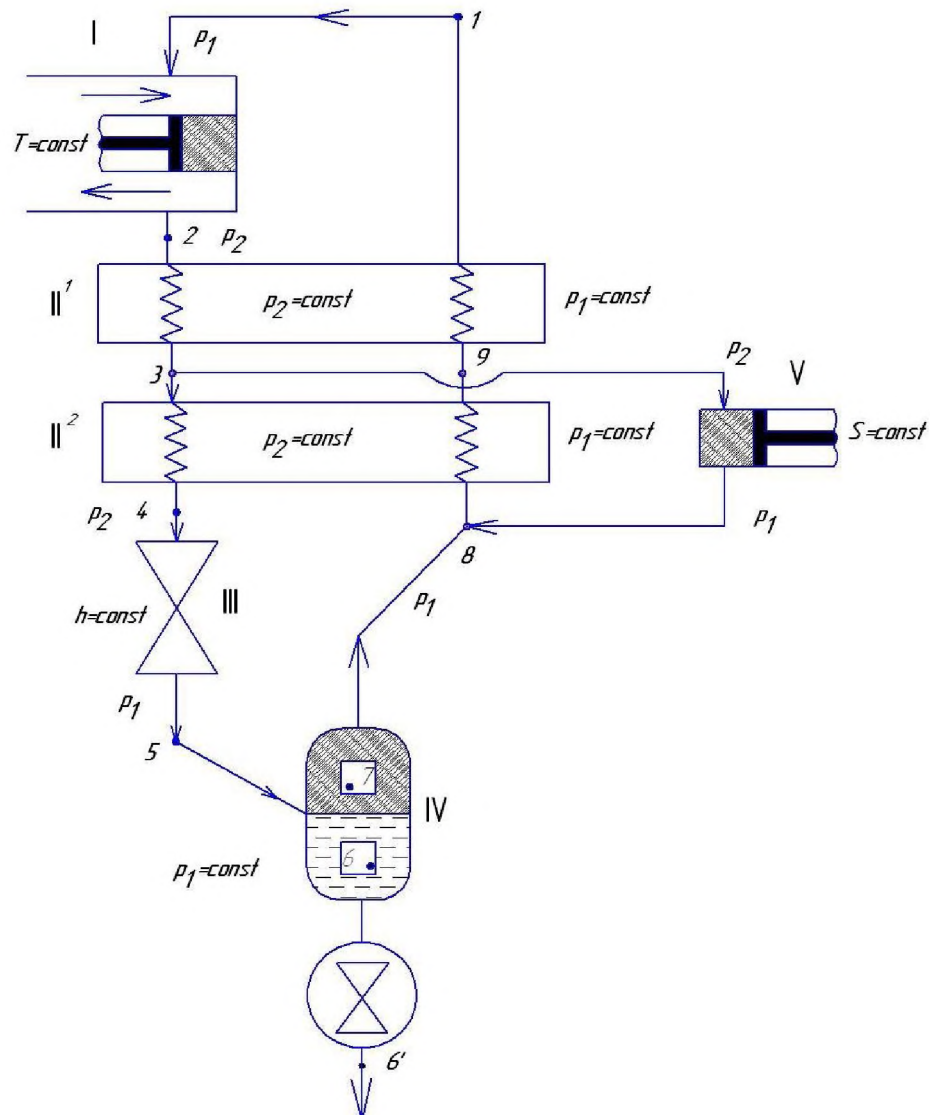


Рис. 7. Схема циклу наднизького охолодження: I – компресор ( $T = \text{const}$ );  $\Pi^1$ ,  $\Pi^2$  – теплообмінники-холодники; III – дросель; IV – збірник-конденсатор; V – детандер.

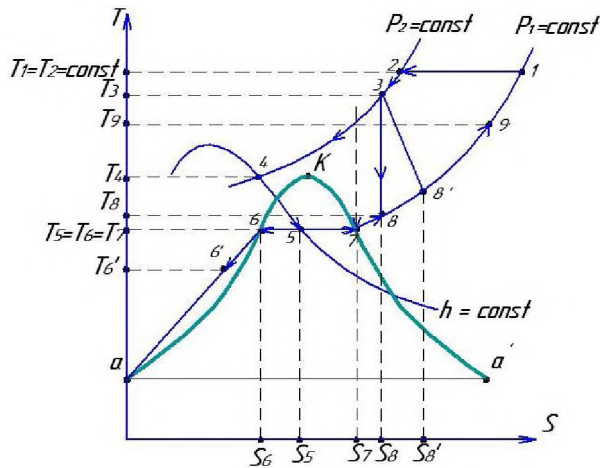


Рис. 8. T-S-діаграма циклу наднизького охолодження.

### 2.5. Абсорбційна холодильна устатка.

На рис. 9 показана схема циклу абсорбційної холодильної устатки. Холодний рідкий холодоагент, який складається з  $H_2O + NH_3$ , при  $p_1$  (•1) адиабатно  $S_1=S_2=const$  (процес 1→2) стискається від тиску  $p_1$  до  $p_2$  у помпі I і при  $p_2$  подається в парогенератор II, де, завдяки підведеній енергії у формі тепла  $Q$  (яка чисельно дорівнює площі  $F_{81243118}$  на рис. 8) відбувається пароутворення за ізобарним процесом  $p_2=const$  (процес 2→3) до сухої насиченої пари (переважно амоніаку) при тиску  $p_2$ , внаслідок чого відбувається збільшення кількості низькоконцентрованого розчину холодоагенту (переважно води) у парогенераторі. Ця пара надходить у конденсатор III, в якому, за ізобарним процесом  $p_2=const$  (процес 3→4) за допомогою охолоджувальної рідини і відведення енергії у формі тепла  $Q_1$  (яка чисельно дорівнює

площі  $F_{1134911}$  на рис. 8), відбувається конденсація пари до насиченої рідини (переважно амоніаку) (•4) при тиску  $p_2$ . Ця насичена при  $p_2$  рідина проходить через дросель  $IV^1$ , у якому за ізентальпним процесом  $h_1=const$  (процес 4→5), відбувається падіння тиску від  $p_2$  до  $p_1$ , температури від  $T_4$  до  $T_5$  і перетворення насиченої рідини амоніаку в насичену за  $p_1$  вологу пару  $NH_3$ . Така насичена волога пара проходить через теплообмінник випаровувача V, де за ізобарним процесом  $p_1=const$  відбувається випаровування цієї пари (процес 5→6), внаслідок чого відбирається енергія у формі тепла  $Q_2$  (яка чисельно дорівнює площі  $F_{5612105}$  на рис. 10) від стінок камери, трубопроводу та проміжної рідини.

Утворюється суха насичена пара  $NH_3$  при тиску  $p_1$ , яка спрямовується в абсорбер VI, де відбувається хемосорбція у розчині води + амоніак за ізобарним процесом при  $p_1=const$  (процес 6→1). В абсорбері амоніак хемічно взаємодіє з утворенням амоній гідроксиду:



Так як реакція екзотермічна, тому:

1. Для покращення процесів поглинання розчин амоніаку необхідно охолоджувати (відбирати енергію у формі тепла  $Q_3$ , яка чисельно дорівнює площі  $F_{618126}$  на рис. 10).

2. Потрібно також підтримувати малу концентрацію розчину амоніаку в абсорбері, яка досягається тим, що залишковий малоконцентрований розчин амоніаку у воді при  $p_2$  відбирається з парогенератора II (•3') і пропускається через дросель  $IV^2$ , де за ізентальпним процесом  $h_2=const$  (процес 3'→7) відбувається падіння тиску від  $p_2$  до  $p_1$  і температури від  $T_{3'}$  до  $T_7$ .

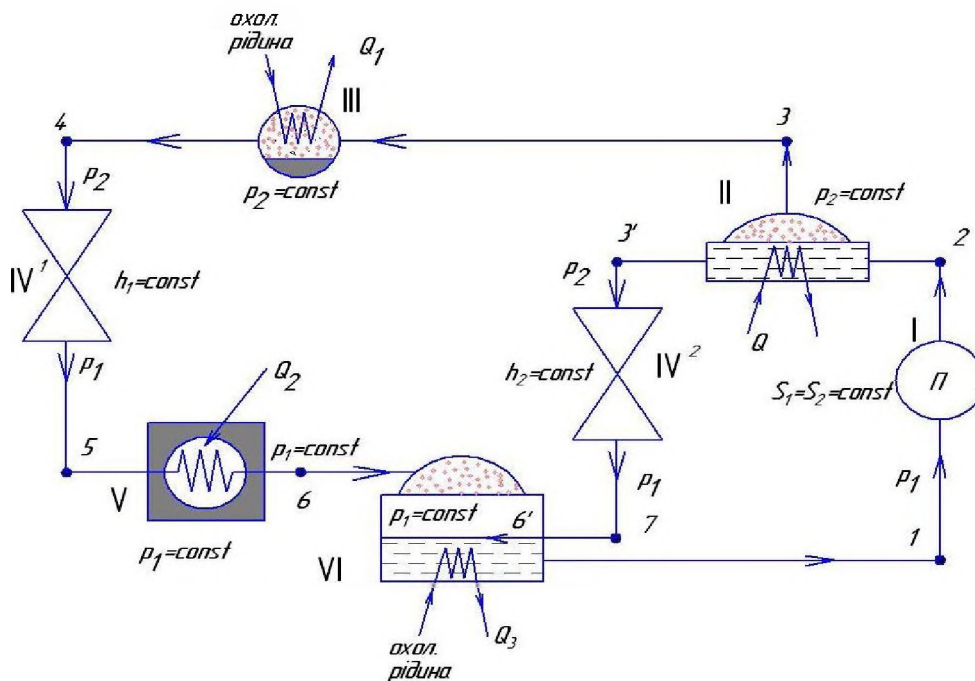


Рис. 9. Схема циклу абсорбційної холодильної устатки: I – помпа; II – парогенератор; III – конденсатор;  $IV^1, IV^2$  – дроселі; V – випаровувач; VI – абсорбер.

На виході з дроселя  $IV^2$  утворюється перегріта пара (в основному води) при тиску  $p_1$  ( $\bullet 7$ ), яка спрямовується в абсорбер VI, внаслідок чого вона ізобарно  $p_1 = \text{const}$  ( $7 \rightarrow 6'$ ) охолоджується та конденсується ( $6' \rightarrow 1$ ) до насиченої рідини за тиску  $p_1$  (процес  $7 \rightarrow 6' \rightarrow 1$ ) і цикл замикається ( $\bullet 1$ ).

Цей цикл представлений на рис. 10 у T-S-координатах.

## 2.6. Пароежекторна холодильна устава.

На рис. 11 показана схема циклу пароежекторної холодильної устави. Холодний рідкий холодоагент за тиску  $p_2$  ( $\bullet 1$ ) стискається в помпі I від тиску  $p_2$  до  $p_3$  за адиабатним процесом  $S_1 = S_2 = \text{const}$  (процес  $1 \rightarrow 2$ ) і подається у парогенератор II, де, за рахунок підведення енергії у формі

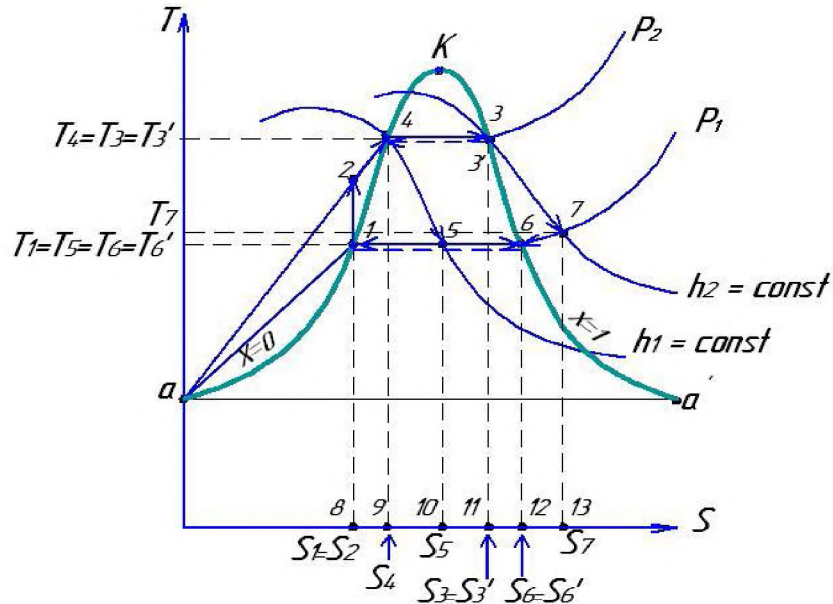


Рис. 10. T-S-діаграма циклу абсорбційної холодильної устави.

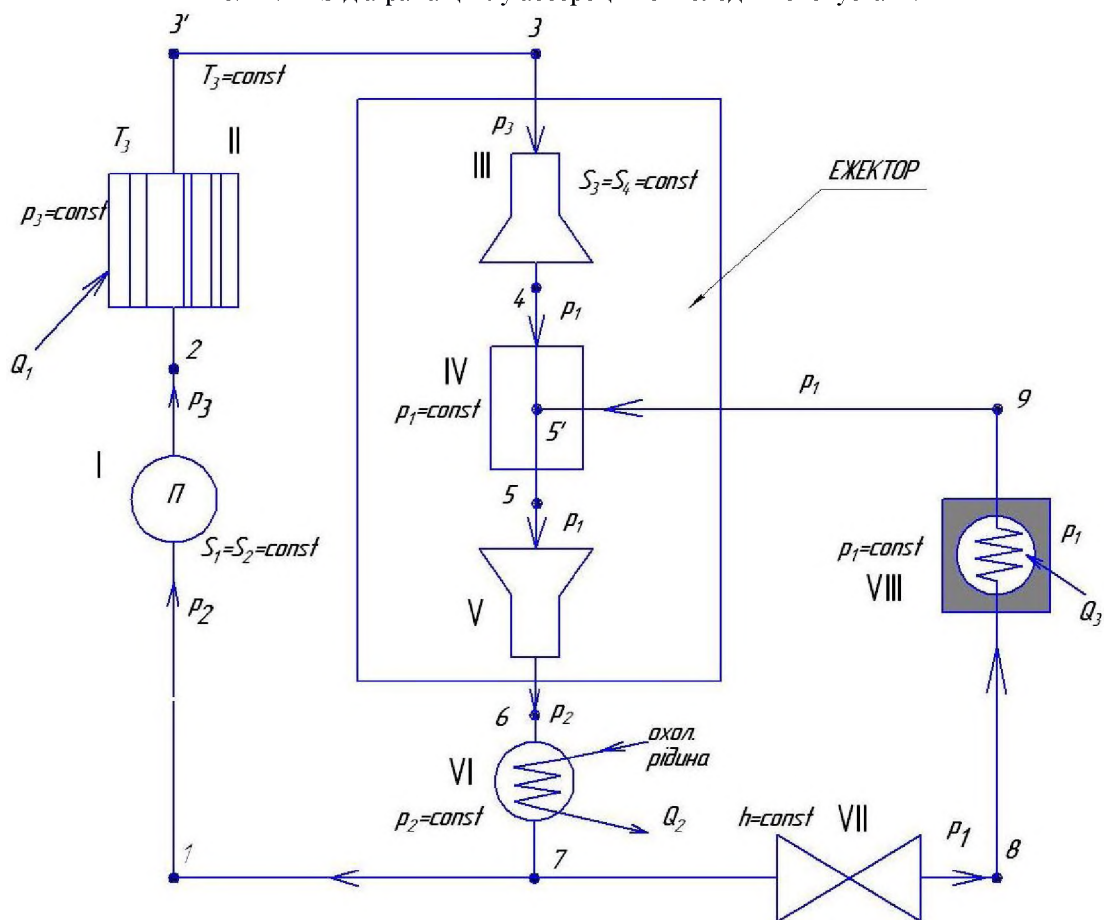


Рис. 11. Схема циклу пароежекторної холодильної устави: I – помпа; II – парогенератор; III – сопло; IV – камера змішування; V – дифузор; VI – конденсатор; VII – дросель; VIII – випаровувач.



тепла  $Q_1$  (яка чисельно дорівнює площі  $F_{10,123,312,10}$  на рис. 12), відбувається нагрів холодного холодоагенту (процес  $2 \rightarrow 3'$ ) за ізобарним процесом  $p_3 = \text{const}$  та пароутворення при  $p_3, T_3 = \text{const}$  (процес  $3' \rightarrow 3$ ), у наслідок чого утворюється суха насичена пара при тиску  $p_3$  (\*3), яка надходить в ежектор, який складається із сопла III, камери змішування IV і дифузора V. Суха насичена пара (\*3) проходить через сопло III, де, за адіабатним оборотним процесом  $S_3 = S_4 = \text{const}$ , відбувається зменшення тиску від  $p_3$  до  $p_1$ , тобто відбувається розширення пари, і температура зменшується від  $T_3$  до  $T_4$  (процес  $3 \rightarrow 4$ ) або необоротним адіабатним процесом  $S_3 < S_4$ . На виході із сопла III (\*4) утворюється насичена волога пара з високим ступенем сухості при тиску  $p_1$  (\*4), яка надходить у камеру змішування IV, де вона за ізобарним процесом  $p_1 = \text{const}$  змішується із сухою насиченою парою, яка виходить із випаровувача VIII при тиску  $p_1$  (процес  $4 \rightarrow 5$ ). Утворюється (\*5') насичена волога пара з надвисоким ступенем сухості (\*5). Така пара проходить через дифузор V, де стискається від  $p_1$  до  $p_2$ , при цьому температура збільшується від  $T_5$  до  $T_6$ , за оборотним адіабатним процесом  $S_5 = S_6 = \text{const}$  (процес  $5 \rightarrow 6$ ) або за необоротним адіабатним процесом  $S_5 < S_6''$  (процес  $5 \rightarrow 6''$ ) і стає (\*6) або (\*6'') перегрітою парою при тиску  $p_2$ . Ця пара надходить у конденсатор VI, де за допомогою холодної рідини через стінку трубопроводу відбирається енергія у формі тепла  $Q_2$  (яка чисельно дорівнює площі  $F_{146,6,711,14}$  на рис. 10), внаслідок чого перегріта пара (\*6) охолоджується (процес  $6 \rightarrow 6'$ ) при сталому тиску  $p_2 = \text{const}$  та ізобарно-ізотермно ( $p_2, T_7 = \text{const}$ ) конденсується (процес  $6' \rightarrow 7$ ) до насиченої рідини холодоагенту при  $p_2$ . Після чого (\*7) насичена при тиску  $p_2$  рідина холодоагенту розділяється навпіл. Одна частина

ізобарно  $p_2 = \text{const}$  охолоджується (процес  $7 \rightarrow 1$ ) в трубах і повертається у цикл (\*1). Таким чином, з цією частиною конденсату цикл замикається в (\*1). А інша частина проходить через дросель VII, де за ізентальпним процесом  $h = \text{const}$  (процес  $7 \rightarrow 8$ ) відбувається падіння тиску від  $p_2$  до  $p_1$  і температури від  $T_7$  до  $T_8$ . Насичена рідина при  $p_2$  (\*7) стає насиченою вологою парою при тиску  $p_1$  (\*8) з малим ступенем сухості. Така пара надходить у випаровувач VIII, де за ізобарним процесом  $p_1 = \text{const}$  відбувається випаровування пари (процес  $8 \rightarrow 9$ ), внаслідок чого відбирається енергія у формі тепла  $Q_3$  (яка чисельно дорівнює площі  $F_{12,8,9,15,12}$  на рис. 10) від стінок холодоильної камери і трубопроводів, а насичена волога пара при  $p_1$  стає сухою насиченою парою при  $p_1$  (\*9). Така пара при  $p_1$  надходить до камери змішувача IV ежектор і цикл замикається в (\*5') й з цією частиною конденсату. Цей цикл показаний на рис. 12 у T-S-координатах.

### 2.7. Завдання для самостійної роботи.

1. Як зміниться цикл пароежекторної холодної устави, якщо після котла пара холодоагенту стане вологою насиченою, а пара після дифузора стане за більш високого тиску і дросель буде замінено детандером? Відповідь проілюструйте в p-v-координатах.

2. Як зміниться цикл абсорбційної холодної устави, якщо помпа буде нагнати рідкий насичений холодоагент до більш високого тиску, а дросель замінити на детандер? Відповідь проілюструйте в p-v- та h-s-координатах.

3. Як зміниться цикл пароежекторної холодної устави, якщо помпа буде нагнати рідкий холодоагент до більш високого тиску, а після сопла насичений вологий холодоагент стане за більш низького тиску і температури? Відповідь проілюструйте в p-v-координатах.

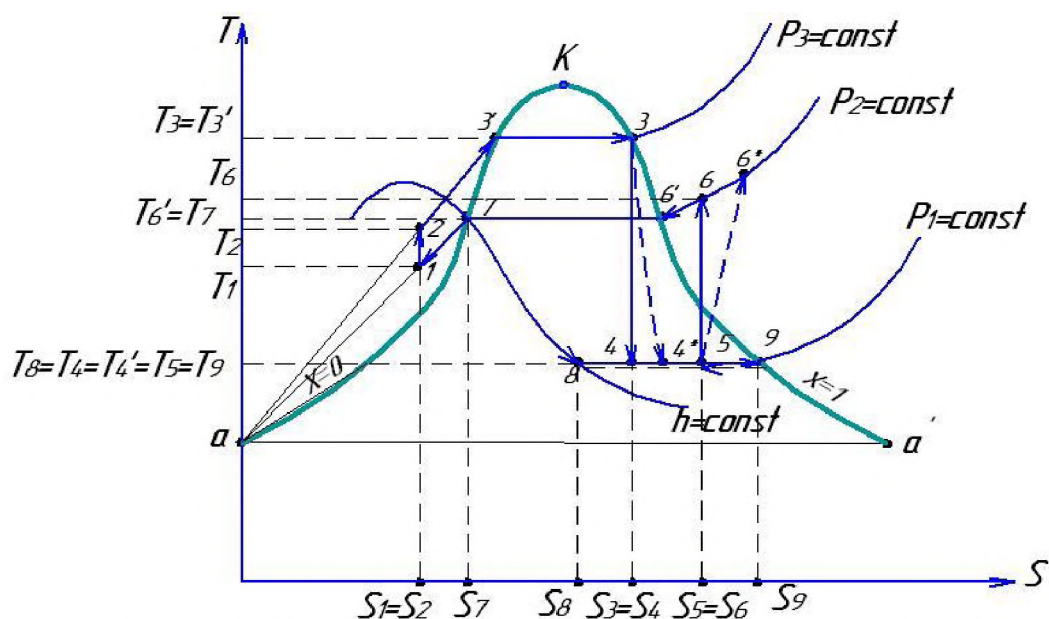


Рис. 12. T-S-діаграма циклу пароежекторної холодної устави.

4. Як зміниться цикл пароежекторної холодної устави, якщо після котла пара холодоагенту стане вологою насиченою, а пара після дифузора стане за більш високого тиску і дросель буде замінено детандером? Відповідь проілюструйте в  $h-s$ -координатах.

5. Як зміниться цикл пароежекторної холодної устави, якщо помпа буде нагнати рідкий холодоагент до більш високого тиску, а після сопла насичений вологий холодоагент стане за більш низького тиску і температури? Відповідь проілюструйте в  $h-s$ -координатах.

6. Як зміниться цикл абсорбційної холодної устави, якщо помпа буде нагнати рідкий насичений холодоагент до більш високого тиску, а дросель замінити на детандер? Відповідь проілюструйте в  $h-s$ - та  $p-v$ -координатах.

7. Як зміниться цикл одноступеневої парової компресійної холодної устави, якщо компресор буде нагнати холодоагент до більш високого тиску, а дросель замінити детандером? Відповідь проілюструйте в  $h-s$ - та  $p-v$ -координатах.

8. Як зміниться цикл одноступеневої парової компресійної холодної устави, якщо після дроселя волога пара холодоагенту стане за більш низького тиску і низької температури, а процес стискання холодоагенту в компресорі буде необоротний замість оборотного? Відповідь проілюструйте в  $h-s$ -координатах.

9. Зобразити цикл пароежекторної холодної устави в  $h-s$ -координатах.

10. Зобразити цикл абсорбційної холодної устави в  $p-v$ -координатах.

11. Зобразити цикл одноступеневої парової компресійної холодної устави в  $h-s$ -координатах.

12. Зобразити цикл пароежекторної холодної устави в  $p-v$ -координатах.

13. Зобразити цикл двоступеневої парової компресійної холодної устави в  $h-s$ -координатах.

14. Зобразити бінарний цикл в  $h-s$ -координатах.

15. Зобразити цикл паросилової устави в  $p-v$ -координатах.

16. Зобразити цикл паросилової устави з вторинним перегрівом пари в  $h-s$ -координатах.

17. Зобразити простий парогазовий цикл з магнітогідродинамічним (МГД)-генератором в  $h-s$ -координатах.

18. Паросилова устава (цикл Ренкіна): опис принципової схеми, зображення циклу в  $p-v$ -,  $T-s$ - та  $h-s$ -координатах. Розрахунки термічного коефіцієнта корисної дії та питомої втрати пари.

19. Паросилова устава з вторинним перегрівом пари: опис принципової схеми, зображення циклу в  $p-v$ -,  $T-s$ - та  $h-s$ -координатах.

20. Регенеративна паросилова устава: опис принципової схеми, зображення циклу в  $p-v$ -,  $T-s$ - та  $h-s$ -координатах.

21. Бінарна паросилова устава: опис принципової схеми, зображення циклу в  $p-v$ -,  $T-s$ -координатах.

22. Парогазова устава: зображення циклу в  $p-v$ -,  $T-s$ - та  $h-s$ -координатах.

23. Устава з МГД-генератором: опис принципової схеми, зображення циклу в  $p-v$ -,  $T-s$ -координатах.

24. Парова компресійна холодна устава (одноступенева та двоступенева): зображення циклу в  $p-v$ -,  $T-s$ -координатах.

25. Пароежекторна холодна устава: опис принципової схеми, зображення циклу в  $T-s$ - та  $h-s$ -координатах.

26. Абсорбційна холодна устава: опис принципової схеми, зображення циклу в  $T-s$ - та  $h-s$ -координатах.

27. Устава наднизького охолодження (криогенний цикл): опис принципової схеми, зображення циклу в  $p-v$ -,  $T-s$ - та  $h-s$ -координатах.

## Рекомендована література

### Основна література

1. **Сіренко Г.О., Базюк Л.В.** Тепло- і масообмін у хемічній технології. – Івано-Франківськ: Прикарп. нац. ун-т ім. В. Стефаника, 2011.
2. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. – Москва: Энергия, 1975. – 448с.
3. **Кирилин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е.** Техническая термодинамика. – Москва: Энергия, 1968. – 472с.
4. **Нашокин В.В.** Техническая термодинамика и теплопередача. – Москва: Высш. шк., 1980. – 469с.
5. **Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д.** Теплообмен излучением / Пер. с англ. С.З. Сориц, Л.М. Сорокопуда. – Ленинград: Энергия, 1971. – 295с.

### Додаткова література

1. **Алексеев Г.Н.** Общая теплотехника. – Москва: Высшая школа, 1980. – 552с.
2. **Бондарев В.А., Гринкевич Р.Н., Процкий А.Е.** Общая теплотехника. – Минск: Вышэйша шк., 1967. – 320с.
3. **Жуковський В.С.** Технічна термодинаміка. – Київ: Держтехвидав, 1953. – 442с.

4. **Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А.** Кратный курс физической химии. – Москва: Металлургия, 1979. – 368с.
5. **Костенко Г.М.** Технічна термодинаміка. – Київ: Держтехвидав, 1958. – 420с.
6. **Костерев Ф.М., Кушнырев В.И.** Теоретические основы теплотехники. – Москва: Энергия, 1978. – 360с.
7. **Кузовлев В.А.** Техническая термодинамика и основы теплопередачи / Под ред. Л.Р. Стоцкого. – Москва: Высш. шк., 1975. – 303с.
8. **Лариков Н.Н.** Теплотехника. – Москва: Стройиздат, 1985. – 432с.
9. **Недужий И.А., Алабовский А.Н.** Техническая термодинамика и теплопередача. – Киев: Высш. шк., 1978. – 224с.
10. **Остафійчук Б.К., Яцюра М.М., Гамарник А.М.** Фізика. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Ч.1. – Івано-Франківськ: Гостинець, 2006. – 308с.
11. **Поршаков Б.П., Романов Б.А.** Основы термодинамики и теплотехники. – Москва: Недра, 1988. – 300с.
12. **Теплотехника** / А.М. Архаров, С.И. Исаев, И.А. Кожин и др.; под общ. ред. В.И. Крутова. – Москва: Машиностроение, 1986. – 432с.
13. **Теплотехника** / Б.И. Бахмачевский, В.Г. Зах, Г.П. Лызо и др.; под ред. А.А. Щукина, И.Н. Сушкина. – Москва: Металлургиздат, 1963. – 605с.
14. **Теплотехника** / И.Т. Швець, В.И. Толубинский, А.И. Алабовский и др. – Киев: Высш. шк., 1976. – 518с.
15. **Теплотехніка** / І.Т. Швець, В.І. Голубінський, М.Ф. Кіраковський та ін. – Київ: Вища шк., 1969. – 588с.
16. **Теплотехника** / М.М. Хазен, Г.А. Матвеев, М.Е. Грицевский, Ф.П. Казакевич; под ред. Г.А. Матвеева. – Москва: Высш. шк., 1981. – 480с.
17. **Теплотехника** / А.А. Щукин, И.Н. Сушкин, Р.Г. Зах и др. – Москва: Металлургия, 1973. – 480с.
18. **Техническая термодинамика** / Е.В. Дрыжаков, Н.П. Козлов, Н.К. Корнейчук и др.; под ред. В.И. Крутова. – Москва: Высш. шк., 1971. – 472с.
19. **Техническая термодинамика** / Под ред. В.И. Крутова. – Москва: Высш. шк., 1981. – 439с.
20. **Техническая термодинамика** / Под ред. А.С. Телегина. – Москва: Металлургия, 1992. – 240с.
21. **Юдаев Б.Н.** Техническая термодинамика и теплопередача. – Москва: Высш. шк., 1988. – 479с.

*Сіренко Г.О.* – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хемії.

*Базюк Л.В.* – викладач кафедри неорганічної та фізичної хемії.

*Артус Я.І.* – студентка IV курсу кафедри неорганічної та фізичної хемії.

**Рецензент**

*Мідак Л.Я.* – кандидат хімічних наук, доцент кафедри неорганічної та фізичної хемії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.