

## Х. Хладилни машини и апарати

Хладилните инсталации се разделят на две основни групи: **инсталации за умерено охлаждане** и **инсталации за дълбоко охлаждане**.

Към първите се отнасят **компресорните парови и газови хладилни машини**, работата на които е свързана със загуба на механична енергия. Тук влизат и **абсорбционните и пароежекторни хладилни машини**, при които в студопроизводството също се изразходва топлина.

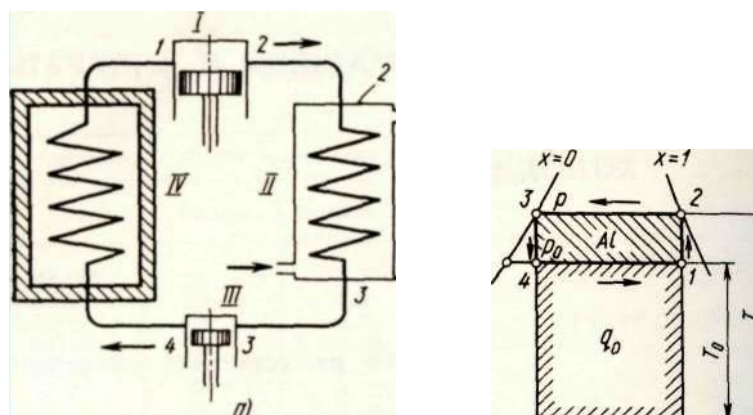
Към вторите се отнасят **инсталациите предназначени за компримиране на газове и разделяне на газови смеси**.

### 1. Компресорни хладилни машини

#### 1.1. Термодинамични основи на изкуственото охлаждане и хладилни цикли

Работата на хладилните машини се основава на факта, че охлаждащата среда отнема топлина и я предава на тяло с по-висока температура (вода или въздух), т.е. извършва се преход на топлина от по-малко нагрято тяло към по-нагрято. Съгласно вторият принцип на термодинамиката, такъв преход е възможен само при допълнителна загуба на работа, като се реализира обратен термодинамичен процес или хладилен цикъл. В качеството на такъв хладилен цикъл е приет обратния **цикъл на Карно**, който се осъществява с помощта на работно тяло наречено хладилен агент.

Хладилната машина включва 4 основни елемента: компресор, кондензатор, разширителен цилиндър и изпарител, в които се извършват процесите съответстващи на обратния цикъл на Карно. Схемата на хладилната машина и топлинната диаграма са представени на фиг.102.



Фиг.102. Схема (а) и Т-S-диаграма(б) на изпарителна хладилна машина:

- 1 – 2 - компримиране на влажната пара от налягане  $p_0$  до налягане  $p$ ;
- 2 – 3 – кондензация на парите при налягане  $p$ ;
- 3 - 4 - адиабатично разширение в разширителния цилиндър;
- 4 - 1 — изпарение на течността при налягане  $p_0$

Най-разпространени хладилни машини са компресорните, като в качеството на работни тела в тях се използват парообразни свиваеми и газообразни несвиваеми тела.

#### 1.1.1. Цикъл на едностепенно свиване

Теоретичният цикъл на изпарителната компресорна машина значително се различава от цикъла на Карно:

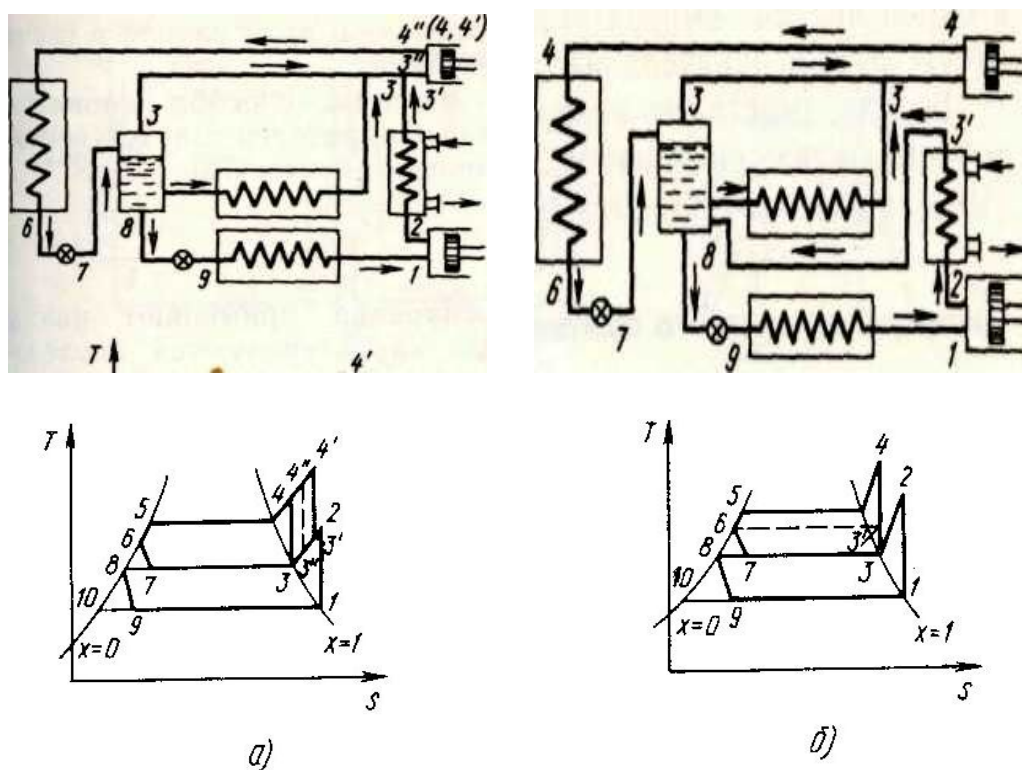
- вместо адиабатично разширение на течния хладилен агент в разширителния цилиндър се извършва дроселиране, което значително опростява хладилната инсталация;

- свиването на влажните пари е заменено със свиване на сухи пари. Преход от влажния ход на компресора към сухия ход е свързан с повишаване на работните коефициенти на компресора и предупреждения за възможни хидравлични удари.

- преохлаждането на течния хладилен агент преди регулиращия вентил, няколкократно увеличава студопроизводителността и намалява дроселиращите загуби.

### 1.1.2. Цикъл на двустепенно свиване

При ниски температури на изпарение и високи температури на кондензация, степента на свиване  $p/p_0$  на парите на хладилния агент в компресора става значително. Това води до рязко снижаване на коефициента на подаване и увеличава загубите при дроселиране. При двустепенно свиване се препоръчва преход при  $p/p_0 \geq 9$ . Двустепенното свиване позволява осъществяване на междинно охлаждане и двустепенно регулиране, т.е. създава се възможност за получаване на две температури на кипене в един цикъл. На фиг.103 са показани принципните схеми и T-s – диаграмите на циклите с двустепенно охлаждане с непълно(а) и пълно(б) промеждутъчно охлаждане. На практика е широко разпространен цикъла за двустепенно свиване с една ниска температура на изпарение. В този случай в схемата отсъства изпарител за високо налягане.



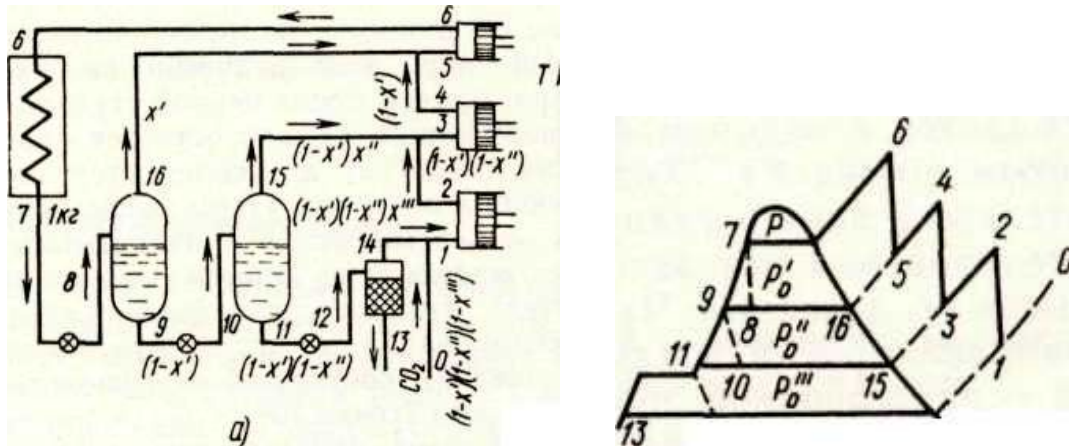
Фиг.103. Схеми и диаграми цикли с двустепенно свиване

а - с непълно междинно охлаждане; б - с пълно междинно охлаждане; 1 - 2 - свиване в степента на ниско налягане; 2 - 3' - охлаждане във водния хладник; 3' - 3 - охлаждане в междинния съд(б); 3' - 4' - свиване в степента на високо налягане на парата от водния хладник(а); 3 - 4 - свиване в степента на високо налягане на парата от изпарителя за високо налягане и отделителя на течност(а) и всичката пара(б); 3'' - 4'' - свиване на паровата смес в степента за високо налягане; 4'' - 5 - охлаждане и кондензация на парите; 5 - 6 - преохлаждане на хладилния агент; 6 - 7 - първо дроселиране; 8 - 9 - второ дроселиране; 8 - 3 - изпарение от изпарителя за високо налягане; 9 - 1 изпарение в изпарителя за ниско налягане

В зависимост от предназначението на хладилните машини, способа за междинното охлаждане на парите и броя на изпарителите на двустепенните машини се изпълняват по различни схеми.

### 1.1.3. Цикъл на тристепенно свиване

При ниски температури изпаренията се провеждат в цикли с тристепенно свиване, които се характеризират с последователно дроселиране на течния хладилен агент в три регулиращи вентила с отвеждане на образуващата се пара. Схемата и диаграма на хладилните машини за получаване на твърд въглероден двуокис (сух лед), работеща по принципа на тристепенното свиване е представена на фиг.104. Цикълът за получаване на твърдия въглероден двуокис, е основан на факта, че тройната точка характеризира сравнително висока температура (-56,60С) при абсолютно налягане 5,3 атм. В тройната точка газообразната, течната и твърда фаза се намират в равновесие. При абсолютно налягане по-ниско от 5,3атм, т.е. след третото дроселиране се получава двуфазна система: пари-твърд CO<sub>2</sub>, попадаща в специален генератор. Трябва да се отбележи, че за разлика от обикновените тристепенни инсталации, машината за сух лед работи в прекъснат цикъл. Твърдият лед периодически се извежда от системата като готов продукт.

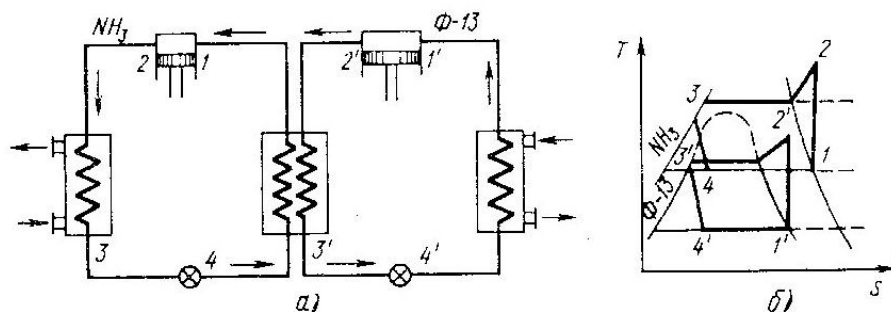


Фиг.104. Схемата (а) и диаграма (б) на тристепенно свиване:

1 – 2 - свиване на CO<sub>2</sub> в първата степен; 3 - 4 - свиване на CO<sub>2</sub> във втората степен; 5 – 6 - свиване на CO<sub>2</sub> в третата степен; 6 – 7 - охлаждане и кондензация на CO<sub>2</sub>; 7 – 8 - първо дроселиране; 9 – 10 - второ дроселиране; 11 – 12 – трето дроселиране; 12 – 14 - процес на образуване на твърд CO<sub>2</sub>

### 1.1.4. Каскаден цикъл

При необходимост от постигане на още по-ниски температури се преминава в каскаден цикъл. Каскадната хладилна машина представлява система от работещи отделно хладилни машини включени последователно (фиг.105). Кондензаторът на ниския елемент на каскадата се явява изпарител на по-горния елемент. Каскадните машини имат висок хладилен коефициент, поради възможността за използване на различни хладилни агенти в отделните машини с различни по стойности критични температури.



Фиг.105. Схемата (а) и диаграма (б) на каскадна хладилна машина

1 - 2 - свиване NH<sub>3</sub>; 2 - 3 – охлаждане, кондензация, преохлаждане NH<sub>3</sub>; 3 - 4 – дроселиране NH<sub>3</sub>; 4 - 1 – изпарение NH<sub>3</sub>; 1 - 2 – свиване Ф-13; 2' - 3' – охлаждане и кондензация Ф-13; 3' - 4' – дроселиране Ф-13; 4' - 1' – изпарение Ф-13

## 1.2. Хладилен агент

В хладилната техника днес се използват различни вещества (повече от 30), като хладилни агенти. Основните критерии за тяхното оценяване са:

**- термодинамичните свойства на хладилния агент, като:**

- граници на налягането при които се осъществява процеса в машината;
- обемна студопроизводителност;
- критични параметри ;
- температура на замръзване и др.

Въз основа на термодинамичното подобие е разработен метод за изчисляване на работните характеристики на тези вещества, позволяващи с помощта на различни закономерности да се прогнозира важни за тях характеристики въз основа на критичните им параметри ( $P_{кр}$  и  $T_{кр}$ ) и нормалната температура на кипене ( $T_k$ ).

**- практически фактори, като:**

- въздействие на хладилният агент на метали,
- разтворимост в масла,
- физиологични свойства,
- горимост и възпламеняемост,
- цена.

Едни от най-използваните хладилни агенти са: **амоняк, въглероден двуокис, хлорметил, дихлорметан, фреон – 11, 12, 13, 21, 22, 113, 114, 143, етан, пропан** и др.

**Амоняк** – това е един от най-разпространените хладилни агенти за хладилни машини с бутални компресори, при температура на кипене не по-ниска от  $-65^{\circ}\text{C}$ . Амонякът е отровен и има силна миризма, затова се изисква строго съблюдаване на техниката за безопасност.

Голямо разпространение напоследък получават фреоните (това са флуорохлорни производни на въглеводородите). Те се отличават с широк диапазон на термодинамичните свойства ( $T_{кип}$ , налягане и др.). В повечето случаи фреоните са безвредни, негорими, не са взривоопасни и нямат мирис. Недостатък на фреоните са тяхната малка вътрешна топлина на парообразуване и разтворимостта им в смазочни масла.

За турбокомпресорните хладилни машини се използват хладилни агенти притежаващи голяма молекулна маса и малка обемна студопроизводителност. Например при умерени температури се препоръчва използване на фреон 11 и фреон 12, а при по-ниски температури – етилен и етан.

## 1.3. Елементи на компресорните хладилни машини

### 1.3.1. Компресори

Компресорът е един от основните елементи на компресорната хладилна машина, с помощта на който се осъществява хладилния цикъл. Теоретичният работен процес в компресора се отличава от действителния за което има няколко причини:

- разширение на парата във вредното пространство;
- съпротивление в клапаните при всмукване и нагнетяване;
- топлообмен между стените на цилиндъра и хладилния агент;
- пропуски в уплътненията на клапани, салници и др.

#### 1.3.1.1. Избор на компресор

Производителността на хладилния компресор характеризира ефекта на охлаждането, който се постига с хладилната машина работеща в условията на работен цикъл. Казано по друг начин, студопроизводителността на една и съща машина може да се изменя в доста широки граници в

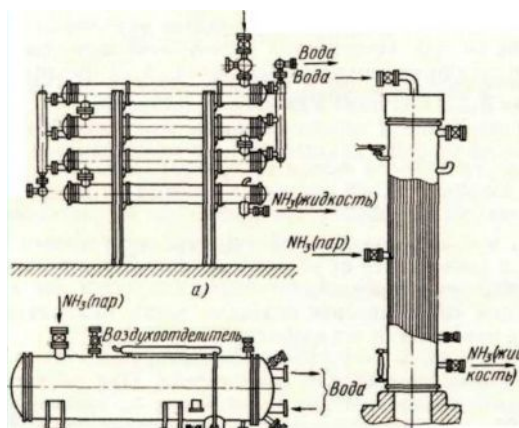
зависимост от условията на хладилния цикъл. Сравнение на студопроизводителността на различни компресори е възможно само при еднакви условия.

### 1.3.2. Кондензатори

Кондензаторът на хладилната машина служи за превръщане на сгъстените пари на хладилния агент в течно състояние. При това от хладилният агент трябва да се отвежда топлината на прегряването, скритата топлина на кондензация и понякога топлината съответстваща на преохлаждения, кондензиран хладилен агент. В някои типове кондензатори топлинното натоварване се поема не само от охлаждащата вода, но и от въздуха. При неголеми хладилни машини, то може да се извършва изцяло от въздушната среда. Изхождайки от това кондензаторите могат да се разделят на три основни групи:

- кондензатори, в които топлинното натоварване се предава на охлаждащата вода – противоточни с двойни тръби, кожухотръбни и др.;
- кондензатори, отдаващи топлината си на охлаждащата вода и частично на околния въздух – оросителни, изпарителни и др.;
- кондензатори с въздушно охлаждане за неголеми хладилни установки.

Някои типове кондензатори са посочени на фиг.106.



Фиг.106. Кондензатори:

а – елемент; б - хоризонтален кожухотръбен; в - вертикален кожухотръбен

### 1.3.3. Изпарители

В изпарителите топлината от охлаждащата среда се предава на течния хладилен агент. При този процес хладилният агент се превръща в пари. Общото термично съпротивление е сума от термичните съпротивления на охлаждащата среда и кипящия хладилен агент.

Изпарителите се делят на два типа, в зависимост от вида на охлаждащата среда:

- изпарители за охлаждане на течности(вода, разсол – солеви разтвори). Към тях се отнасят изпарители с тръбни змиевици, кожухотръбни, изпарители със секционирани вертикални тръби;
- изпарители за охлаждане на въздух. Към тях се отнасят изпарители с естествена циркулация на въздух и изпарители с принудителна циркулация на въздух от вентилатор (въздухоохладители).

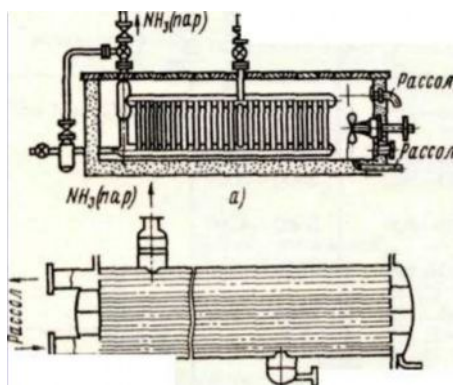
При анализиране работата на изпарителите и техния подбор, трябва да се имат предвид следните фактори:

- скоростта на охлаждащия топлоносител трябва да е в границите от 1,5 до 2м/сек
- концентрацията на разсола – солевия разтвор трябва да се избира по възможност най-малка
- разликата между температурите на изпаряващия се хладилен агент и охлаждащата среда да бъде в границите на 5-6°C
- загубата в налягането на топлоносителя при движението в изпарителя се дължи на местни загуби и загуби при движение в тръбопроводите



- изпарителите за охлаждане на разсола се снабдяват със специална помпа, чиято производителност се определя от топлинните условия.

Някои типове изпарители са представени на фиг.107.



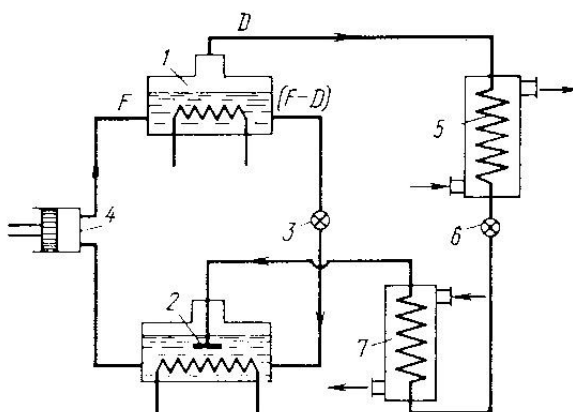
Фиг.107. Изпарители  
а – вертикален секционен; б - хоризонтален кожухотръбен

## 2. Абсорбционни и прожекторни хладилни машини

### 2.1. Принцип на действие и приложение на абсорбционните хладилни машини

Произвеждането на студ в абсорбционните хладилни машини, както и при компресорните се извършва за сметка на изпарението на течен хладилен агент в изпарител последвано от свиването му в кондензатор. За разлика от компресорните машини в абсорбционните хладилни машини, кръговия процес е съпроводен със загуба на топлинна енергия от вън и се извършва с помощта на така наречения термокомпресор.

В работният процес на абсорбционната хладилна машина участвуват две вещества – едно от които се явява хладилен агент, а другото служи за погълтител(абсорбер). Най-разпространената бинарна смес е водно-амонячния разтвор, в който амоняка служи за хладилен агент, а водата за абсорбер. За високо температурни изпарения може да се използва системата фреон21 – диметилетер-тетра етилен гликол, а също и системата вода–литиев бромид(абсорбент). Схема на абсорбционна хладилна машина е представена на фиг.108.



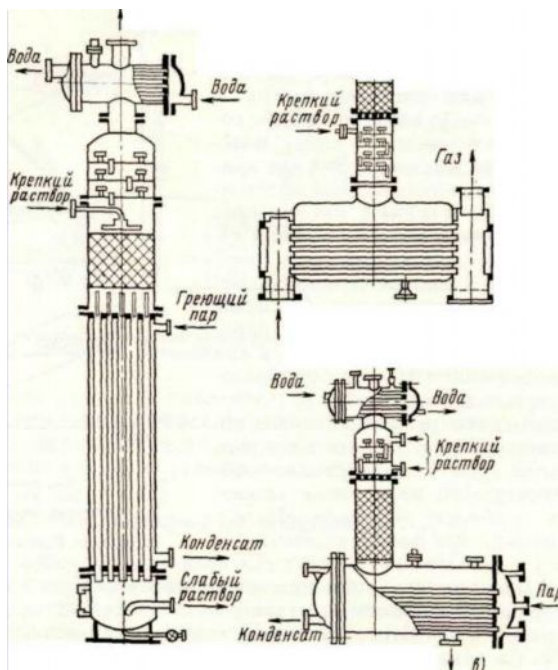
Фиг.108. Принципна схема на абсорбционна хладилна установка

Абсорбционните установки могат успешно да се конкурират с компресорните хладилни машини при наличие на евтин източник на топлина(или отпадна топлина). Възможни са комбинирани производства на топлина и студ на база ТЕЦ. Експлоатацията на абсорбционните инсталации е значително по-просто, тъй като отсъстват движещи се части(с изключение на помпата) и повърхността на топлообменните апарати не се покрива със слой масло, което значително влошава топлообмена.

## 2.2. Апарати за абсорбионни хладилни машини

### 2.2.1. Генератори

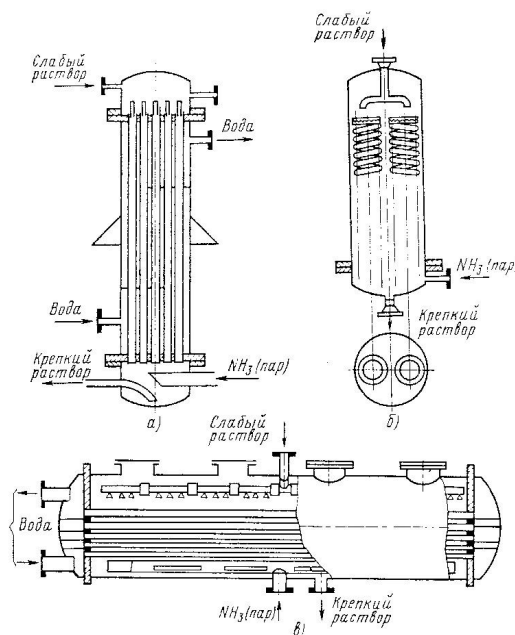
Генераторите, представени на фиг.109 служат за изпаряване на концентриран водно-амонячен разтвор. По конструкции кожухотръбните генератори се изпълняват като хоризонтални или вертикални. Генераторите могат да се нагряват с пара, газове или горещи течности.



Фиг.109. Конструктивни схеми на кожухотръбни генератори:  
а - вертикален; б - хоризонтален с газово нагряване; в - хоризонтален с парово нагряване

### 2.2.2. Абсорбери

Абсорберите представени на фиг.110, служат за поглъщане на парите на слабия водно амонячен разтвор от изпарителя. В конструкциите на абсорбера, трябва да се предвиди възможност за отвеждане топлината на абсорбция. Най-често абсорберите се охлаждат с вода. Абсорберите се изпълняват като кожухотръбни, хоризонтални и вертикални със змиевици или оросители.



Фиг.110. Конструктивни схеми на абсорбери

### 2.2.3. Ректификатори

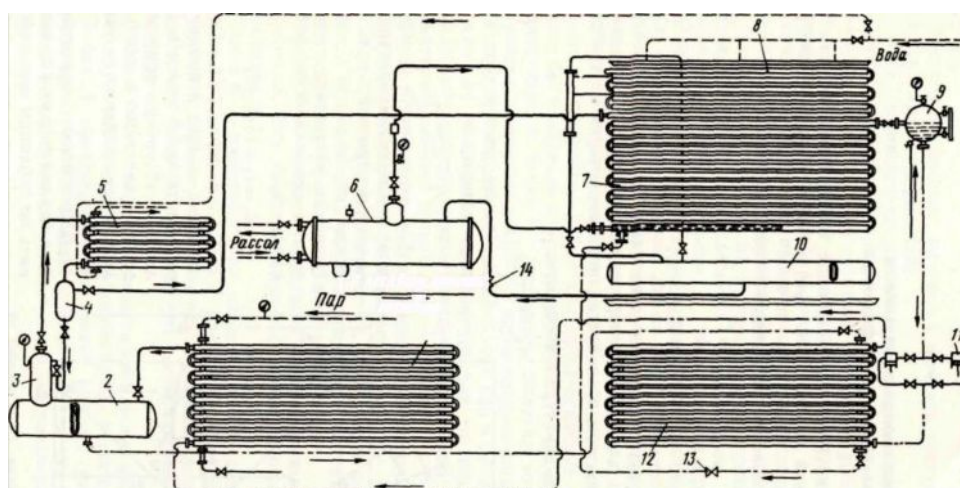
Ректификаторите са предназначени за повишаване и изравняване концентрациите на парите, образуващи се в генератора. Ректификаторите обикновено се монтират в горната част на генератора и конструкцията им е колонен апарат с тарелки или с пълнеж. Най-често пълнежа е от керамични пръстени. В ректификатора непосредствено контактуват издигащите се пари и оросяваната течност. За следващото отделяне на водните пари се използват повърхностните дефлегматори, охладени с вода или охладен разтвор.

### 2.2.4. Теплообменници

Теплообменниците се изпълняват като двутръбни за малки и средни машини и кожухотръбни за големи хладилни машини. Кондензаторите и изпарителите на абсорбционните машини по конструкции не се различават от аналогичните апарати на компресорните хладилни машини.

## 2.3. Компановка на абсорбционните хладилни машини

Абсорбционните хладилни машини представени на фиг.111, най-често се монтират в помещения при специални определени условия. Те могат да се монтират и извън помещения на разглобяеми конструкции. Взаимното разположение на апаратите на абсорбционната машина и начина на тяхното свързване зависи от типа на апаратите, студопроизводителността и предназначението на установката. Обикновено, всяка машина се снабдява с ресивери, за концентриран разтвор и течен амоняк.



Фиг.111. Схема на абсорбционна хладилна машина със студопроизводство 30000 ккал/ч:

1 – генератор; 2 - ресивер за слаб разтвор; 3 - ректификационна колона; 4 - сепаратор; 5 - ректификатор; 6 - изпарител; 7 - абсорбер; 8 - кондензатор; 9 - ресивер за силен разтвор; 10 - ресивер за течен амоняк; 11 - водоомомячна помпа; 12 - теплообменник; 13 и 14 - регулируеми вентили съответно за слаб разтвор и течен амоняк

## 3. Инсталации за дълбоко охлаждане

### 3.1. Термодинамика на дълбокото охлаждане

За сгъстени газове и разделяне на газови смеси, температурата на които е значително под  $0^{\circ}\text{C}$  се използва принципа на дроселиране на газа, или неговото разширение в декомпресор.

### 3.2. Дроселиране на газове

Дроселираният ефект на газовете се състои в това, че при разширение на сгъстени газове до много ниски налягания, без извършване на външна работа и без обмен на топлина с околната среда,



тяхната температура се променя. Съществуват диференциален и интегрален дроселен ефект . Тези ефекти определят изменението на температурата при безкрайно малко изменение на налягането и при значително изменение на налягането.

### 3.3. Адиабатично разширение на газове смеси

Един от често използваните методи е адиабатично разширение на газа с извършване на външна работа. Този начин за получаване на студ е основан на охлаждането на газове в процеса на разширение с отдаване на външна работа при отсъствие на топлообмен с околна среда (изоентропично разширение).

Разширението на газовете се осъществява в разширителна машина(декомпресор) - двигател, работещ със сгъстен газ. Разширителните машини се изпълняват като бутални декомпресори, както и като турбодеконпресори.

### 3.4. Разделяне на газове смеси

За разделяне на газове смеси по метода на дълбокото охлаждане се използват :

- **фракционна кондензация на газова смес** – процес при който температурата на кипене на отделните компоненти на сместа значително се различават. При сгъстяване на газова смес кондензира само един компонент или цяла група, докато останалите компоненти остават газообразни;

- **ректификация на сгъстената газова смес** – когато кондензират всички съставни части на сместа, тъй като температурата на кипене на отделните компоненти малко се различават. Като пример за фракционна кондензация могат да се посочат разделянето на водния газ, коксовия газ и др.

