

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ім. адмірала МАКАРОВА
ХЕРСОНСЬКА ФІЛІЯ**

К.В.Луняка, В.О.Ардашев, Б.В.Димо, Д.В.Коновалов

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК
з дисципліни**

Теплотехнологічні процеси та установки

Напрямок підготовки: .050601 «Теплоенергетика»

Спеціальність 7.05060101 «Теплоенергетика»



Херсон – 2018

УДК 621.311.22.001.63 (075.8)

ББК

Л.....

АВТОРИ:

К.В.Луняка, д.т.н., професор, В.О.Ардашев, к.т.н, доцент, Б.В.Димо, к.т.н., професор, Д.В.Коновалов, к.т.н., доцент.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

М.І. Радченко, д.т.н., професор, завідувач кафедри кондиціонування та рефрижерації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
 Д.О. Дмитрієв, д.т.н., професор кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського Національного технічного університету
 С.А. Русанов, к.т.н., доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського Національного технічного університету

*Рекомендовано вченою радою
 Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова
 (протокол № 2 від 23.02.2018 р.)*

Луняка К.В., Ардашев В.О., Димо Б.В.,
 Л.... Коновалов Д.В. Теплотехнологічні процеси та установки. Навчальний посібник. – Херсон: ХНТУ, 2018. – 93 с.

ISBN.....

Навчальний посібник призначений для вивчення курсу «Теплотехнологічні процеси та обладнання» студентами спеціальності «Теплоенергетика». У посібнику наведені короткі теоретичні відомості щодо теплотехнологічних процесів, будова обладнання, технологічні схеми за участі теплових та тепломасообмінних процесів, таких, як нагрівання, охолодження до звичайних та низьких температур, випарювання, сушіння.

УДК 621.311.22.001.63 (075.8)

ББК.....

© Луняка К.В., Ардашев В.О.,
 Димо Б.В., Коновалов Д.В.

© НУК ім. адм. Макарова, 2018.

ISBN.....

ВСТУП

Навчальний посібник призначений для вивчення навчальної дисципліни «Теплотехнологічні процеси та установки» студентами, які опановують спеціальність «Теплоенергетика».

Дисципліна «Теплотехнологічні процеси та установки» є однією з базових у структурі підготовки фахівців названої спеціальності. Вона вивчається у восьмому семестрі й опирається на фундаментальні дисципліни – фізику, математику та дисципліни загальноінженерної підготовки – теоретичні основи теплотехніки, основи конструювання та ін.

Дисципліна складається з лекцій та практичних занять, а також передбачає виконання курсового проекту. У даному посібнику наведений мінімальний обсяг теоретичних знань, потрібних студенту для опанування предметом. Основні розрахунки обладнання наведені у спеціальному посібнику для рішення задач.

До теплотехнологічних процесів слід віднести нагрівання, охолодження до звичайних температур та конденсацію, які проводяться у теплообмінних апаратах; процеси випарювання та кристалізації, для проведення яких потрібне нагрівання або охолодження, тому теплообмінні апарати є складованими частинами випарних або кристалізаційних установок; сушіння та охолодження до низьких температур.

1. ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ

1.1. Загальна характеристика теплових процесів

В теплових процесах беруть участь не менш як два середовища з різними температурами. Середовище з більш високою температурою, яке віддає при теплообміні тепло, називається теплоносієм, середовище з більш низькою температурою – холодильним агентом (холодоагентом).

Основною характеристикою будь-якого теплового процесу є кількість теплоти, що передається; від цієї величини залежать розміри теплообмінної апаратури. Основним розміром є поверхня теплообміну. Зв'язок між кількістю тепла, що передається в апараті, і поверхнею теплообміну F визначається основним кінетичним рівнянням (основне рівняння теплопередачі):

$$dQ = k \cdot \Delta t \cdot dF \cdot d\tau. \quad (1.1)$$

Для сталого процесу в одиницю часу:

$$Q = k \cdot \Delta t_{сер} \cdot F, \quad (1.2)$$

де Q – кількість теплоти, яка передається через всю поверхню теплообміну,

Дж (1.1) або *Вт* (1.2);

k – коефіцієнт теплопередачі між середовищами, середній для всієї

поверхні теплообміну, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;

$\Delta t_{сер}$ – середня різниця температур $К$;

F – поверхня теплообміну, $м^2$.

З (1.2) визначають F , але для цього ще треба знайти величини Q , k і $\Delta t_{сер}$.

Найбільш складною задачею є визначення k і $\Delta t_{сер}$. Цією задачею займається наука теплопередача.

Основними способами розповсюдження тепла є теплопровідність, конвекція і теплове випромінювання.

Теплопровідністю називається процес розповсюдження тепла між частинками тіла, які знаходяться у безпосередньому контакті. Спостерігається в твердих тілах і в тонких шарах рідин або газів.

Конвекція – процес перенесення тепла внаслідок руху й перемішування макроскопічних об'ємів газів або рідин.

Теплове випромінювання – процес розповсюдження тепла у вигляді електромагнітних коливань.

На практиці, як правило, доводиться мати справу зі складним теплообміном, коли тепло передається одночасно, наприклад, конвекцією і тепловим випромінюванням, або теплопровідністю і конвекцією [3, 4, 11].

1.2. Передача тепла теплопровідністю

1.2.1. Закон Фур'є

Закон Фур'є:

Кількість теплоти dQ , що передана теплопровідністю, пропорційна градієнту температури $\frac{\partial t}{\partial n}$, часу $d\tau$ і площі перерізу dF , перпендикулярній напрямку теплового потоку, тобто:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau, \quad (1.3)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, $\frac{Вт}{м \cdot К}$.

Коефіцієнт теплопровідності показує, яка кількість теплоти проходить внаслідок теплопровідності через $1 м^2$ поверхні теплообміну за одиницю часу при різниці температур в $1 К$, що припадає на $1 м$ довжини нормалі до ізотермічної поверхні.

Значення коефіцієнта теплопровідності залежать від природи й агрегатного стану речовини, а також від умов. Так, для газів і твердих речовин з підвищенням температури λ , як правило, зростає, а для рідин – зменшується (виняток складають вода і гліцерин). Тиск, коли його значення не дуже великі, на коефіцієнт теплопровідності впливає мало [3, 4, 12].

1.2.2. Диференціальне рівняння теплопровідності

Це рівняння виводять на основі закону збереження енергії, при цьому припускаються, що тепло розповсюджується в тілі (середовищі), яке має густину ρ , теплоємність c , теплопровідність λ . Причому, ці параметри сталі за напрямками й у часі.

Для виведення диференціального рівняння теплопровідності у середовищі виділяємо паралелепіпед з ребрами довжиною dx , dy і dz . В паралелепіпед входить тепла уздовж осі x Q_x , виходить $-Q_{x+dx}$ (рис. 1.1).

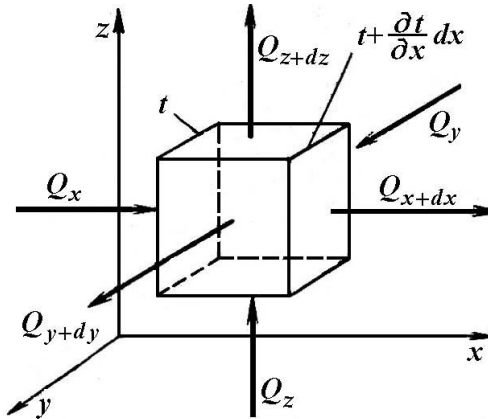


Рис. 1.1. До виведення диференціального рівняння теплопровідності.

Різниця між кількістю тепла, що входить в паралелепіпед, і виходить з нього (тепло, яке залишається в об'ємі):

$$dQ = (Q_x - Q_{x+dx}) + (Q_y - Q_{y+dy}) + (Q_z - Q_{z+dz}).$$

Згідно із законом Фур'є

$$Q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dydzd\tau \quad \text{і}$$

$$Q_{x+dx} = -\lambda \frac{\partial \left(t + \frac{\partial t}{\partial x} dx \right)}{\partial x} dydzd\tau = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dydzd\tau - \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx dydzd\tau.$$

Аналогічно

$$Q_y - Q_{y+dy} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} dx dydzd\tau \quad \text{і} \quad Q_z - Q_{z+dz} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} dx dydzd\tau.$$

Складаємо ліві і праві частини:

$$dQ = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) dx dydzd\tau. \quad (1.4)$$

На основі закону збереження енергії кількість тепла, котре йде на зміну ентальпії паралелепіпеду за час τ

$$dQ = c\rho dx dy dz \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau. \quad (1.5)$$

Зіставляючи (1.4) і (1.5), отримуємо диференціальне рівняння теплопровідності Фур'є:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \underbrace{\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)}_{\nabla^2 t - \text{оператор Лапласа}}, \quad (1.6)$$

$$\frac{\lambda}{c\rho} = a, \quad (1.7)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с.

Таким чином, (1.6) можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t. \quad (1.8)$$

1.2.3. Теплопровідність плоскої одношарової стінки

Розглядається плоска стінка товщиною δ з однорідного матеріалу, який має коефіцієнт теплопровідності λ . Температура на протилежних зовнішніх поверхнях стінки t_{w1} і t_{w2} ($t_{w1} > t_{w2}$).

Для виведення рівняння теплопровідності плоскої стінки використовується диференціальне рівняння Фур'є (1.6). При цьому отримане рівняння:

$$dQ = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} dF d\tau,$$

або

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{w1} - t_{w2}) F \tau, \quad (1.9)$$

де $\frac{\lambda}{\delta}$ – теплова провідність стінки, $\frac{\delta}{\lambda}$ – термічний опір.

1.2.4. Теплопровідність плоскої багатшарової стінки

Рівняння для теплопровідності плоскої багатшарової стінки виводиться з (1.9) і має вигляд:

$$Q = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} (t_{w1} - t_{w2}) F \tau, \quad (1.10)$$

де n – кількість шарів, i – номер шару.

1.2.5. Теплопровідність циліндричної стінки (труби)

Для циліндричної одношарової стінки середня площа теплообміну:

$$F_{сер} = \pi d_{сер} L = \frac{\pi(d_2 - d_1)L}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (1.11)$$

де d_1 і d_2 – внутрішній і зовнішній діаметри.

Рівняння теплопровідності для сталого теплового потоку крізь одношарову циліндричну стінку:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{w1} - t_{w2}) F_{сер} = \frac{2\pi\lambda(t_{w1} - t_{w2})L}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (1.12)$$

де L – довжина циліндру, м.

Якщо відношення $d_1/d_2 < 2$, можна середню площу підрахувати за формулою:

$$F_{сер} = \frac{\pi(d_1 + d_2)L}{2}. \quad (1.13)$$

Рівняння теплопровідності для сталого теплового потоку крізь багатшарову циліндричну стінку:

$$Q = \frac{2\pi L(t_{w1} - t_{w2})}{\sum \frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_3}{d_{вн}}} = \frac{2\pi L(t_{w1} - t_{w2})}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots}. \quad (1.14)$$

Тут $d_{вн}$ і d_3 – внутрішній і зовнішній діаметри кожного циліндричного шару.

1.3. Теплове випромінювання і променевий теплообмін

Здатність тіла до теплового випромінювання E_0 визначається за законом Стефана – Больцмана:

$$E_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (1.15)$$

де T – абсолютна температура тіла, К;

c_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

$c_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4\text{)}$.

Цей закон виведений для абсолютно чорного тіла (індекс “0”).

Він справедливий також для будь-якого тіла:

$$E = c \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1.16) \quad c = \varepsilon c_0, \quad (1.17)$$

де $\varepsilon = 0 \div 1$ – відносна здатність до випромінювання, або ступінь чорноти тіла (наведена у довідниках) [2, 3, 13].

Для розрахунку променевого теплообміну між двома тілами використовують рівняння:

$$Q_{1-2} = c_{1-2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F, \quad (1.18)$$

де c_{1-2} – приведений коефіцієнт променевипромінювання системи тіл; дорівнює

для плоских тіл, які розташовані паралельно:

$$c_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0}}; \quad (1.19)$$

для випадку, коли одне тіло (площа поверхні F_2) повністю охоплює інше тіло (площа поверхні F_1) (приклад – піч, встановлена у приміщенні):

$$c_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_0} \right)}. \quad (1.20)$$

1.4. Конвективний теплообмін (тепловіддача)

Під конвективним теплообміном розуміють процес розповсюдження тепла у рідині (газі) від поверхні твердого тіла або до його поверхні одночасно конвекцією і теплопровідністю. Конвективний теплообмін інакше називається тепловіддачею зіткненням або просто тепловіддачею.

Теплота розповсюджується від поверхні твердого тіла до рідини крізь граничний шар за рахунок теплопровідності, а від граничного шару в масу рідини – переважно конвекцією.

На тепловіддачу суттєво впливає характер руху рідини. Вільний рух рідини, або вільна конвекція, виникає внаслідок різниці густин нагрітих і холодних частинок рідини. Примусовий рух виникає під дією насоса або вентилятору і визначається фізичними властивостями рідини, швидкістю її руху, формою й розмірами каналу. При турбулентному русі теплообмін протікає більш інтенсивно, ніж при ламінарному [3, 4, 14].

1.1.4.1. Закон тепловіддачі

Тепловіддача описується законом Ньютона:

Кількість тепла dQ , що передається від поверхні теплообміну до оточуючого середовища, прямопропорційна поверхні теплообміну dF , різниці температур поверхні t_w і оточуючого середовища t_f та часу $d\tau$:

$$dQ = \alpha(t_w - t_f)dF d\tau, \quad (1.21)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$.

При сталому процесі за одиницю часу:

$$Q = \alpha(t_w - t_f)F. \quad (1.22)$$

Основною задачею при розрахунках процесу тепловіддачі є визначення α . Це досить складна задача, оскільки α залежить від багатьох чинників – режиму і швидкості руху рідини, її фізичних параметрів, форми й розмірів поверхні теплообміну і т. ін.

1.1.4.2. Диференціальні рівняння конвективного перенесення теплоти

Конвективний теплообмін описується системою диференціальних рівнянь:

Рівняння руху Нав'є-Стокса показує, що прискорення маси на одиницю об'єму дорівнює сумі усіх сил, діючих на об'єм:

$$\rho \frac{d\bar{w}}{d\tau} = \rho \bar{g} - \bar{\nabla} P + \mu \nabla^2 \bar{w}. \quad (1.23)$$

1. Рівняння енергії описує поле температур рідини, що рухається:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \left(w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (1.24)$$

2. Рівняння суцільності описує зміну густини рідини, що рухається:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + w_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + w_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = -\rho \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right). \quad (1.25)$$

3. Рівняння тепловіддачі зв'язує α з полем температур «прилиплої» рідини

$$\alpha = -\frac{\lambda}{(t_c - t_p)} \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_{n=0}, \text{ або } -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha(t_w - t_f), \quad (1.26)$$

де $\bar{\nabla} P$ – градієнт тиску; $\bar{w}$ – швидкість руху потоку.

До рівнянь додають умови однозначності: геометричні, часові, фізичні й граничні. Рішення складне, тому дослідження проводять експериментальним шляхом, а результати представляються у вигляді критеріальних рівнянь.

1.1.4.3. Критеріальне рівняння тепловіддачі

Для отримання критеріїв подібності (1.26) ділимо на ліву частину і отримуємо безрозмірний комплекс:

$$\frac{\alpha(t_w - t_f)dn}{\lambda dt} = \frac{\alpha \Delta t dn}{\lambda d\tau} \quad (1.27)$$

Викреслюємо символи диференціювання, різниці, замінюємо напрямлений параметр n на ненапрямлений l , і провівши скорочення, отримуємо критерій Нуссельта:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (1.28)$$

У (1.24) ділимо всі складові на $\frac{\lambda}{c \cdot \rho} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$ і отримуємо безрозмірні комплекси:

$$\frac{\partial t \partial x^2}{\partial \tau a \partial^2 t} \quad \text{і} \quad \frac{\partial t w_x \partial x^2}{\partial x a \partial^2 t} \quad .$$

Провівши вказані вищезгадані операції, отримаємо:

критерій Фур'є:

$$\text{Fo} = \frac{a \tau}{l^2} \quad (1.29)$$

критерій Пекле:

$$\text{Pe} = \frac{w l}{a} \quad (1.30)$$

Nu , Fo , Pe – критерії теплової подібності. Характеризують: Nu – інтенсивність теплообміну на границі поділу фаз; Fo – зв'язок між швидкістю зміни температурного поля, розмірами та фізичними характеристиками середовища в нестационарних теплових процесах; Pe – відношення кількостей тепла, які розповсюджуються в потоці рідини конвекцією і теплопровідністю.

$$\text{Pe} = \frac{w l}{a} = \frac{w l}{\nu} \cdot \frac{\nu}{a} = \text{Re} \cdot \text{Pr} \quad (1.31)$$

Pr – критерій Прандтля – характеризує поле теплофізичних величин потоку рідини

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu}{a \rho} = \frac{\mu g}{a \gamma} = \frac{\mu c}{\lambda} \quad (1.32)$$

У випадках, коли теплообмін відбувається в результаті природної конвекції, яка обумовлена різницею густин рідини в різних точках системи, процес характеризується значенням критерію Архімеда:

$$Ar = \frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1}, \quad (1.33)$$

де ρ_1 і ρ_2 – густини холодної і нагрітої рідини.

В теплових процесах різниця густин у різних точках обумовлена різницею температур нагрітої і холодної рідини, тому відношення $\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1}$ в критерії Архімеда замінюють добутком $\beta \Delta t$ і отримують критерій Грасгоффа:

$$Gr = \beta \frac{gl^3}{\nu^2} \Delta t = \beta \Delta t Ga, \quad (1.34)$$

де β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини;

Ga – критерій Галілея.

Gr характеризує гідродинамічний режим потоку рідини в умовах природної конвекції, яка відбувається під впливом різниці густин нагрітої і холодної поверхонь.

Отримані критерії подібності дозволяють знайти критеріальне рівняння конвективного перенесення тепла:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr, Fo). \quad (1.35)$$

Це рівняння спрощується, якщо розглядається процес в конкретних умовах – при стаціонарних процесах виключається Fo ; при примусовому русі – Gr , при вільному русі – Re . Наприклад, для стаціонарного розвиненого руху в прямих трубах і каналах критеріальне рівняння має вигляд:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \varepsilon_l, \quad (1.36)$$

де коефіцієнт ε_l враховує вплив на коефіцієнт тепловіддачі відношення довжини труби до її діаметру.

За критерієм Нуссельта розраховують коефіцієнт тепловіддачі α , користуючись рівнянням (1.28).

Рівняння типу (1.36) з коефіцієнтами і показниками ступенів для кожного конкретного випадку теплообміну наведені у довідниках [2, 5, 10].

1.1.4.4. Тепловіддача при зміні агрегатного стану

Прикладом таких процесів є випаровування, конденсація, плавлення, кристалізація та ін. Особливості таких процесів теплообміну полягають у тому, що тепло підводиться до матеріалів або відводиться від них при постійній температурі й розповсюджується не в одній, а у двох фазах. Ці особливості

враховуються введенням в критеріальне рівняння додаткового критерію, який враховує теплоту зміни агрегатного стану.

Розглянемо *процес теплообміну при конденсації пари*. Введемо позначення: dF – елементарна площадка на поверхні розділу Р-П; ω – лінійна швидкість рідини, яка утворюється при конденсації; r – теплота пароутворення.

Для випадку конденсації нерухомої пари Нуссельтом запропонована схема плівкової конденсації при відсутності крапельної конденсації. Критеріальне рівняння цього процесу:

$$Nu = B(Pr \cdot K \cdot Ga)^{0,25}. \quad (1.37)$$

У критеріальне рівняння входить K – критерій теплової подібності при зміні агрегатного стану.

$$K = \frac{r}{c\Delta t}, \quad (1.38)$$

де Δt – різниця між температурою фазового перетворення і температурою однієї з фаз.

За Nu і (1.28) знаходять α :

$$\alpha = C^4 \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 g \rho^2 r}{H \Delta t \mu}}, \quad (1.39)$$

де C – коефіцієнт, який дорівнює 0,943 для вертикальної стінки і 0,728 (або 0,725) для горизонтальної труби;

α , ρ , μ беруться для конденсату при середній температурі плівки $t = 0,5(t_s + t_w)$;

t_s – температура насиченої пари;

t_w – температура стінки;

$\Delta t = t_s - t_w$;

H – визначальний розмір (висота стінки, діаметр труби і т. ін.).

На коефіцієнт тепловіддачі впливає режим руху потоку, характер поверхні стінки (гладка чи шорстка) та вміст газів (1% повітря в парі знижує α на 60 %) [5, 6, 11].

1.1.5. Складний теплообмін

Одним з найважливіших випадків є процес розповсюдження теплоти одночасно конвекцією і тепловим випромінюванням. Кількість теплоти, що передається за рахунок конвективного теплообміну, визначається з (1.22), за рахунок теплового випромінювання – (1.18). Поєднавши ці рівняння, отримують загальну кількість теплоти, яку віддає стінка за одиницю часу:

$$Q = Q_{\text{конв}} + Q_{\text{випр}} = (\alpha + \alpha_{\text{випр}})(t_w - t_f)F, \quad (1.40)$$

або

$$Q = \alpha^*(t_w - t_f)F, \quad (1.41)$$

де α^* – приведений коефіцієнт тепловіддачі.

Орієнтовні значення α^* в оточуюче повітря від поверхні апаратів, що знаходяться у закритих приміщеннях, при температурі зовнішньої стінки апарату $t_{\text{ст. зовн.}} = 50 \div 350 \text{ } ^\circ\text{C}$ можна виконати за формулою [9]:

$$\alpha^* = 9,3 + 0,058 t_{\text{ст. зовн.}} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}} \right), \quad (1.42)$$

або при температурі поверхні апарату до $150 \text{ } ^\circ\text{C}$ [6]:

$$\alpha^* = 9,74 + 0,07 \Delta t \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}} \right), \quad (1.43)$$

де Δt – різниця температур поверхні апарату і оточуючого повітря.

1.6. Теплопередача

В теплових процесах здійснюється теплопередача від одного теплоносія до іншого, причому, теплоносії розділені перегородкою.

Коефіцієнт теплопередачі в рівнянні (1.1) або (1.2) є сумарним; він враховує перехід тепла від ядра першого потоку до стінки (тепловіддача), через стінку (теплопровідність) і від стінки до ядра другого потоку (тепловіддача). При сталому процесі кількість тепла, що передається в одиницю часу через площадку F від ядра першого потоку, дорівнює кількості тепла, яке передається через стінку і від стінки до ядра другого теплоносія [3, 5, 12].

Тепловіддача: $Q = \alpha_1 (t_{f_1} - t_{w_1}) F,$

теплопровідність: $Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{w_1} - t_{w_2}) F,$

тепловіддача: $Q = \alpha_2 (t_{w_2} - t_{f_2}) F.$

Прирівнявши між собою ці рівняння і (1.2), отримують коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1.44)$$

або термічний опір теплопередачі:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (1.45)$$

Для багат шарової стінки

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (1.46)$$

1.7. Рушійна сила теплових процесів

“Рушійною силою” теплових процесів є різниця температур між теплоносіями. Вона в процесі теплообміну не зберігає сталих значень, тому користуються середньою різницею температур $\Delta t_{сер}$, яка розраховується за рівнянням:

$$\Delta t_{сер} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{м}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{м}}} . \quad (1.47)$$

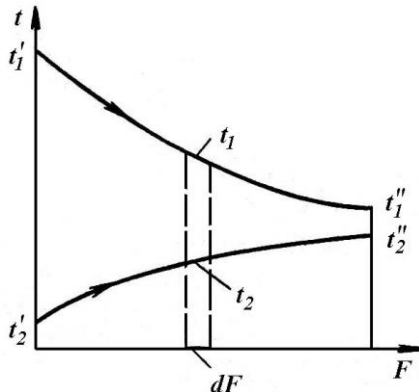


Рис. 1.2. Зміна температури теплоносіїв уздовж поверхні теплообміну при прототечії.

Треба відмітити, що (1.47) вважають приблизним рівнянням і щодо його точності є сумніви.

При невеликих змінах температур, коли $\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{м}} \leq 2$, беруть середнє арифметичне.

Наведені формули придатні для одноходових теплообмінників. Для багатоходових розрахунок середньої різниці температур ускладнюється [5, 7, 10].

Так, у багатоходових теплообмінниках з простою змішаною течією (один хід в міжтрубному просторі и парна кількість ходів у трубному) середню різницю температур можна розрахувати за формулою:

$$\Delta t_{сер.} = \frac{A}{\ln \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{м} + A}{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{м} - A}} , \quad (1.48)$$

де Δt_{δ} і $\Delta t_{м}$ — більша і менша різниці температур на кінцях теплообмінника при протитечії з тими ж початковими і кінцевими температурами теплоносіїв:

$$A = \sqrt{\delta t_{гар.}^2 + \delta t_{хол.}^2} ;$$

$$\delta t_{гар.} = t_{гар. поч.} - t_{гар. кін.} - \text{зміна температури гарячого теплоносія};$$

$$\delta t_{хол.} = t_{хол. поч.} - t_{хол. кін.} - \text{зміна температури холодного теплоносія}.$$

1.8. Нагрівання, охолодження, конденсація

Найчастіше як теплоносії використовуються водяна пара, димові гази та електричний струм.

1.8.1. Нагрівання водяною парою

Використовують насичену водяну пару з тиском 1,0-1,2 МПа. При цьому можна досягти температури нагрівання 180 °С [1, 7]. При нагріванні пара конденсується, виділяючи тепло, яке дорівнює теплоті випаровування рідини.

Переваги цього теплоносія:

1. Велика кількість тепла, що виділяється при конденсації (≈ 2000 кДж на 1 кг пари).

2. Високий коефіцієнт тепловіддачі від пари, що конденсується, до стінки [$\alpha=5555-11100$ Вт/(м²К)].

3. Рівномірність нагріву, оскільки конденсація пари здійснюється при постійній температурі.

Нагрівання можна проводити “гострою” і “глухою” парою.

“Гострою” називають пару, яка поступає в рідину, що нагрівається, через отвори в трубі або стінці посудини (барботер) і барботує крізь товщу рідини.

“Глуха” пара обігріває середовище крізь стінку посудини (труби), в якій вона знаходиться. Гріюча пара цілком конденсується і відводиться з парового простору у вигляді конденсату, температура якого дорівнює температурі насиченої гріючої пари.

Витрата пари визначається з рівняння матеріального балансу:

$$Gct_1 + Dh = Gct_2 + Dh_{\text{конд}} + Q_{\text{втр}}, \quad (1.49)$$

де G – маса речовини, що нагрівається, кг;

c – питома теплоємність речовини, що нагрівається;

t_1 і t_2 – початкова і кінцева температури речовини;

D – витрата пари, кг;

h – ентальпія пари, кДж/кг;

$h_{\text{конд}}$ – ентальпія конденсату, кДж/кг;

$Q_{\text{втр}}$ – втрати тепла, кДж.

З рівняння матеріального балансу розраховують кількість пари, потрібної для нагрівання рідини.

$$D = \frac{Gc(t_2 - t_1) + Q_{\text{втр}}}{h - h_{\text{конд}}}. \quad (1.50)$$

1.8.2. Нагрівання топковими, або димовими, газами

При використанні топкових газів можна досягти температури 180-1000 °С. Димовий газ утворюється при спаленні твердого, рідкого або газоподібного палива в топках або печах різних конструкцій.

Особливості процесу: значний перепад температур між теплоносіями і невеликі коефіцієнти тепловіддачі від димових газів до стінок апаратів (17–34 Вт/м²·К); перегрівання матеріалів внаслідок нерівномірного обігріву призводить до їх окислення; процес пов'язаний з пожежною небезпекою.

При нагрівання до 420 °С для виготовлення апаратури використовують звичайні вуглецеві сталі, до 420-520 °С – леговані сталі, до 520-1000 °С – спеціальні жаротривкі сталі.

Нагрівання топковими газами здійснюється в трубчастих печах (рис. 1.3), в печах для реакційних котлів або в автоклавах [1, 7].

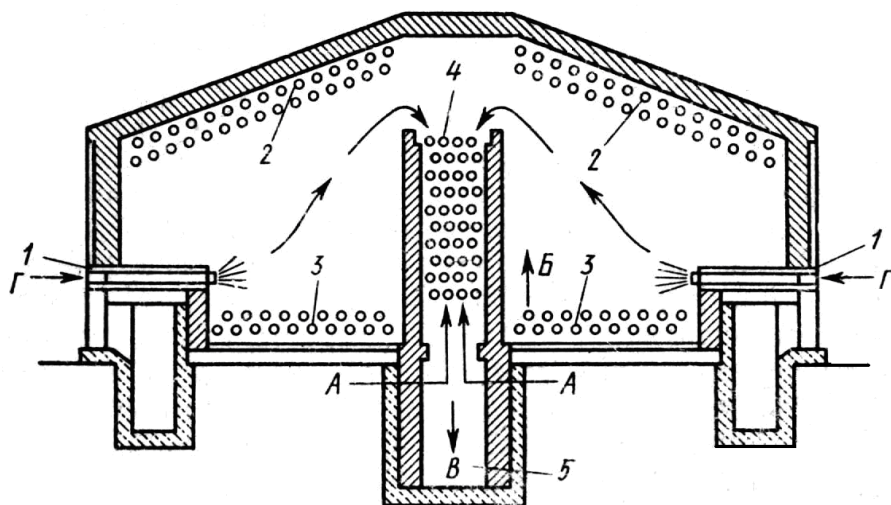


Рис. 1.3. Схема двокамерної печі з похилим склепінням:

1 – форсунка для палива; 2 – стельові екрани (радіантні труби); 3 – подові екрани; 4 – конвекційна камера; 5 – димар. А – вхід сировини; Б – продукт на вихід; В – вихід топкових газів; Г – паливо.

1.8.3. Нагрівання електричним струмом

Для цього використовують електричні печі, які бувають печі опору, індукційні та дугові.

Печі опору підрозділяють на печі прямої дії і печі непрямої дії. В печах прямої дії нагрівальний елемент включається безпосередньо в електричний ланцюг. В печах непрямої дії тепло виділяється при проходженні струму по спеціальним нагрівальним елементам. Тепло передається променевипромінюванням, теплопровідністю і конвекцією. Нагрівати можна до 1000–1200 °С. Нагрівальними елементами є дріт або стрічка, виготовлені з ніхрому (20% Cr, 30-80% Ni і 0,5-50% Fe) або хром-залізо-алюмінієвих сплавів.

При проектуванні електропечей розраховують кількість тепла, яке необхідне для нагріву речовини і потужність нагрівального електричного пристрою.

В *індукційних печах* нагрівання здійснюється індукційними струмами. Апарат, який обігрівається, є сердечником соленоїда, який охоплює апарат. По соленоїду пропускають перемінний електричний струм, при цьому навколо соленоїда утворюється магнітне поле, котре викликає в стінках апарату ЕРС. Під дією вторинного струму, що виникає, стінки апарату нагріваються. Соленоїд виготовляється з мідного або алюмінієвого дроту.

В *дугових печах* відбувається нагрівання електричною дугою до температур 1300-1500 °С. Використовуються для плавлення металів, отримання карбиду кальцію, фосфору.

1.8.4. Охолодження до звичайних температур

Для цього використовують такі холодоагенти, як вода і повітря. Охолодження ведеться в теплообмінниках різних типів, які розглядаються далі.

Крім конструктивних розмірів теплообмінників, розраховують витрату води або повітря на охолодження з рівняння теплового балансу.

1.8.5. Конденсація

Існують два типи конденсації:

1) Поверхнева (просто конденсація) – пара, що конденсується, і охолоджуючий агент поділені стінкою, і конденсація пари відбувається на внутрішній або зовнішній поверхні холодної стінки.

2) Конденсація змішуванням – пара, яка конденсується, безпосередньо стикається з охолоджуючим агентом.

Як *поверхневі конденсатори* використовуються рекуперативні теплообмінники різних типів.

В *конденсаторах змішування* відбувається безпосередній контакт пари з охолоджуючим агентом (водою) – див. рис. 2.14 і 2.15.

При розрахунках конденсаторів визначають необхідну кількість охолоджуючої води з рівняння теплового балансу.

Крім витрати води розраховують висоту барометричної труби для відведення води й конденсату, а також кількість повітря, яке відсмоктується з конденсатору.

2. ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ

2.1. Призначення і класифікація апаратів

Теплообмінні апарати призначені для перенесення теплоти від одного (гарячого) середовища до іншого (холодного).

Використовують 4 типи теплообмінних апаратів:

1. Рекуперативні, або поверхневі, в яких тепло передається від одного теплоносія до іншого крізь стінку;

2. Регенеративні, в яких чергуються процеси нагрівання і охолодження теплообмінної насадки;

3. Змішувальні, в яких теплообмін здійснюється при безпосередньому зіткненні теплоносіїв.

4. Акумулятори теплоти, в яких теплота виділяється за рахунок внутрішніх джерел, або при фазовому переході.

За призначенням усі теплообмінні апарати можна поділити на підігрівачі, випарники, конденсатори холодильники.

За напрямом руху теплоносіїв теплообмінники бувають прототечійні, протитечійні, перехресного струму та ін.

При виборі теплообмінників слідують таким рекомендаціям:

1. При високому тиску теплоносіїв перевагу віддають трубчастим теплообмінникам. У трубний простір прямує теплоносій з вищим тиском.

2. Теплоносій, який спричиняє більшу корозію, доцільно направляти по трубах, оскільки їх легше замінити.

3. Для теплоносіїв, що спричиняють значну корозію, доцільніше використовувати апарати з полімерних матеріалів.

4. Забруднені матеріали (теплоносій) слід направляти так, щоб полегшити очищення поверхні нагріву [1, 2, 4].

2.2. Типові конструкції теплообмінників

2.2.1. Рекуперативні апарати

У рекуперативних теплообмінниках теплота між теплоносіями передається через стінку [7, 8].

Основні конструкції:

- кожухотрубні;
- “труба в трубі”;
- пластинчасті;
- спіральні;
- теплообмінники з поверхнею, що утворена стінками апарату.

Сюди ж відносяться апарати, поверхня теплообміну яких виготовлена з неметалевих матеріалів: графіт, пластмаса, скло.

Найбільш розповсюджені **кожухотрубні**.

2.2.1.1. Кожухотрубні теплообмінники

Основними елементами кожухотрубних теплообмінників є пучки труб, трубні решітки, корпус, кришки, патрубки. За ДСТУ 9929-91 виготовляють апарати таких типів:

- Н – з нерухомими трубними решітками (плитами);
- К – з температурним компенсатором на кожусі;
- П – з плаваючою голівкою;
- У – з U-подібними трубами;
- ПК – з плаваючою голівкою і компенсатором на ній.

У характеристику теплообмінника входять:

- поверхня теплообмінника;
- тиск у трубному і міжтрубному просторах;
- діаметр кожуха;
- довжина, діаметр і товщина стінок теплообмінних труб;
- габарити теплообмінника.

Кожухотрубні теплообмінники бувають одно- і багатоходові. Так, теплообмінник, зображений на рис. 2.1, а, є одноходовим як по трубному, так і по міжтрубному простору. На рис. 2.1, б представлений багатоходовий по міжтрубному простору апарат; потрібна кількість ходів теплоносія у міжтрубному просторі досягається встановленням сегментних перегородок, завдяки чому збільшується час контакту між теплоносіями. На рис. 2.1, в бачимо багатоходовий теплообмінник, який має один хід у міжтрубному

просторі і два ходи у трубному. Назви окремих елементів кожухотрубних теплообмінників даються на рис. 2.2.

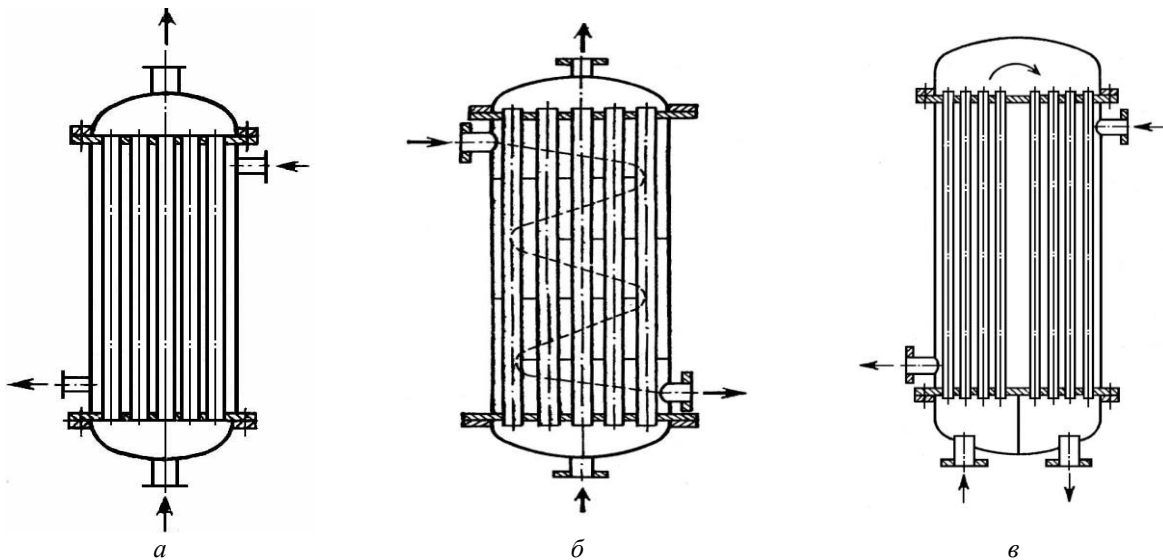


Рис. 2.1. Різні типи кожухотрубних теплообмінників:

a – одноходовий по трубному і по міжтрубному просторам; *б* – з сегментними поперечними перегородками (багатоходовий по міжтрубному простору); *в* – багатоходовий, який має один хід у міжтрубному просторі і два ходи у трубному.

В залежності від величини температурних подовжень трубок і корпусу застосовують апарати жорсткої, напівжорсткої і нежорсткої конструкції.

Теплообмінники з жорстким кріпленням труб в трубній решітці, в яких трубні решітки приварені до корпусу (апарати типу Н – рис. 2.2, *a*), надійно працюють при різниці температур труб і кожуха до 50 °С; коли $\Delta t > 50^\circ$, різниця у подовженні труб і кожуха стає значною, що призводить до порушення цілісності з'єднання труб і до руйнування конструкції.

В апаратах напівжорсткої конструкції температурні деформації компенсуються осьовим стисненням або розширенням лінзових компенсаторів (апарати типу К – рис. 2.2, *б*), при цьому забезпечується компенсація, яка не перевищує 10–15 мм, $P = 0,25$ МПа. В апаратах нежорсткої конструкції трубки і корпус мають можливість деякого переміщення, що дозволяє усунути додаткові напруги, які виникають від температурних подовжень. Можливість переміщення досягається сальниковими ущільненнями на патрубку або корпусі, застосуванням апаратів з плаваючою голівкою (рис. 2.2, *в*) або апаратів з пучком U-подібних труб (рис. 2.2, *г*), або апаратів з плаваючою голівкою і компенсатором на ній (рис. 2.2, *д*).

Один теплоносій іде в міжтрубний простір, а другий – в трубний.

Теплоносій, який більше забруднює поверхню обігріву або спричиняє більшу корозію, спрямовується в трубний простір, оскільки саме цей простір більш доступний для огляду та очищення. Якщо ці властивості теплоносіїв однакові, то в трубний простір доцільніше подавати теплоносій з меншим коефіцієнтом тепловіддачі, оскільки там можна забезпечити більшу швидкість руху теплоносія.

Теплоносії з дуже високою або низькою температурою пропускають крізь трубний простір для зменшення втрат тепла в оточуюче середовище.

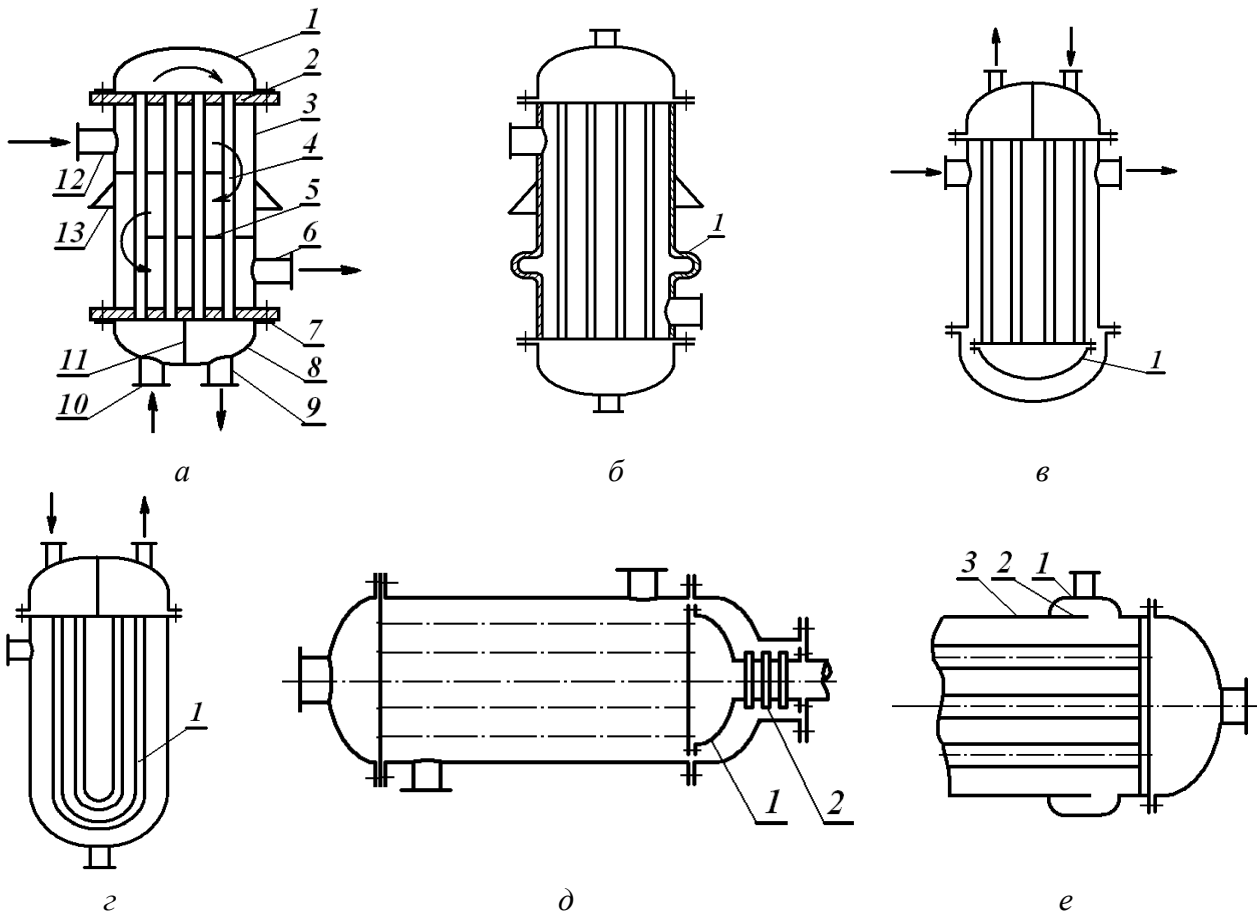
Середовища, як правило, рухаються протитечією. При цьому середовище, яке нагрівається, спрямовують знизу наверх.

Одноходові і багатоходові теплообмінники можуть бути вертикальні або горизонтальні. Горизонтальні, як правило, багатоходові і працюють при великих швидкостях теплоносіїв для того, щоб звести до мінімуму розшарування рідини внаслідок різниці температур і густин, а також щоб уникнути утворення застійних зон.

Оптимальні швидкості руху рідини відповідають сталому турбулентному режимові і дорівнюють для рідин: 0,1–3 м/с, а для газів 8–15 м/с.

Теплообмінники типу Н

Відносяться до апаратів жорсткої конструкції. Апарат типу «Н» (рис. 2.2.а) складається з верхньої і нижньої кришок 1 і 8, корпусу 3, трубок 4, перегородок в міжтрубному просторі 5, вхідного 12 і вихідного 6 патрубків гріючого теплоносія, вхідного 10 і вихідного 9 патрубків теплоносія, що нагрівається, верхньої і нижньої трубних плит 2, перегородки в нижній кришці 11. Теплообмінник встановлюється на лапи 13. Для наведеної схеми гріючий теплоносій рухається в міжтрубному просторі з перегородками 5, які дозволяють збільшити його швидкість, забезпечити більш інтенсивний теплообмін при поперечному обтіканні, а отже й більшу тепловіддачу.



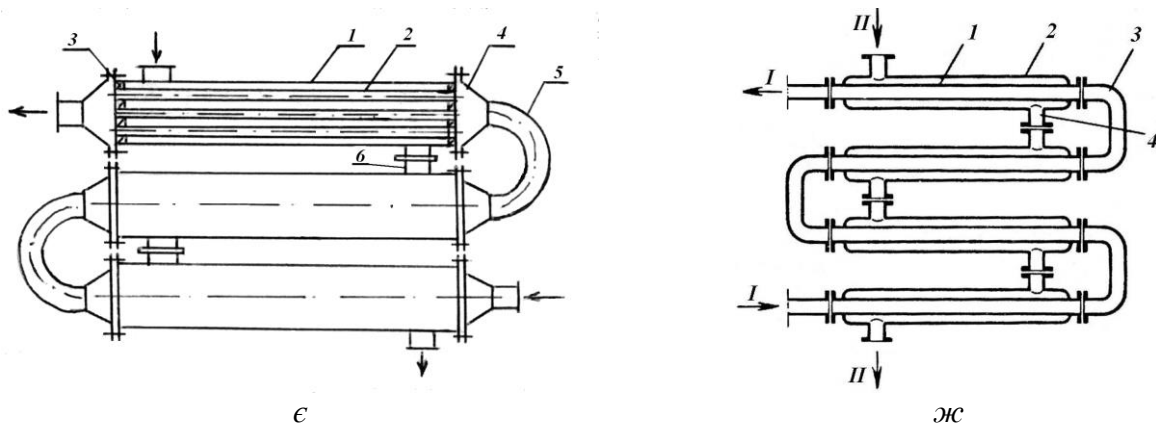


Рис. 2.2. Типові конструкції кожухотрубних теплообмінників:

а) апарат жорсткої конструкції:

1 – верхня кришка; 2 – трубна плита; 3 – корпус; 4 – труби; 5 – перегородки; 6 – вихідний патрубок гріючого теплоносія; 7 – прокладки; 8 – нижня кришка; 9 – вихідний патрубок теплоносія, що нагрівається; 10 – вхідний патрубок теплоносія, що нагрівається; 11 – перегородка; 12 – вхідний патрубок гріючого теплоносія; 13 – лапи;

б) з лінзовим компенсатором;

в) з плаваючою голівкою;

г) з U-подібними трубками: 1 – U-подібна трубка;

д) з плаваючою голівкою і компенсатором на ній: 1 – плаваюча голівка; 2 – компенсатор;

е) з розширювачем на корпусі: 1 – розширювач; 2 – розподільник; 3 – корпус;

є) секційний (елементний): 1 – корпус; 2 – труба; 3 – трубна плита; 4 – кришка; 5 – коліно; 6 – перехідні патрубки;

ж – двотрубний теплообмінник типу “труба в трубі”: 1 – внутрішня труба; 2 – зовнішня труба; 3 – коліно або калач; 4 – з’єднуючий патрубок.

Теплоносій, що нагрівається, рухається усередині труб, в трубному просторі, і сприймає через стінку труби теплоту від гріючого теплоносія. Теплообмінник може бути одно-, двох і багатоходовим (чотирьох і шести). За розташуванням у просторі теплообмінники бувають горизонтальні, вертикальні, похилі.

Різниця температурних подовжень в теплообмінниках типу Н зростає, якщо кожух (корпус) і трубки виготовлені з різних матеріалів (різні коефіцієнти лінійного розширення). Теплообмінники Н використовують при $\Delta t < 50^\circ\text{C}$ між кожухом і трубками. Температура кожуха близька до температури гріючого теплоносія, а трубок – до температури теплоносія з великим коефіцієнтом тепловіддачі. При пуску апаратів типу Н рекомендується спочатку направляти теплоносій в міжтрубний простір, а потім вже в трубний. Рекомендована швидкість теплоносія: для рідин не менше 1,5 м/с, газів 8–30 м/с. Переваги: простота й дешевизна; недоліки: складність очищення від забруднень зовнішньої поверхні труб.

Теплообмінники типу К

Для часткової компенсації температурних напруг використовують гнучкі елементи (розширювачі й компенсатори), розташовані на кожусі (рис. 2.3).

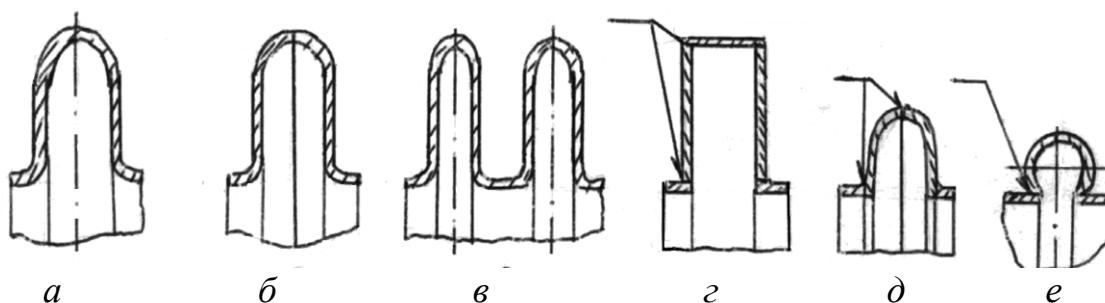


Рис. 2.3. Типи компенсаторів:

а) однолінзовий; б) зварений з двох напівлінз; в) двохлінзовий; г) з плоских кілець; д) з двох напівсферичних елементів; е) тороїдальний.

Лінзові компенсатори виготовляють обкаткою з коротких циліндричних обичайок. Напівлінзи виготовляють з листа штампуванням. Компенсуюча здатність лінзового компенсатора приблизно пропорційна їхній кількості, проте застосовувати більше 4-х не рекомендується, оскільки знижується опір кожуха вигину. Для збільшення компенсуючої здатності лінзового компенсатора можна його заздалегідь стиснути або розширити. На горизонтальних апаратах в нижній частині лінз свердлять дренажні отвори для зливу води після гідравлічних випробувань. Компенсатори типу *г, д, е* не мають широкого застосування через важкі умови роботи зварного шва.

В апаратах з розширенням (рис. 2.2, *е*) розширювач 1 на кожусі 3 компенсує напругу, а розподільник 2 дозволяє виключити застійні зони в міжтрубному просторі. Область використання апаратів типу К обмежена $P_{\text{вигин}} = 2,5 \text{ МПа}$.

Теплообмінники типу U

Такі апарати (рис. 2.2, *г*) мають одну трубну решітку, яка разом з розподільною камерою кріпиться до кожуха на фланці. Роздільне введення і виведення теплоносія забезпечується двома штуцерами і поділяючою перегородкою. Різниця температур стінок труб по ходах не повинна перевищувати $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ для виключення небезпечних температурних напруг в трубній решітці. Зовнішня поверхня труб незручна для механічного очищення, тому в міжтрубний простір рекомендується подавати середовище, яке не утворює відкладень. Внутрішню поверхню очищують хімічними реагентами або потоком рідини, яка містить абразивний елемент. Ці апарати не знайшли широкого застосування.

Теплообмінники типу П

В цих теплообмінниках одні трубні решітки нерухомо пов'язані з корпусом, а інші можуть вільно переміщатися в осьовому напрямку. З боку плаваючої голівки апарат закривається кришкою. В апаратах для забезпечення вільного переміщення трубного пучка його забезпечують опорною платформою. Поперечні перегородки в горизонтальних апаратах призначені для підтримки труб і додання жорсткості, а у вертикальних для отримання багатоходової конструкції. В апаратах типу П в трубному пучку встановлюють,

як правило, плаваючу голівку. Зазор між пучком труб і корпусом повинен бути якомога менше. Конструкція плаваючої голівки повинна забезпечити мінімальний зазор і легкість витягання трубного пучка з корпусу. Існують такі способи кріплення решіток і кришки плаваючої голівки: а) розрізним фланцем (рис. 2.4, а); б) розрізною скобою (рис. 2.4, б); в) розрізним кільцем (рис. 2.4, в); г) розрізним стрижньовим кільцем (рис. 2.4, г).

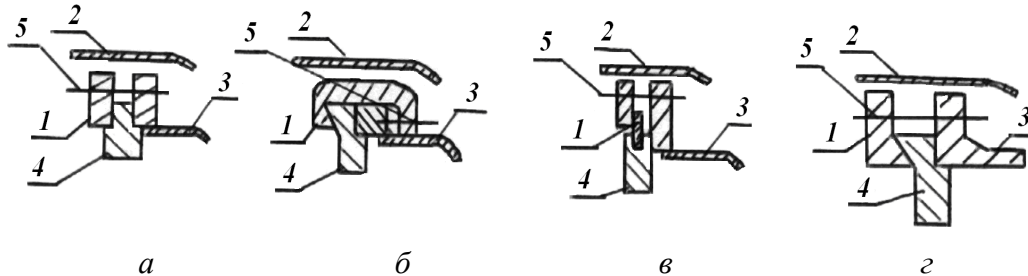


Рис. 2.4. Способи кріплення решітки і кришки плаваючої голівки:

а) розривним фланцем 1; б) розривною скобою 1; в) розривним кільцем 1; г) розривним зтягуючим кільцем 1. Позиції на рис.: 1 – стягуюче кільце; 2 – корпус апарату, 3 – кришка, 4 – трубна плита голівки, 5 – стяжний болт.

Теплообмінники типу ПК

Компенсація температурних напруг забезпечується гнучким елементом (компенсатором), встановленим на плаваючій голівці. Теплообмінники виконуються одноходовими з протитечієм рухом теплоносіїв. Компенсатори встановлюють на подовженому штуцері, вони відрізняються меншим діаметром, великою кількістю гофрів і меншою товщиною стінки. Перепад тиску не повинен перевищувати 2,5 МПа, тому теплоносії необхідно подавати в теплообмінник одночасно в трубний і міжтрубний простори.

Секційні теплообмінники.

Теплообмінники типу «труба в трубі»

Такі теплообмінники складаються з послідовно з'єднаних секцій (рис. 2.2, є). Секція складається з корпусу 1, труб 2, трубних плит 3, кришки 4. Між собою секції з'єднуються колінами 5 і перехідними патрубками 6. У середині труб рухається середовище, що нагрівається, а в міжтрубному просторі – гріюче. Поєднання елементів відповідає принципу багатоходового апарату. Теплообмінники ефективні, коли теплоносії рухаються з сумірними (рос.–соизмеримыми) швидкостями. Доцільно застосовувати при високому тиску середовищ. Відсутність перегородок зменшує гідравлічний опір. Секційні менш компактні й дорожчі, ніж кожухотрубі через більшу кількість фланців і трубних решіток. Поверхня теплообміну 0,75–30 м², кількість трубок 4–140.

Якщо секція складається з однієї трубки, то такі теплообмінники називають типу «труба в трубі» (рис. 2.2, ж).

Обидва типи теплообмінників виконують як розбірними, так і нерозбірними. Переважно використовуються розбірні, оскільки в них частково

компенсуються температурні напруги, їх легше очищати від забруднень, і проводити заміну труб.

2.2.1.2. Елементи кожухотрубних апаратів

Кожухи з діаметром $d < 600$ мм виготовляють з труб, а при $d \geq 600$ мм – вальцюють з листів сталі. При великих довжинах кожуха його виготовляють з трьох обичайок, які зварюють між собою: центральної і двох кінцевих. Довжина кінцевих обичайок $l = 2\sqrt{D_{\text{зовн}} \cdot S_k}$ ($D_{\text{зовн}}$ – зовнішній діаметр кожуха, l – товщина стінок), вона не повинна бути меншою за 100 мм. Товщина кінцевих обичайок повинна перевершувати товщину центральної в 1,2–1,4 рази для компенсації температурних напруг. Для теплообмінників типу У, П, ПК кожух повинен мати стійку форму для забезпечення витягання трубного пучка з кожуха, оскільки зазор між трубами і корпусом невеликий.

Розподільні камери розподіляють потік по трубах. Вони являють собою обичайку з фланцями і плоску або еліптичну кришку, всередині яких розташовані перегородки для утворення ходів. Для апаратів з $d < 800$ мм кришки виконуються плоскими. Товщина стінок приймається рівній товщині корпусу. Камеру і кришку виготовляють з одного матеріалу.

Труби і трубні решітки. Труби серійно випускаються промисловістю з вуглецевих, корозійностійких сталей і латуні. Сталеві труби мають $d_{\text{зовн.}} = 20\text{--}25$ мм. Для забруднених і в'язких рідин $d_{\text{зовн.}} = 38; 57$ мм. Довжина труби 5–7 м. Схема розташування труб в трубних решітках для теплообмінників типу Н і К – по вершинах рівнобічних трикутників; типу П, У, ПК – по вершинах квадратів або рівнобічних трикутників. Переважно з умов компактності й очищення доцільніше розташовувати труби по вершинах трикутників. По концентричних колах труби розташовують лише в кисневій апаратурі. Трикутники утворюють шаховий пучок, квадрати – коридорний. Крок труб $t = (1,2\text{--}1,4)d_{\text{зовн.}}$. Труби з решітками з'єднують: 1 – розвальцьовуванням в одній або двох канавках (канавки усередині отвору трубних решіток); 2 – розвальцьовуванням зі зварюванням; 3 – зварюванням по зовнішньому діаметру або по торцю труби в отворі решіток; 4 – розвальцьовуванням в гладкому стані з відбортовуванням; 5 – склеюванням. Для забезпечення якісного розвальцьовування зазор між трубою і решіткою в отворі приймається рівним 0,25 мм. Твердість трубних решіток повинна перевищувати твердість труби.

Трубні решітки виготовляють з цільних сталевих листів або поковок. Для апаратів з великим діаметром кожуха використовують зварні трубні решітки. Шви не повинні перетинатися, а відстань від шва до отвору не менше $0,8 d_{\text{отвору}}$.

При розвальцьовуванні кінець труби повинен виступати на товщину труби. Глибина розвальцьовування – $1,5 d_{\text{тр}}$, а якщо товщина решітки менша за $1,5 d_{\text{тр}}$, – на всю товщину решітки. З боку міжтрубного простору залишається не розвальцьованим пасочок шириною 3 мм, щоб не підрізати трубу. Розвальцьовування застосовується до $P_{\text{роб}} = 0,6$ МПа.

З'єднання трубок з трубними решітками повинне бути щільним і міцним. Це з'єднання здійснюють вальцюванням, приварюванням, приклеюванням, зачеканкою або за допомогою сальникового ущільнення (рис.2.5).

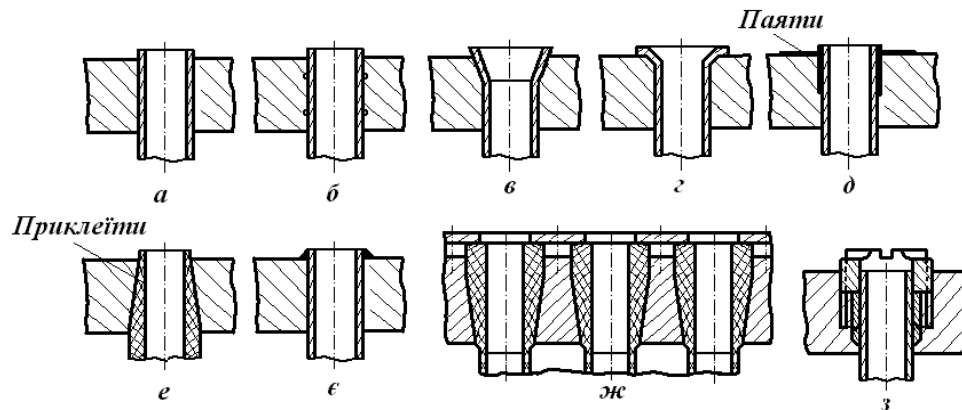


Рис. 2.5. Кріплення труб в трубних решітках:

а – вальцювальне з'єднання; *б* – вальцювальне з'єднання з кільцевими канавками; *в* – вальцювальне з'єднання з розсвердленим на конус отвором; *г* – вальцювальне з'єднання з відбортowanними кінцями труб; *д* – з'єднання трубок з трубними решітками шляхом пайки; *е* – з'єднання трубок з трубними решітками шляхом приклеювання; *є* – з'єднання трубок з трубними решітками шляхом приварювання; *ж* – кріплення труб з крихких матеріалів; *з* – сальникове кріплення труб.

Перед вальцюванням кінці труб і отвору в трубних решітках ретельно обробляються (чистота поверхні v_6-v_7 , зазор між трубою і отвором не повинен перевищувати 1 % від діаметру) і набираються в пучок. Потім інструментом – вальцювалкою – кінці труб піддають внутрішній обкатці. Роликами вальцювалки в стінках труб створюються залишкові пластичні, а в трубних решітках – пружні деформації. Після обкатки матеріал трубних решіток повертається в первинне положення і щільно обжимає трубки.

Вальцювальне з'єднання (рис. 2.5, *а*) витримує певні зусилля. Для збільшення зусилля, що допускається, можна використовувати такі способи:

- в отворах трубних решіток перед розвальцюванням роблять дві кільцеві канавки завглибшки 0,5–0,8 мм (рис. 2.5, *б*);
- отвір в трубній плиті спочатку виготовляють циліндричним, а в кінці розсвердлюють на конус. Після розвальцювання кінець труби також набуває форму конуса, що розширяється (рис. 2.5, *в*);
- кінці труб, що виступають над трубними решітками, відбортowуються. Для плавної відбортowування отвір у трубній дошці закінчується фаскою (рис. 2.5, *г*).

Приварювання труб до трубних решіток (рис. 2.5, *є*) забезпечує міцність і щільність з'єднання, але у разі виходу з ладу окремої труби заміна її неможлива.

Припаювання трубок (рис. 2.5, *д*) набуло поширення в апаратах глибокого охолодження, що виготовляються з міді й латуні. У цьому випадку застосовувати вальцювання не можна, зважаючи на малі діаметри трубок і низьку пружності міді.

Приклеювання застосовується для кріплення труб до трубних решіток, виготовлених з полімерних матеріалів (рис. 2.5, *е*).

За допомогою зачеканки свинцем виготовляється ущільнення чавунних труб в чавунних або сталевих трубних решітках.

Сальникове кріплення труб (рис. 2.5, з) в трубних решітках одночасно служить і компенсатором температурних подовжень, але воно складне у виготовленні, монтажі і вимагає збільшеної відстані між осями сусідніх трубок (кроку трубок).

Кріплення труб з крихких матеріалів (кераміка, феросилід і т.ін.) показане на рис. 2.5, ж.

Основні розміри деталей теплообмінників. Для кожухотрубних теплообмінників нормами НДІхімашу рекомендуються такі діаметри і кроки трубок:

Діаметри трубок, мм.....	25/21	38/34	57/52
Крок трубок, мм.....	32	48	70

Крок трубок визначають залежно від способу їх кріплення. Якщо трубки приварюються або припаюються, то крок $t = 1,25d_{зовн.}$. При сальниковому ущільненні трубок $t = d_{зовн.} + 9 \text{ мм}$. При розвальцьовуванні $t = (1,3-1,6) d_{зовн.}$,

Цими ж нормами встановлені такі основні розміри теплообмінників жорсткої і напівжорсткої конструкцій.

Довжини трубок (мм): 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000.

Поверхні нагріву (м^2): 1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 12; 16; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 80; 100; 125; 140; 160; 180; 200; 225; 250; 280; 320; 360; 400; 450; 500; 550; 600; 700; 800; 900; 1000; 1250; 1400; 1600; 1800; 2000.

Зовнішні діаметри корпусів теплообмінників, що виготовляються з готових труб (мм): 159, 273, 325.

Внутрішні діаметри корпусів, що виготовляються зварюванням з листів (мм): 400, 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400, 2600, 2800, 3000.

Арматура теплообмінників. Згідно з правилами Держтехнагляду на кожному апараті, що працює під тиском, необхідно встановлювати таку арматуру:

- манометр з триходовим краном;
- важільний або пружинного запобіжний клапан, або запобіжну пластинку;
- пристрій для відведення конденсату;
- показчик рівня конденсату;
- пристрій для відведення повітря або інших інертних газів із зони конденсації;
- пристрої для вимірювання температури.

Перегородки призначені для організації руху теплоносіїв і виконують роль опор трубного пучка, зменшують вібрацію труб. Конструкції поперечних перегородок в міжтрубному просторі бувають: сегментні; концентричні; (рис. 2.6), крім того: секторні; з щілистим вирізами; з чергуванням дисків і кілець, суцільні.

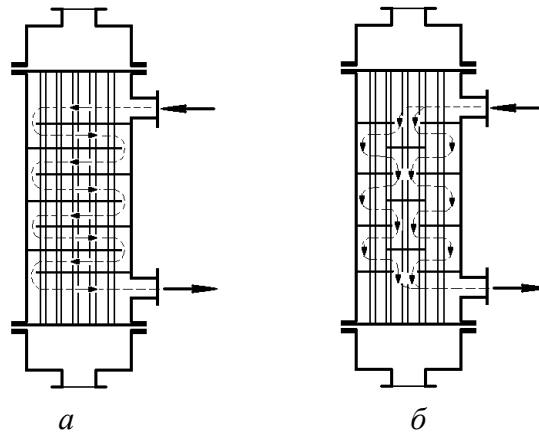


Рис. 2.6. Конструкції поперечних перегородок:

а – сегментні; б – концентричні.

Найпоширенішою є сегментна перегородка. Висота сегменту, що вирізається, складає $1/3$ діаметру апарату, відстань між перегородками $0,5 D_{ap}$. У суцільних перегородках рідина протікає в щілині між трубою і плитою перегородки. Зазор, який складає близько 1,5 мм, сприяє турбулізації потоку. Секторні вирізи розташовують у шаховому порядку, за площею виріз дорівнює чверті кола. Для усунення застійних зон на кінцях трубного пучка встановлюють розподільні циліндри. Товщина перегородок не менше 6 мм.

Прокладки використовуються металеві та азбестометалеві.

2.2.2. Зрошувальні теплообмінники

Складаються з кількох рядів труб 2, розташованих одна над одною (рис. 2.7). По зовнішній поверхні труб тонкою плівкою стікає охолоджуюча вода, а усередині труб рухається середовище, що охолоджується. Труби з'єднані між собою колінами 3 зварюванням або на фланцях. Для розподілу зрошувальної води над верхньою трубою встановлений жолобковий або трубчастий зрошувач 1. У трубчастих зрошувачах вода витікає струменями з отворів труби, а в жолобкових – через прорізи у верхній кромці жолобу. При великій кількості труб в ряду або великій відстані між ними встановлюють проміжні зрошувачі 4. Внизу розташовується піддон 5 для збирання води. Теплота відводиться водою і частково за рахунок її випаровування, тому витрата води на охолодження дещо менша, ніж для інших конструкцій теплообмінників. Застосовуються для охолодження хімічних агресивних середовищ (H_2SO_4) або як конденсатори. Ці теплообмінники громіздкі, мають низьку інтенсивність теплообміну, але прості у виготовленні й ремонті.

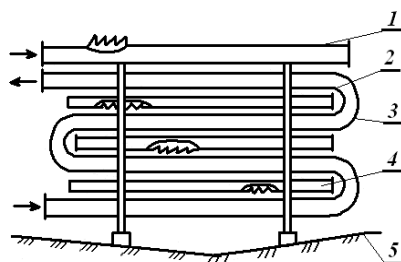


Рис. 7. Зрошувальний теплообмінник:

1 – зрошувач; 2 – труби; 3 – коліно;
4 – проміжний зрошувач; 5 – піддон.

2.2.3. Спіральні теплообмінники

У цих теплообмінниках поверхня нагріву утворюється двома тонкими металевими листами, згорнутими у спіраль (рис. 2.8). Для надання листам поперечної жорсткості і для фіксування відстані між спіралями до них приварені дистанційні бобишки. З торцевих боків апарат закривається плоскими або випуклими кришками.

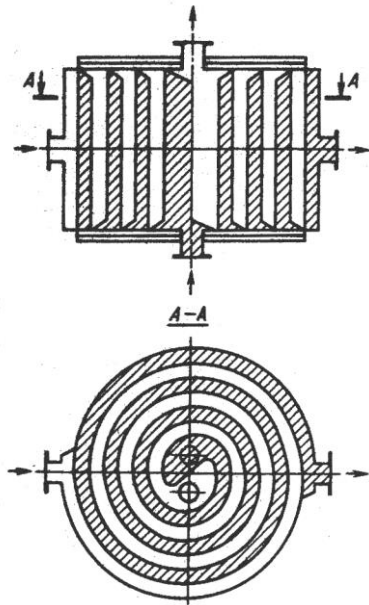


Рис. 2.8. Спіральний теплообмінник.

Ущільнення спіральних каналів здійснюється кількома способами. Кожний канал з одного боку заварюється, а з іншого ущільнюється плоскою прокладкою. Таке ущільнення дозволяє механічно чистити обидва канали від забруднень. Якщо один з теплоносіїв не дає відкладень, то його канал можна заварювати з обох боків, а для іншого теплоносія канал залишити відкритим з обох боків (він закривається знімними кришками на прокладках). Ущільнення обох відкритих каналів знімними кришками з плоскими прокладками може не забезпечити достатньої герметичності. Його можна використовувати тоді, коли можливе змішування теплоносіїв безпечно і не спричиняє псування теплоносіїв.

Спіральні теплообмінники компактні, допускають використання підвищених швидкостей при малих гідравлічних опорах, однак складні у виготовленні і очищенні від забруднень. Використовуються при робочому тиску, що не перевищує 10 ат і при температурах 20–200°C, для середовищ рідина-рідина, газ-газ, газ-рідина, конденсації пари.

Стандартні розміри спіральних вертикальних і горизонтальних теплообмінників такі:

- поверхня теплообміну (м²): 8, 12, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63;
- ширина стрічки спіралі (мм): 250, 380, 500, 750, 1000, 1250;
- ширина каналів (мм): 5, 7, 10, 12;
- радіуси кривизни спіралей можуть змінюватися в межах від 100 до 600 мм, товщина листів – від 2 до 6 мм.

2.2.4. Пластинчасті теплообмінники

Поверхня теплообмінника утворюється набором тонких штампованих пластин з гофрованою поверхнею (рис. 2.9). За ступінню доступності для механічного очищення поверхні їх поділяють на розбірні, напіврозбірні й нерозбірні. В розбірних пластини відділяються прокладками, у напіврозбірних пластини попарно зварені і доступ до поверхні є тільки з боку одного середовища, в нерозбірних пластини зварені в блоки. Характеристики

пластинчастих теплообмінників: $F = 2\text{--}600 \text{ м}^2$, P до 1,6 МПа, $t = (-30) \text{--} (+180)^\circ\text{C}$, працюють як холодильники, підігрівачі, конденсатори.

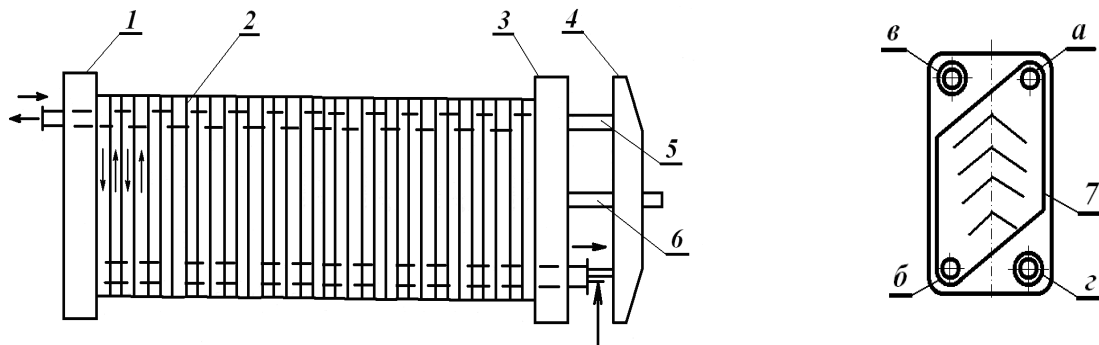


Рис. 2.9. Пластинчастий теплообмінник:

1 – нерухома плита; 2 – пластини; 3 – натискна плита; 4 – стійка; 5 – штанга; 6 – гвинт; 7 – прокладка;
а, б, в, з – прохідні отвори.

Пластини набирають на консольній рамі (виконання 1), двоопорній рамі (виконання 2), триопорній рамі (виконання 3). У виконанні 2 пластини набираються на верхній і нижній штангах 5, кінці яких закріплені в нерухомій плиті 1 і на стійці 4. Натискною плитою 3 і гвинтом 6 пластини стискаються. Пластини мають чотири прохідні отвори а, б, в, з. Прокладка 7, укладена в паз, охоплює отвори а (для входу теплоносія) і б (для виходу). У сусідній пластині прокладка охоплює отвори в і з. Таким чином, утворюються дві ізолювані одна від одної системи каналів, в яких протічєю рухаються теплоносії. Введення і виведення теплоносіїв проводиться через штуцери, розташовані на плитах 1 і 3. Необхідна швидкість руху теплоносіїв досягається підбором кількості пластин. Схеми руху: прямоточна, протитечійна, змішаний рух. За розташуванням отворів в пластинах вони поділяються на пластини з діагональним і одnobічним (по входу і виходу теплоносія) розташуванням отворів. Ті й інші виконуються правими і лівими, їх чергування утворює ізолювані системи каналів. Пластини штампуються з листового металу завтовшки 1 мм. Гофри пластин мають профіль рівнобічного трикутника висотою 4–7 мм і основою 14–30 мм, для в'язких рідин до 75 мм. Гофри горизонтальні або в ялиночку. Матеріал оцинкована або корозійностійка сталь, титан, алюміній, мельхіор. Стійки і притискні плити виготовляються з вуглецевої сталі $\delta = 8\text{--}12 \text{ мм}$.

2.2.5. Графітові теплообмінники

Складаються з металевого кожуха 1 і пучка графітових труб 2, (рис.2.10). Компенсація температурних напруг здійснюється за допомогою сальникового ущільнювача, що складається з сальника 3 і втулки 4. Графітові труби відрізняються високою корозійною стійкістю і теплопровідністю, тому теплообмінники застосовують для обробки агресивних середовищ. Промисловість випускає блокові, кожухотрубні, зрошувальні і заглибні елементи. Блоковий являє собою один або кілька прямокутних або циліндричних блоків, з'єднаних між собою спеціальною мастикою. У блоках є

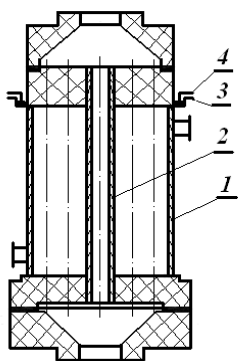


Рис. 2.10. Графітовий теплообмінник:

1 – кожух; 2 – графітові труби;

3 – сальник; 4 – втулка.

горизонтальні й вертикальні канали для проходу теплоносіїв по перехресній схемі руху. Апарат має розподільні камери, які притискаються до блоків кришками за допомогою болтів. Горизонтальні канали сполучаються між собою бічними переливними камерами, вертикальні – при установці блоків один на один.

2.2.6. *Виті, занурені, повітряного охолодження теплообмінники*

Виті теплообмінники компонуються з ряду концентричних змієвиков, укладених в кожух. Теплоносії рухаються усередині труб і міжтрубному просторі усередині кожуха. Широко застосовуються в апаратурі високого тиску для процесів поділу газових сумішей методом глибокого охолодження.

У **заглибних** теплообмінниках змієвовики занурюються в посудину з нерухомим робочим середовищем. Через низьку тепловіддачу з боку нерухомого середовища заглибні змієвовики недостатньо ефективні. Їх доцільно застосовувати, коли рідинне середовище кипить, або має механічні включення.

Теплообмінники **повітряного охолодження** застосовують як холодильники-конденсатори, особливо у випадках нестачі води на охолодження. На зварній рамі розташовують теплообмінні секції, що складаються з пучка оребрених горизонтальних труб. Усередині труб насосом прокачується охолоджуване середовище, а між ребрами вентилятором прокачується повітря. Вентилятор розташований внизу і подає повітря через дифузор. Для підвищення ефективності, особливо в літній час, форсунками в повітряний потік впорскуються краплини води. При низьких температурах вентилятор може бути відключений. Витрату повітря, що прокачується, а отже і теплопродуктивність, можна регулювати зміною кута нахилу лопаток вентилятора. Секції виготовляються прямокутного типу, одно- й багатোধодові.

2.2.7. *Теплообмінники – теплові труби*

2.2.7.1. *Принцип дії*

Теплова труба (ТТ) [1, 7, 8] являє собою герметичну порожнину різної геометрії, зазвичай циліндричної форми. Теплообмін на поверхні труби розподіляється на дві частини (зони): випарну та конденсаційну. Теплота від середовища, що охолоджується (первинного теплоносія), ззовні відбирається в зоні випарювання і шляхом теплопередачі через стінку випарної частини труби підводиться до проміжного теплоносія, що знаходиться всередині труби. Проміжний теплоносіє випаровується і у вигляді пари переноситься у

конденсаційну частину труби, де пара конденсується. Теплота конденсації шляхом теплопередачі зсередини через стінку конденсаційної частини труби підводиться до зовнішнього, вторинного теплоносія. Конденсат по внутрішній поверхні труби повертається у зону випарювання. В процесі роботи теплової труби є два потоки проміжного теплоносія. В один бік по стінці випарної частини труби рухається рідина, що кипить, по внутрішньому простору – пара, а в протилежний бік також по стінці рухається потік конденсату. В залежності від способу транспортування рідини проміжного теплоносія із зони випарювання у зону конденсації розрізняють три типи теплових труб (рис. 2.11).

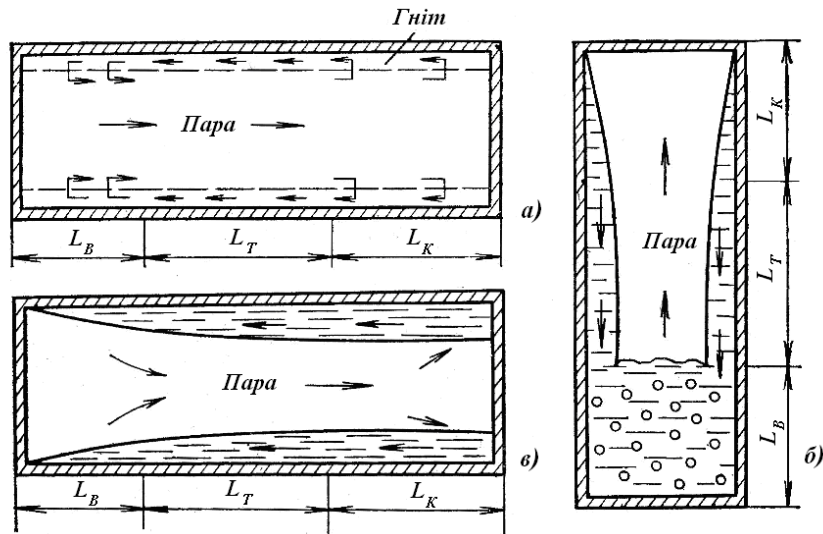


Рис. 2.11. Види теплових труб:

а – гнотові (капілярні); б – гравітаційні; в – відцентрові.

У гнотових (рос. – «фитильных») або капілярних трубах (рис. 2.11, а) по внутрішній поверхні прокладається капілярнопористий матеріал (гніт), у порах якого знаходиться рідина проміжного теплоносія. При зовнішньому підведенні теплоти у зоні випарювання рідина з гноту випарюється по усій довжині зони L_B . Капілярна структура гноту звільнюється від рідини, що утворює у цій зоні капілярне розрідження. За рахунок розрідження рідина (конденсат) відсмоктується з конденсаційної частини труби довжиною L_K . Між зонами випарювання та конденсації розміщується транспортна зона довжиною L_T .

У гравітаційних теплових трубах (термосифонах) (рис. 2.11, б) повернення конденсату з конденсатора у зону випарювання проходить під дією гравітаційних сил. Конденсатор обов'язково розміщується вище зони випарювання. Термосифони у техніці часто називають трубами Перкінса.

У відцентрових теплових трубах (рис. 2.11, в) корпус труби обертається навколо поздовжньої осі. В таких трубах товщина шару рідини всередині ТТ у зоні конденсації більша, ніж у зоні випарювання, і повернення конденсату з зони в зону відбувається за рахунок відцентрових сил.

ТТ мають широке застосування в енергетиці, металургії, хімічній промисловості та інших галузях. Застосування ТТ, наприклад, дозволяє

утилізувати низькопотенційну теплоту на рівні 100 °С і нижче, що складно зробити за допомогою інших теплообмінних пристроїв.

У наш час скляні вакуумовані термосифони широко застосовують у сонячних колекторах теплоти.

2.2.7.2. Конструкції теплообмінників-теплових труб

Відомо багато різноманітних конструкцій теплообмінників, що працюють за принципом теплової труби. Якщо індивідуальні ТТ зібрати в пучок і розділити їх на випарну та конденсаційну частини трубною решіткою і помістити пучок у корпус, то отримуємо найпростішу конструкцію теплообмінника-теплової труби. Як приклад, наведемо декілька конструкцій теплообмінників, поверхня нагрівання яких складається з індивідуальних термосифонів (рис. 2.12, *а*), та таких, що працюють за принципом термосифону (рис. 2.12, *а, б, в*).

У теплообміннику (рис. 2.12, *а*) індивідуальні термосифони 3 розділені трубною решіткою 4 на дві частини – випарну, що знаходиться всередині нижньої частини корпусу 1, та конденсаційну, що розміщена усередині верхньої частини корпусу 2. Первинний теплоносіє проходить по міжтрубному простору випарної частини, випарює в індивідуальних термосифонах проміжний теплоносіє, і, віддавши частину теплоти, виходить з теплообмінника. Проміжний теплоносіє конденсується всередині конденсаційної частини, а теплота конденсації передається вторинному теплоносіє, що рухається у міжтрубному просторі конденсаційної частини теплообмінника. В індивідуальних термосифонах має місце зустрічний рух потоків – у випарній частині пара та потік рідини, що кипить, піднімається наверх, а назустріч із конденсаційної частини опускається потік конденсату. При цьому знижуються швидкості зустрічних потоків рідини внаслідок взаємного гальмування, що зменшує інтенсивність тепловіддачі як у зоні конденсації, так і у зоні випарювання, а це знижує теплову продуктивність теплообмінника. Такі конструкції мають складності у відведенні газів, що не конденсуються; гази накопичуються у верхній частині труби, а це також зменшує продуктивність теплообмінника. Однак такі теплообмінники досить надійні. При виході з ладу однієї або декількох труб теплообмінник буде працювати.

Підвищити продуктивність теплообмінників можливо за рахунок організації руху потоків пари, рідини, що кипить, та конденсату. На рис. 2.12, *а, б, в* зображені схеми теплообмінників, у яких конденсаційна та випарна частина відокремлені одна від одної. Це дозволяє організувати процес кипіння проміжного теплоносія у трубах при висхідному двофазовому потоці (рис. 2.12, *б*); низхідному рідинної та парової фаз (рис. 2.9, *в*) та висхідному двофазовому потоці з інтенсифікацією тепловіддачі за рахунок високої швидкості руху суміші (рис. 2.12, *г*).

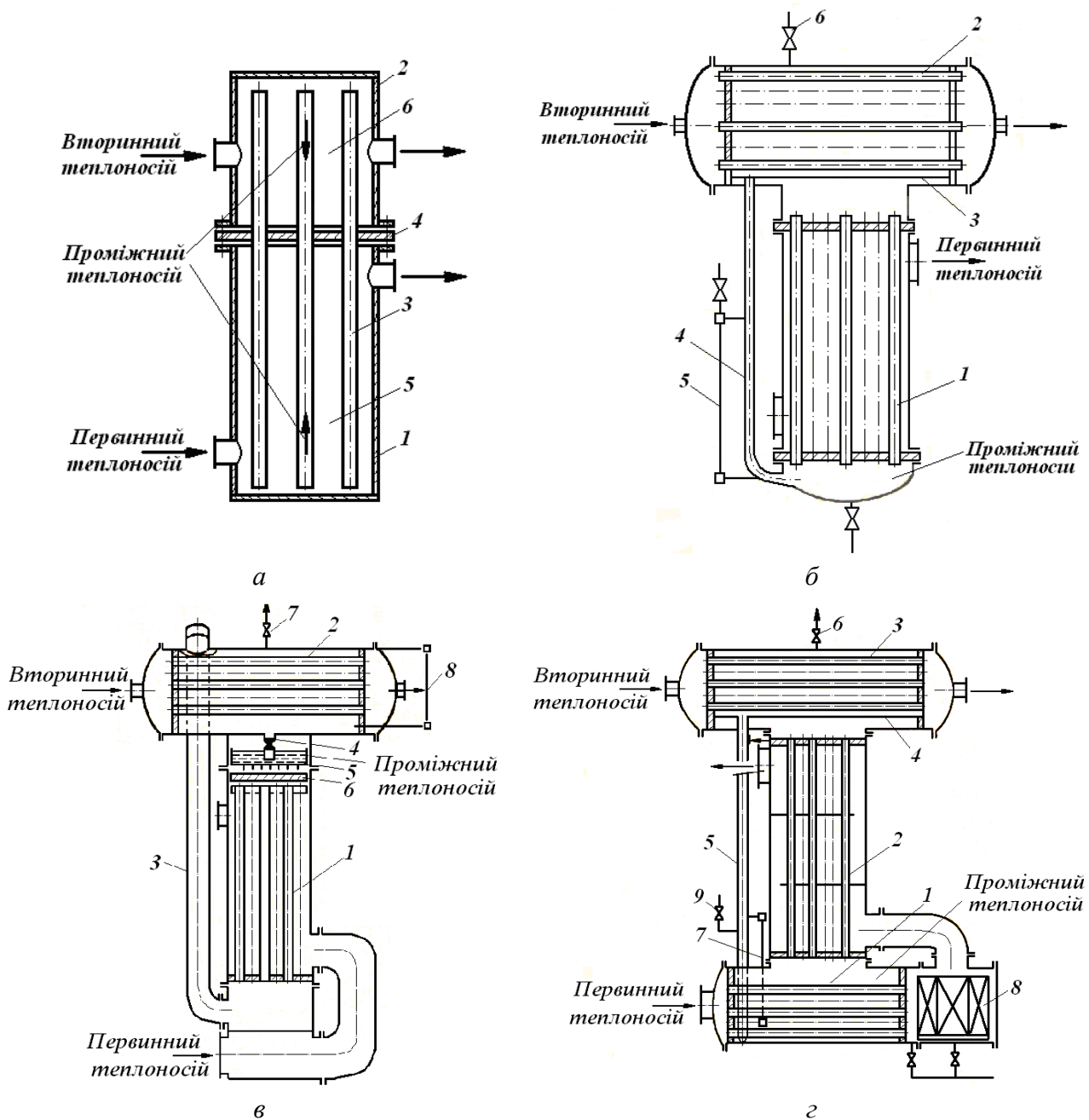


Рис. 2.12. Схеми теплообмінників, що працюють за принципом теплової труби:

а – теплообмінник з індивідуальними термосифонами: 1 – нижня частина корпусу; 2 – верхня частина корпусу; 3 – індивідуальні термосифони (теплові трубки); 4 – трубна решітка; 5 – окро повіт простір випарної частини; 6 – окро повіт простір конденсаційної частини;

б – теплообмінник з висхідним двофазним потоком: 1 – випарні труби; 2 – конденсаційні труби; 3 – лоток збирання конденсату; 4 – опускна труба; 5 – пристрій для контролю рівня заповнення випарних труб проміжним теплоносієм; 6 – пристрій для виведення газів, що не конденсуються;

в – теплообмінник з низхідним потоком проміжного носія: 1 – випарні труби; 2 – конденсаційні труби; 3 – парова труба; 4 – патрубок конденсату проміжного теплоносія; 5 – збірник проміжного конденсату; 6 – відбійні пластини; 7 – пристрій виведення газів, що не конденсуються; 8 – пристрій для контролю рівню конденсату;

г – теплообмінник з висхідному двофазним потоком з інтенсифікацією тепловіддачі: 1 – горизонтальні кип'ятильні труби; 2 – вертикальні кип'ятильні труби; 3 – труби конденсаційної частини; 4 – лоток збирання конденсату; 5 – опускна труба; 6 – пристрій виведення газів, що не конденсуються; 7 – пристрій для контролю рівня проміжного теплоносія над горизонтальними кип'ятильними трубами; 8 – жалюзійний сепаратор; 9 – вентиль для підживлення теплообмінника проміжним теплоносієм.

2.2.3. Регенеративні теплообмінні апарати

Характерним для них є наявність твердих тіл, які по черзі стикаються з гарячими або холодними теплоносіями [1, 7, 8]. Як приклад, розглядаємо регенеративний теплообмінник періодичної дії, який працює в установках для поділу повітря на складові (рис. 2.13).

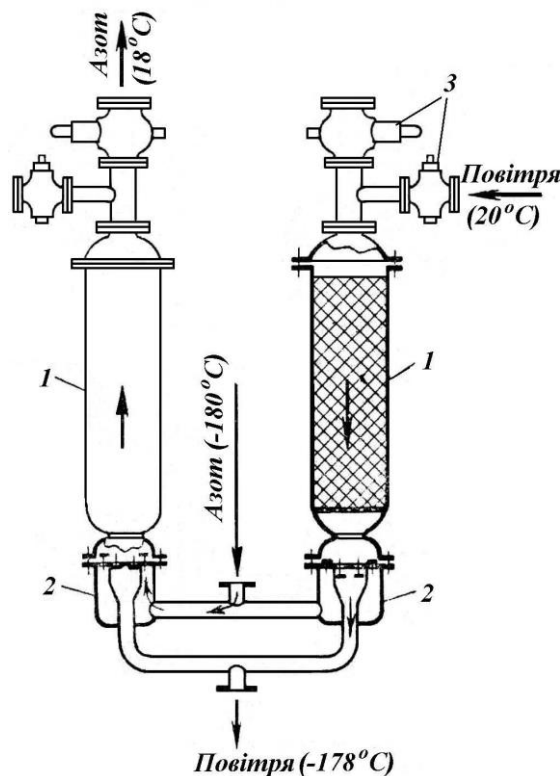


Рис. 2.13. Регенеративний теплообмінник періодичної дії для охолодження повітря:

1 – апарат з насадкою; 2 – клапанні коробки; 3 – засувки.

Теплообмінник складається з двох циліндричних, заповнених насадкою апаратів діаметром до 1 м і висотою робочої частини до 3 м. Елементи насадки – це диски, змотані з гофрованої алюмінієвої обмотки. В теплообміннику азот, який виходить з установки для поділу повітря, нагрівається, охолоджуючи повітря, що поступає в установку. Теплопередача здійснюється в два періоди. В період охолодження крізь лівий апарат продувається азот, який охолоджує насадку, а сам нагрівається до 18 °С. В період нагрівання крізь правий апарат пропускають повітря, яке охолоджується від 293 К до 93 К. Періоди охолодження і нагрівання складають 2–3 с.

2.2.4. Змішувальні теплообмінні апарати

Використовуються для конденсації парів і охолодження газів водою, а також для охолодження води, повітря [1, 7, 8].

Конденсатори змішування бувають мокрі й сухі (рис. 2.14, 2.15).

В *мокрих* охолоджуюча вода, конденсат і несконденсовані гази (повітря) відводяться разом з нижньої частини апарату за допомогою мокроповітряного

насосу. В сухих вода і конденсат відводяться знизу, а повітря – зверху за допомогою вакуум-насосу.

За конструктивною будовою змішувальні теплообмінні апарати поділяють на поличні (рис. 2.15), насадкові, порожнисті з розприскуванням охолоджуючої рідини і струминні.

При розрахунках конденсаторів змішування визначають кількість охолоджуючої води, несконденсованих газів (повітря), а також розраховують висоту барометричної труби H_T .

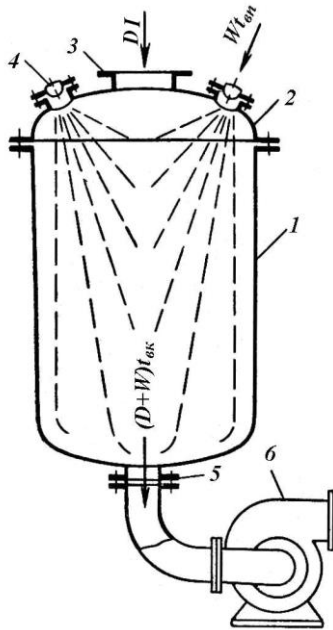


Рис. 2.14. Мокрий конденсатор:

- 1 – корпус; 2 – кришка;
3 – патрубок для введення пари;
4 – розпилювальне сопло; 5 – патрубок для виведення води, конденсату і повітря;
6 – мокроповітряний насос.

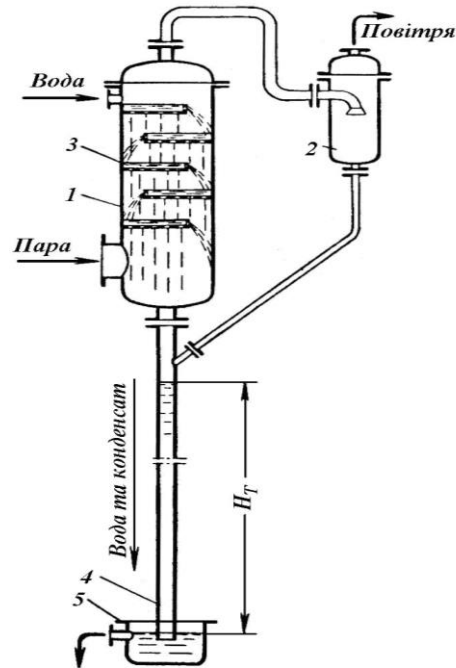


Рис. 2.15. Сухий конденсатор:

- 1 – корпус; 2 – брызколовлювач;
3 – перфорована полиця; 4 – барометрична труба; 5 – гідравлічний затвор.

2.2.5. Акумулятори теплоти

Акумулятор теплоти або тепловий акумулятор (ТА) (англ. *storage heater*) – пристрій (або сукупність пристроїв), що забезпечує оборотні процеси накопичення, зберігання й віддавання теплової енергії відповідно до вимог споживача [15].

З акумуляванням теплоти ми вже зустрічалися при розгляді регенеративних теплообмінників. Регенеративні цикли можуть бути здійснені тільки за наявності акумулятора теплоти, який сприймає теплоту від охолоджуваного середовища і віддає її тому, що нагрівається [16, 17].

Теплові акумулятори можуть виконувати такі завдання:

- компенсація піків споживання теплової енергії;
- вирівнювання (оптимізація) графіків виробництва теплової енергії шляхом накопичення надлишкової енергії;

- накопичення теплової енергії, яка буде використана під час відключення (відсутності) енергопостачання.

Акумулятор теплоти складається з:

- теплоакumuлюючого матеріалу (ТАМ);
- теплоізолюючого резервуару для збереження ТАМ;
- системи для зарядки і розрядки;
- допоміжного обладнання.

Акумулятори теплоти розрізняють:

- за природою ТАМ:
 - термохімічні акумулятори теплоти, засновані на виділенні або поглинанні теплоти при оборотних хімічних і фотохімічних реакціях;
 - теплоємнісні акумулятори теплоти, в яких використовується теплоємність ТАМ без зміни агрегатного стану;
 - акумулятори теплоти на фазовому переході, в яких використовується прихована теплота плавлення (твердіння) речовини;
- за періодом зарядки і розрядки:
 - короткострокові акумулятори теплоти (до 3 днів);
 - середньострокові акумулятори теплоти (до 1 місяця);
 - довгострокові акумулятори теплоти;
- за рівнем робочої температури:
 - для виробництва холоду – $T < 20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 - низькотемпературні – $20\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 200\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 - середньотемпературні – $200\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 500\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 - високотемпературні – $T > 500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Найширше застосування мають низькотемпературні теплові акумулятори, використання яких пов'язане з системами життєзабезпечення людини, екологічно чистими способами виробництва енергії та оптимізацією споживання енергії.

У загальному випадку тепловий акумулятор можна зобразити у вигляді схеми, наведеної на рис. 2.16 [18].

Тут як теплообмінники можуть, наприклад, використовуватися мідні труби діаметром 20 мм, згорнуті у спіралі, а як теплоакumuлюючий матеріал – суміш піску, гравію та олії. Гарячий теплоносіє вводиться у теплообмінник 4, від якого теплота передається ТАМ, а від останнього – теплоносію, що подається у теплообмінник 5. Взаємне розташування теплообмінників 4 і 5 на рис. 2.16 умовне; в реальному тепловому акумуляторі воно повинне забезпечувати найбільш сприятливий теплообмін між теплоносіями.

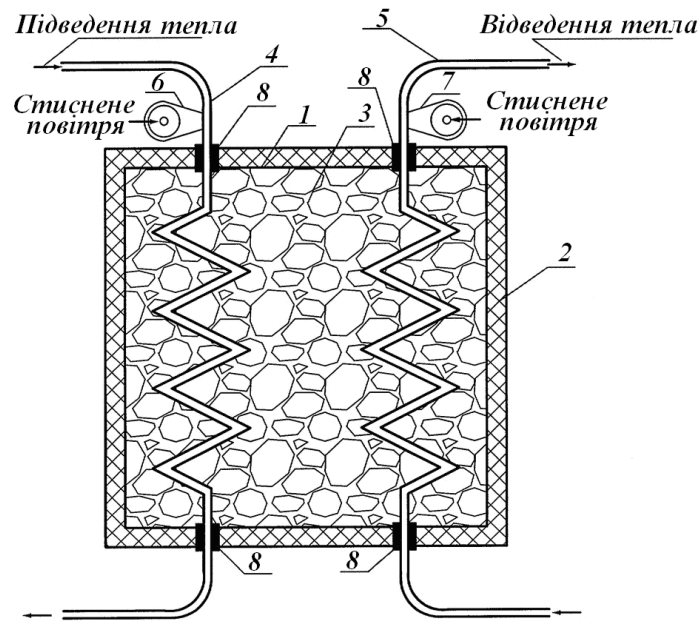


Рис. 2.16. Схема теплового акумулятора:

1 – корпус апарата; 2 – тепла ізоляція; 3 – теплоакumuлюючий матеріал; 4, 5 – теплообмінники;
6, 7 – компресори; 8 – ущільнювач.

Конструкція теплового акумулятора з тепловими трубами до теплогенеруючої установки наведена на рис. 2.17. Тепловий акумулятор встановлюється в хвостовій частині котла: у газохід поміщаються випарні частини теплових труб, а конденсатори розміщені в зернистій масі.

Між тепловими трубами, що підводять теплоту, встановлені також теплові труби, що відводять теплоту від зернистої маси.

До переваг використання як теплообмінної поверхні теплових акумуляторів теплових труб слід віднести простоту компоновки, надійність і стабільність роботи, менші гідравлічні втрати в газовому тракті [19, 20].

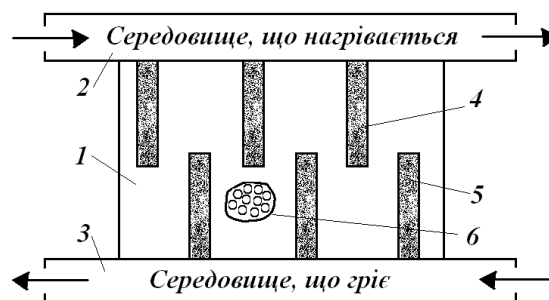


Рис. 2.17. Конструкція акумулятора з тепловими трубами:

1 – тепловий акумулятор з зернистим матеріалом; 2 – колектор з середовищем, що нагрівається;
3 – колектор з середовищем, що гріє; 4, 5 – теплові труби, що відводять та підводять теплоту;
6 – зерниста маса.

2.3. Інтенсифікація теплообміну в рекуперативних теплообмінниках

Із загального рівняння теплопередачі $Q = k\Delta t F$ випливає, що при заданих поверхні нагрівання та температурному режимі теплоносіїв кількість перенесеної теплоти визначається коефіцієнтом теплопередачі

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} + R_3} = \frac{1}{R_{\alpha_1} + R_{\lambda} + R_{\alpha_2} + R_3} = \frac{1}{R}, \quad (2.1)$$

де $R_{\alpha_1}, R_{\lambda}, R_{\alpha_2}, R_3, R$ – відповідно термічні опори тепловіддачі з боку первинного теплоносія, теплопровідності матеріалу стінки, тепловіддачі з боку вторинного теплоносія, теплопровідності забруднень і загальний опір теплопередачі.

При роботі теплообмінника відбувається процес теплопередачі між теплоносіями через поверхню теплообміну та з одним з теплоносіїв і навколишнім середовищем через стінку корпусу. Для зменшення втрат теплоти у навколишнє середовище теплообмін треба зменшити, що досягається установкою теплової ізоляції на корпусі та кришках. При цьому коефіцієнт теплопередачі зменшується за рахунок додаткового термічного опору ізоляції $R_{i3} = \delta_{i3} / \lambda_{i3}$. Теплопередачу між теплоносіями, навпаки, треба збільшити (інтенсифікувати), що зменшить поверхню нагрівання, і, як наслідок, металоємність апарату. Зменшення загального термічного опору може бути досягнуто:

- збільшенням швидкості теплоносіїв, що зменшує термічний опір тепловіддачі R_{α} , але при цьому збільшується гідравлічний опір теплообмінника і витрати енергії на транспортування теплоносія;
- руйнуванням гідродинамічного пограничного шару теплоносіїв або його зменшенням;
- використанням засобів теплообміну зі зміною агрегатного стану теплоносіїв;
- використанням теплоносіїв з кращими теплофізичними характеристиками;
- застосуванням стінок з шорсткою поверхнею, що збільшує степінь турбулізації потоку;
- застосуванням стінок з більшим коефіцієнтом теплопровідності матеріалів;
- переходом від ламінарного до турбулентного режиму руху теплоносія;
- зміною гідродинамічного руху двофазового потоку;
- зменшенням товщини забруднень.

Головним чинником, що зменшує кількість переданої теплоти в процесі теплопередачі, є термічний опір пограничного шару, а також утворення застійних зон, особливо в міжтрубному просторі. Для ліквідації застійних зон

встановлюють розподільні камери. Для руйнування приграничного шару в міжтрубному просторі використовують турбулізатори, які виготовляють у вигляді різних типів оребрення на трубах, особливо з боку низьких коефіцієнтів тепловіддачі. Крім того, оребрення збільшує поверхню теплообміну і коефіцієнт тепловіддачі. Застосовують труби з повздовжніми (рис. 2.18, *а*), розрізними спіралеподібними ребрами (рис. 2.18, *б*); поперечними ребрами різного профілю (круглі, квадратні, прямокутні й т.ін.) (рис. 2.18, *в*), спіральні ребра (рис. 2.18, *г*). Ефективність ребра залежить від його форми, висоти і матеріалу, ребро повинно бути одним цілим з трубою (приварено, припаяно і т.ін.).

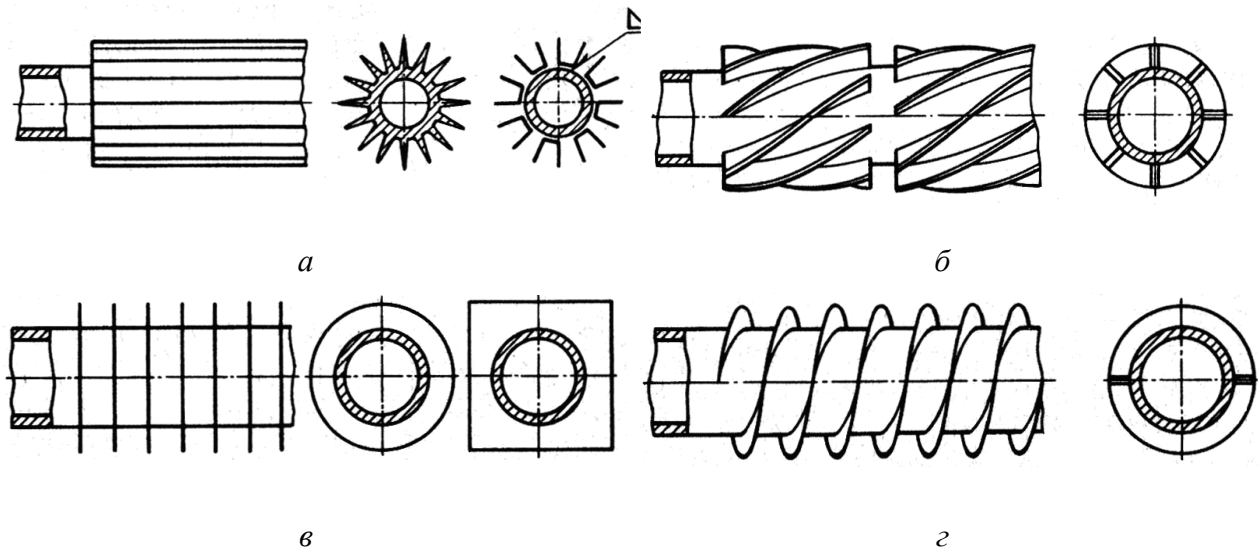


Рис. 2.18. Труби з оребренням:

а – повздовжнє оребрення; *б* – розрізне спіралеподібне; *в* – поперечне; *г* – спіральне.

У трубному просторі використовують турбулізуючі вставки (спіралі, діафрагми, диски) (рис. 2.19, *а*, *б*) і насадки (кільця, кульки) (рис. 2.19, *в*), які поміщаються в трубу. Окрім вставок використовують шорстку поверхню у вигляді канавок як усередині, так і ззовні труб. Турбулізатори сприяють швидшому переходу до турбулентного режиму при однакових витратах. У трубах зі вставками у вигляді діафрагми перехід до турбулентного режиму відбувається при $Re = 140$, а без вставок – при $Re = 2300$. Оребрення і турбулізатори збільшують гідравлічний опір теплообмінників.

З точки зору використання явища турбулізації є створення пластинчасто-спірального теплообмінника (рис. 2.20). Поверхня теплообміну складається зі штампованих у вигляді хвилі металевих листів 5, які при стиковці утворюють трубний і міжтрубний простір. З торців теплообмінник закривається кришками 2 і 3. Вхід і вихід первинного теплоносія здійснюється через патрубки 1, 4, а вхід і вихід вторинного теплоносія – через патрубки 6, 7.

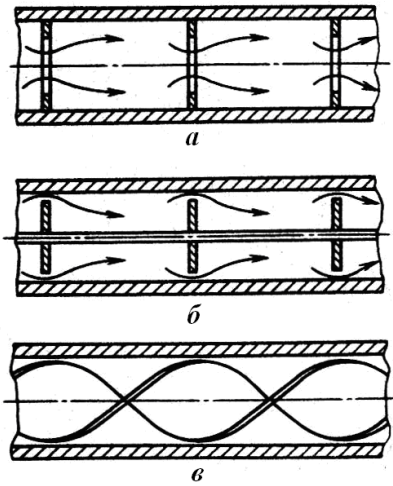


Рис. 2.19. Труби з турбулізуючими вставками:

a – вставки у вигляді діафрагми; *б* – вставки у вигляді дисків; *в* – спіральні.

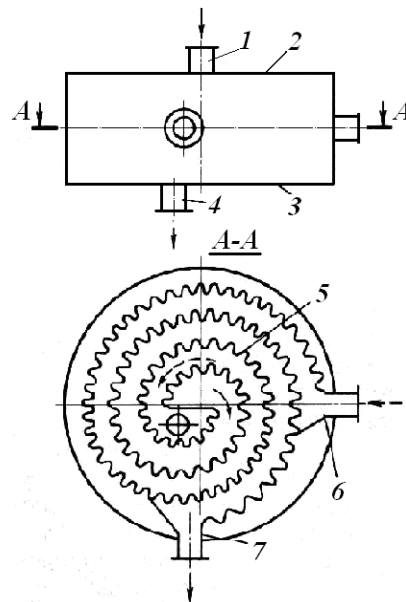


Рис. 2.20. Схема пластинчато-спірального теплообмінника:

1, 4 – вхідний і вихідний патрубки первинного теплоносія; 2, 3 – торцеві кришки; 5 – гофровані листи; 6, 7 – вхідний і вихідний патрубки вторинного теплоносія.

2.4. Переваги і недоліки деяких теплообмінних апаратів

Теплообмінники типу “труба в трубі”. Переваги: висока швидкість руху теплоносіїв, і, як наслідок, висока інтенсивність теплообміну. Недоліки: громіздкості й металоємності.

Змійовикові теплообмінники. Переваги: простота будови. Недоліки: великий гідравлічний опір, важкість очищення змійовиків.

Спіральні теплообмінники. Переваги: компактність і можливість роботи при високих швидкостях: для рідини до 2 м/с, для газів до 15 м/с), а також менший у порівнянні з кожухотрубними теплообмінниками гідравлічний опір. Недоліки: складність виготовлення і неможливість роботи при тиску, більшому за 1 МПа.

Зрошувальні теплообмінники. Переваги: прості за будовою. Недоліки: громіздкості, невисокі значення коефіцієнтів тепловіддачі.

3. ВИПАРЮВАННЯ, ВИПАРНІ АПАРАТИ І ВИПАРНІ УСТАНОВКИ

Це процес концентрування рідких розчинів практично нелетких речовин шляхом часткового видалення розчинника при кипінні розчину. Випарюванню піддають розчини твердих (луги, солі) і висококиплячих речовин (мінеральні кислоти). Випарювання також використовують для отримання розчинників в чистому вигляді (опріснення морської води). Для отримання тепла при випарюванні використовують водяну пару, яка називається первиною. Пара, яка утворюється при випаровуванні, має назву вторинної. Випарювання можна проводити під вакуумом, під атмосферним і підвищеним тиском. Є переваги й недоліки в кожному способі.

Випарювання проводять в одно- або багатокорпусних випарних установках [1, 7, 8].

3.1. Однокорпусна випарна установка

3.1.1. Будова і робота однокорпусної випарної установки

Випарний апарат (рис. 3.1) має чітко виділені дві частини – нижню (теплообмінну), яка являє собою кожухотрубний теплообмінник, призначений для нагрівання до кипіння вихідного розчину, і верхню (сепараційну), де відбувається відокремлення пари, що утворюється при кипінні розчину, від краплинок того ж розчину.

Розведений (вихідний) розчин через відповідний штуцер уводиться в апарат, опускається по циркуляційній трубі 3, а потім піднімається по кип'ятільних трубах 2. Гріюча пара (первинна), подається у міжтрубний простір, розчин у кип'ятільних трубах нагрівається, кипить і випарюється з утворенням вторинної пари.

Вторинна пара поступає в сепаратор 4, де відбувається її відокремлення від рідини завдяки відбивним пристроям 5. Краплини збираються у відбивному пристрої і відводяться з сепаратора за допомогою зливної трубки 6.

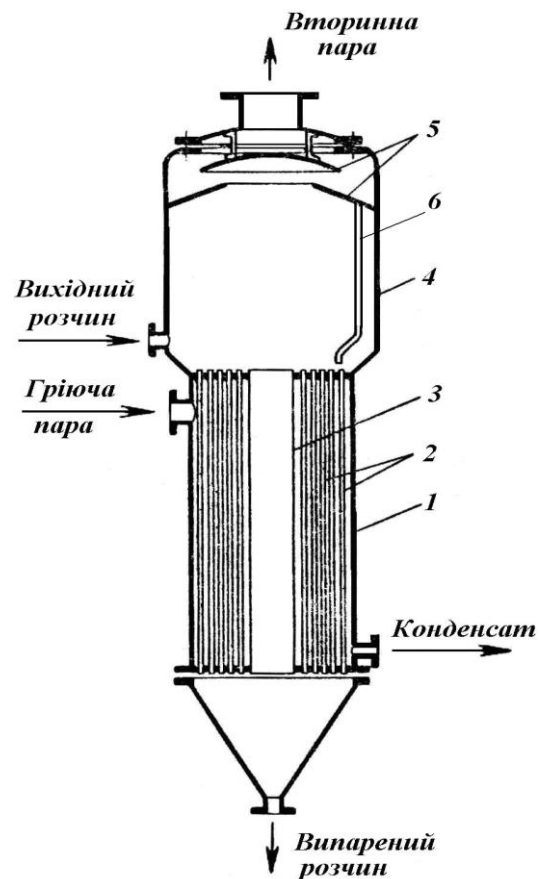


Рис. 3.1. Схема поодинокого безперервно діючого апарату з природною циркуляцією розчину, з внутрішньою циркуляційною трубою:

- 1 – нагрівальна камера; 2 – кип'ятільні труби;
- 3 – циркуляційна труба; 4 – сепаратор;
- 5 – відбивні пристрої; 6 – зливна трубка.

Внаслідок різниці густин розчину в циркуляційній трубі й парорідинної суміші в кип'ятильних трубах, рідина циркулює по замкненому контуру. Випарений до потрібної концентрації розчин видаляється крізь нижній штуцер.

3.1.2. Матеріальний баланс однокорпусної випарної установки

Матеріальний баланс по усій речовині:

$$G_{\Pi} = G_K + W. \quad (3.1)$$

По сухій речовині:

$$G_{\Pi} \epsilon_{\Pi} = G_K \epsilon_K, \quad (3.2)$$

де: G_{Π} , G_K – витрати вихідного розчину і упареного;

ϵ_{Π} , ϵ_K – процентний вміст розчиненої речовини у вихідному і упареному розчинах.

Задані: G_{Π} , ϵ_{Π} , ϵ_K

$$G_K = \frac{G_{\Pi} \epsilon_{\Pi}}{\epsilon_K}, \quad (3.3)$$

$$W = G_{\Pi} - G_K = G_{\Pi} [1 - (\epsilon_{\Pi}/\epsilon_K)]. \quad (3.4)$$

3.1.3. Тепловий баланс однокорпусної випарної установки

Позначення:

D – витрата гріючої пари, кг/с;

h_{Γ} – ентальпія гріючої пари, кДж/кг;

h – ентальпія вторинної пари, кДж/кг;

$h_{\Pi} = c_{\Pi} t_{\Pi}$ – ентальпія вихідного розчину, кДж/кг;

$h_K = c_K t_K$ – ентальпія випареного розчину, кДж/кг;

$h' = c' \theta$ – ентальпія конденсату гріючої пари, кДж/кг;

c_{Π} , c_K , c' , c'' – середні питомі теплоємності вихідного, кінцевого розчинів, гріючої пари і води, кДж/(кг·К);

t_{Π} , t_K , θ – температури вихідного, кінцевого розчинів і насиченої гріючої пари (конденсату), °С.

Прихід тепла

з вихідним розчином $G_{\Pi} h_{\Pi}$;

з гріючою парою $D h_{\Gamma}$

Витрата тепла

з випареним розчином $G_K h_K$;

з вторинною парою $W h$;

з конденсатом $D h'$;

концентрування розчину $Q_{\text{конц}}$;

втрати тепла $Q_{\text{втр.}}$

$$G_{\Pi} h_{\Pi} + D h_{\Gamma} = G_K h_K + W h + D h' + Q_{\text{конц.}} + Q_{\text{втр.}} \quad (3.5)$$

Розглядаємо вихідний розчин як суміш випарного розчину і води, яку треба випарити.

Тепловий баланс при змішуванні при $t_{\text{кип}}$ (t_K) в апараті:

$$G_{\Pi}c_{\Pi}t_k = G_Kc_Kt_k + Wc''t_k, \quad (3.6)$$

$$G_Kc_K = G_{\Pi}c_{\Pi} - Wc'', \quad (3.6a)$$

(3.6a) підставляємо в (3.5):

$$G_{\Pi}c_{\Pi}t_{\Pi} + D h_{\Gamma} = G_{\Pi}c_{\Pi}t_k - Wc''t_k + Wh + Dc'\theta + Q_{\text{конц.}} + Q_{\text{втр.}} \quad (3.7)$$

Кількість тепла, що підводиться в одиницю часу з гріючою парою (теплове навантаження):

$$Q = \underbrace{D(h_{\Gamma} - c'\theta)}_{\text{ліва частина}} = \underbrace{G_{\Pi}c_{\Pi}(t_k - t_{\Pi})}_I + \underbrace{W(h - c''t_k)}_{II} + \underbrace{Q_{\text{конц.}}}_{III} + \underbrace{Q_{\text{втр.}}}_{IV} \quad (3.8)$$

I – теплота, яка витрачається на нагрівання розчину від t_{Π} до t_k – $Q_{\text{нагр.}}$

II – теплота, яка витрачається на випарювання W кг/с води – $Q_{\text{випар.}}$

III – теплота, що витрачається на концентрування розчину при випарюванні

$$Q_{\text{конц.}} = \Delta q G_K (e_K/100), \quad (3.9)$$

де Δq – різниця інтегральних теплот випаровування 1 кг речовини.

З (3.8) витрата сухої гріючої пари:

$$D = \frac{G_{\Pi}c_{\Pi}(t_k - t_{\Pi}) + W(h - c''t_k) + Q_{\text{конц.}} + Q_{\text{втр.}}}{h_{\Gamma} - c'\theta} = \frac{Q}{r'}. \quad (3.10)$$

Якщо знехтувати $Q_{\text{конц.}}$ і $Q_{\text{втр.}}$, і вважати, що розчин поступає в апарат нагрітим до t_k , то теоретична витрата пари на випаровування 1 кг води

$$D = \frac{W(h - c''t_k)}{h_{\Gamma} - c'\theta} = \frac{Wr}{r'} \approx W, \quad (3.11)$$

де: $r = h - c''t_k$ – питома теплота випаровування води, кДж/кг;

$r' = h_{\Gamma} - c'\theta$ – питома теплота конденсації гріючої пари, кДж/кг.

При кипінні $r \approx r'$.

Тобто, з (3.11): в однокорпусному апараті на випаровування 1 кг води витрачається приблизно 1 кг гріючої пари. Практично беруть 1,1–1,2 кг сухої гріючої пари на 1 кг води.

Якщо поступає волога пара, то її витрата:

$$D' = \frac{D}{\chi}, \quad (3.12)$$

χ – ступінь сухості пари; $\chi < 1$.

3.1.4. Поверхня нагріву випарного апарату

З основного рівняння теплопередачі F – поверхня нагріву:

$$F = \frac{Q}{K\Delta t_{\text{корисна}}}, \quad (3.13)$$

$$\Delta t_{\text{корисна}} = t_s - t_k, \quad (3.14)$$

де t_s – температура конденсації гріючої пари;

t_k – температура кипіння розчину.

3.1.5. Температурні втрати

Температурні втрати складаються з температурної депресії Δ' , гідростатичної депресії Δ'' і гідравлічної депресії Δ''' :

$$\Sigma \Delta t_{\text{втр}} = \Delta' + \Delta'' + \Delta''' \quad (3.15)$$

Δ' – різниця між температурами кипіння розчину і розчинника при однаковому тиску.

Δ'' – виникає внаслідок гідростатичного тиску стовпчика рідини в трубах, де температура кипіння шарів, які розташовані нижче, більша за температуру кипіння шарів, що розташовані вище. Найбільш суттєва Δ'' при роботі під вакуумом. Точно підрахувати цю величину неможливо. Приймають $\Delta'' = 1-3^\circ\text{C}$.

Δ''' – обумовлена гідравлічними опорами (тертя і місцевими опорами), які долає вторинна пара при її русі крізь сепаратор, і паропровід. Ця величина складає приблизно $0,5-1,5^\circ\text{C}$. Для поодинокого апарату приймають $\Delta''' = 1^\circ\text{C}$.

Таким чином, температура кипіння розчину

$$t_k = t' + \Delta' + \Delta'' + \Delta''' , \quad (3.16)$$

де t' – температура вторинної пари.

3.2. Типові конструкції випарних апаратів

Строгой загальноприйнятої класифікація випарних апаратів немає, проте їх можна класифікувати за низкою ознак [1, 7, 8].

1. За розташуванням поверхні в просторі – горизонтальні, вертикальні, рідше похилі.

2. За видом теплоносія – парові, газові, з електрообігрівом, обігрівом високотемпературними теплоносіями: маслами – у великому об'ємі й у трубах та каналах.

3. За режимом циркуляції – з природною та примусовою циркуляцією.

4. За кратністю циркуляції – з одноразовою і багаторазовою циркуляцією.

5. За поверхнею нагріву – з паровою оболонкою, змієвикові, з трубчастою поверхнею.

До конструкцій пред'являється такі вимоги: простота, надійність, технологічність виготовлення, монтажу і ремонту, стандартизації вузлів і деталей, дотримання режиму (P , t , час перебування розчину в апараті), високі значення коефіцієнту теплопередачі.

3.2.1. Випарні апарати з природною циркуляцією

Такі апарати випускаються з центральною циркуляційною трубою (рис. 3.2), або з двома виносними циркуляційними трубами.

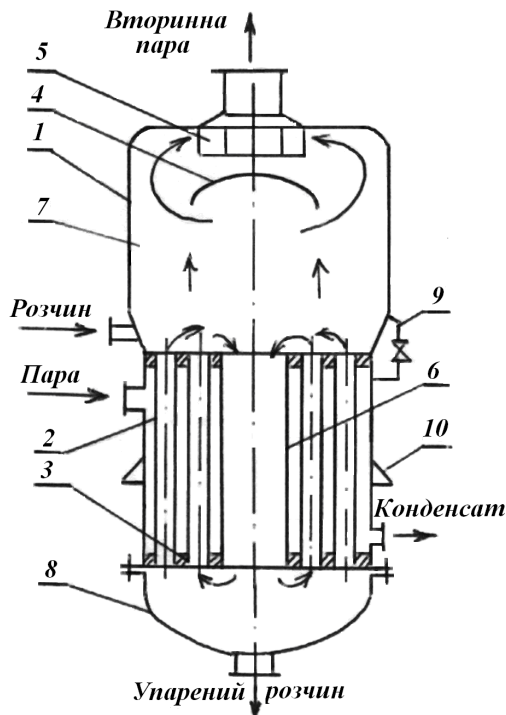


Рис. 3.2. Випарний апарат з природною циркуляцією з центральною циркуляційною трубою:

- 1 – корпус; 2 – кип'ятильні труби; 3 – трубні плити; 4 – відбійник; 5 – сепаратор;
6 – центральна циркуляційна труба;
7 – камера; 8 – кришка; 9 – вентиль; 10 – лапи.

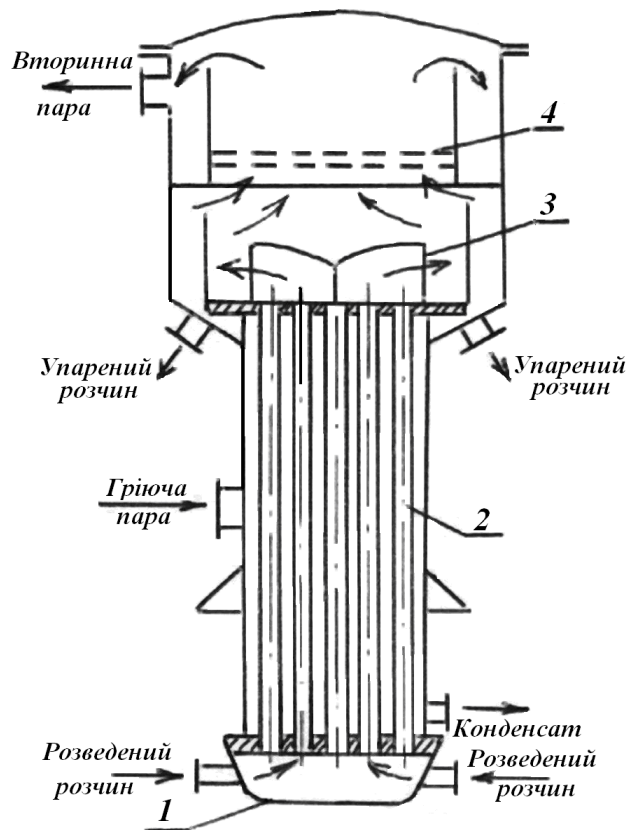


Рис. 3.3. Плівковий випарний апарат:

- 1 – нижня камера; 2 – труби; 3 – сепаратор із зігнутими лопатками; 4 – сітчастий сепаратор.

Апарат складається з корпусу 1, в нижній частині якого розташовується парова камера з кип'ятильними трубами 2, закріпленими в нижню і верхню трубні плити 3. Нижня частина корпусу закривається еліптичною або конічною кришкою 8. По осевій частині парової камери розташована центральна циркуляційна труба 6. Розчин подається на верхню трубну плиту і заповнює днище і нижню частину кип'ятильних труб. У міжтрубний простір подається пара. Під дією різниці температур розчин закипає і парорідинна суміш підіймається по кип'ятильних трубах, а на трубній плиті відбувається відокремлення пари від рідини. Пара, яка називається вторинною, піднімається в камеру 7, обтікає відбійник 4 і через сепаратор 5 виходить з апарату.

Відбійник і сепаратор забезпечують гравітаційно-інерційну сепарацію пари, внаслідок чого краплини рідини відділяються від пари. Рідина поступає в циркуляційну трубу, де вона має дещо меншу температуру, а отже й більшу густину. Природна циркуляція виникає під дією різниці густин рідини в циркуляційній трубі і в кип'ятільних трубах. Швидкість рідини на вході в труби називається швидкістю циркуляції. Для збільшення рушійної сили природної циркуляції циркуляційні труби виконують виносними. Ці труби не обігріваються, тому густина рідини в них ще більша, в результаті чого рушійна сила циркуляції зростає.

Теплота від грючої пари передається шляхом теплопередачі, яка складається з тепловіддачі при конденсації грючої пари, переносу теплоти теплопровідністю через стінку труби і тепловіддачі при кипінні рідини в трубах і каналах. Газы, що не конденсуються, виводяться з парової камери трубопроводом з вентилем (пристроєм) 9, оскільки тиск у паровій камері більший, ніж у камері вторинної пари. Апарат встановлюють на лапи 10. При випаровуванні розчинів, що кристалізуються, в апаратах встановлюють конічні днища. В процесі роботи в кип'ятільних трубах слід підтримувати оптимальний п'єзометричний рівень рідини, оскільки це сприяє збільшенню коефіцієнту тепловіддачі. Упарений розчин видаляється з нижньої частини днища. Величина необхідного згущення забезпечується кратністю циркуляції.

3.2.2. Плівкові випарні апарати

Одним з недоліків апаратів з природною циркуляцією є великий час перебування розчину в апараті. При тривалій дії температури деякі речовини можуть змінювати свої властивості. Тому для випаровування таких розчинів застосовується плівкові апарати з одноразовою циркуляцією розчину (рис. 3.3). Розчин подається в нижню камеру 1, закипає в трубах 2, парорідинна емульсія ударяється об поверхню сепаратора 3 із зігнутими лопатками, набуває обертального руху і відцентровою силою відкидається до периферії, завдяки чому відбувається сепарація пари. Потім пара проходить через сітчастий сепаратора 4 і виводиться з апарату. Довжина труби в таких апаратах складає від 5 до 9 м. На більшій частині довжини труби розчин кипить в плівці рідини, що підіймається вгору. Гідростатичний стовп в трубах невисокий, тому знижуються втрати корисної різниці температур від гідростатичної депресії. Зниження витрати розчину може призвести до розриву і висихання плівки у верхній частині труби. Робота апарату в такому режимі небажана.

Існують конструкції плівкових апаратів з гравітаційно-стікаючою вниз плівкою рідини. В таких апаратах гідростатичний стовп розчину відсутній. Проте вони не знайшли широкого застосування через складність розподілу розчину, що випаровується, по трубах апарату.

Недоліки: утруднений ремонт через велику довжину труб, розчин не має рівномірну концентрацію, при передачі розчину з одного корпусу в інший потрібна установка гідравлічного затвору для уникнення прориву пари, ці апарати дорожчі, ніж з природною циркуляцією.

3.2.3. Випарні апарати з посиленою природною циркуляцією

Застосовуються для випарювання розчинів, що кристалізуються (рис.3.4). Складається з корпусу 1, трубних решіток 2, в яких розвальцьовані труби 4. Над решіткою встановлені перегородки 3, які утворюють вертикальні канали. Зовні апарату розташована циркуляційна труба 5, під апаратом – камери 6 для осадження кристалів. У трубках розчин підігрівається і закипає в каналах, утворених перегородками 3. Розміри каналів невеликі, тому відносна швидкість міхурів пари також мала і рушійний напір, створений стовпом рідини, використовується для посилення (збільшення швидкості) циркуляції. Із збільшенням висоти перегородок зростає висота киплячого шару, а отже збільшується рушійний натиск і швидкість циркуляції.

До апаратів з посиленою природною циркуляцією можна віднести і апарати з винесеною зоною кипіння. У таких апаратах відсутня циркуляційна труба. Над кип'ятильними трубками встановлюється циліндрична обичайка, усередині якої відбувається скипання розчину.

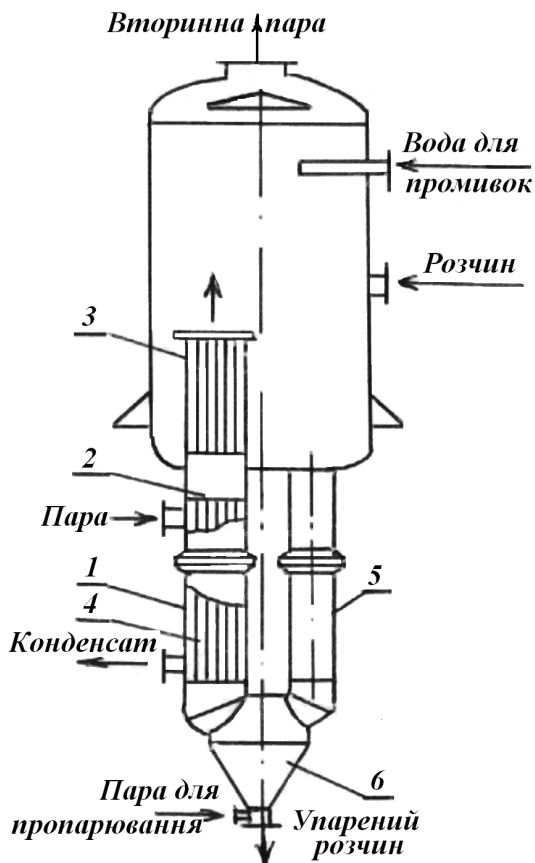


Рис. 3.4. Випарний апарат з посиленою природною циркуляцією:

1 – корпус; 2 – трубна решітка; 3 – перегородки;
4 – труби; 5 – циркуляційна труба; 6 – камери.

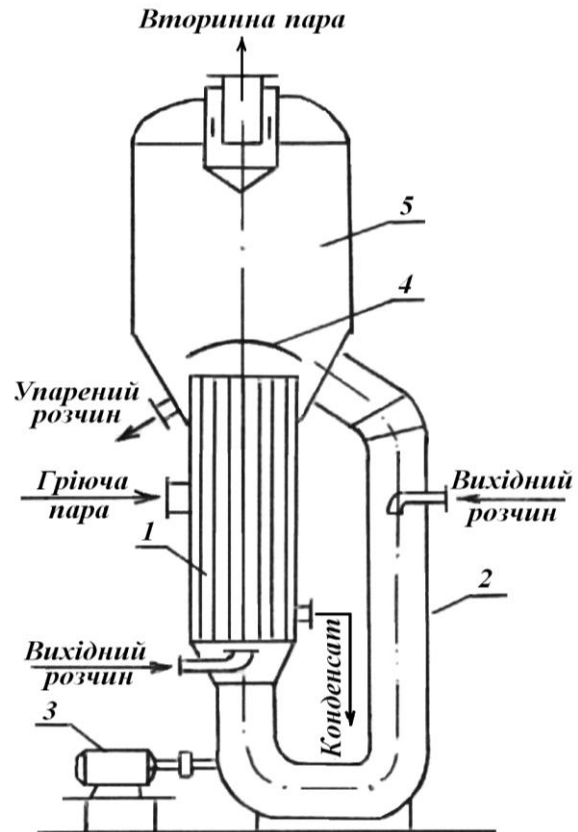


Рис. 3.5. Випарний апарат з примусовою циркуляцією:

1 – нагрівальна камера; 2 – циркуляційні труби;
3 – циркуляційний насос; 4 – відбійник;
5 – сепаратор.

3.2.4. Випарні апарати з примусовою циркуляцією

Апарат складається з нагрівальної камери 1, циркуляційної труби 2, циркуляційного насоса 3, відбійника 4, верхньої камери-сепаратора 5 (рис. 3.5). У трубах нагрівальної камери рідина рухається зі швидкістю 2–3 м/с під тиском. Зона кипіння знаходиться біля верхнього кінця труби. Велика швидкість знижує відкладення на трубах (накип) і збільшує коефіцієнт тепловіддачі. У міжтрубному просторі має місце тепловіддача при конденсації, а в трубах – тепловіддача при примусовому кипінні рідини. Висока інтенсивність тепловіддачі дозволяє знизити поверхню нагрівання в порівнянні з апаратами з природною циркуляцією. Апарат застосовується головним чином при упарюванні в'язких рідин. Недолік – підвищені витрати потужності на привід циркуляційного насоса.

3.2.5. Випарні апарати з винесеною поверхнею нагрівання

Такі апарати (рис. 3.6) застосовуються для випарювання пінистих розчинів. Розчин перегрівається в кип'ятильних трубах 2 і поступає в сепаратор 1, де скипає. Швидкість руху рідини різко знижується, процес скипання відбувається спокійно, що запобігає винесенню краплин рідини і піни з апарату. Для уловлювання дрібних краплин встановлюється додатковий сепаратор 3. Кількість грюючих камер – одна або дві.

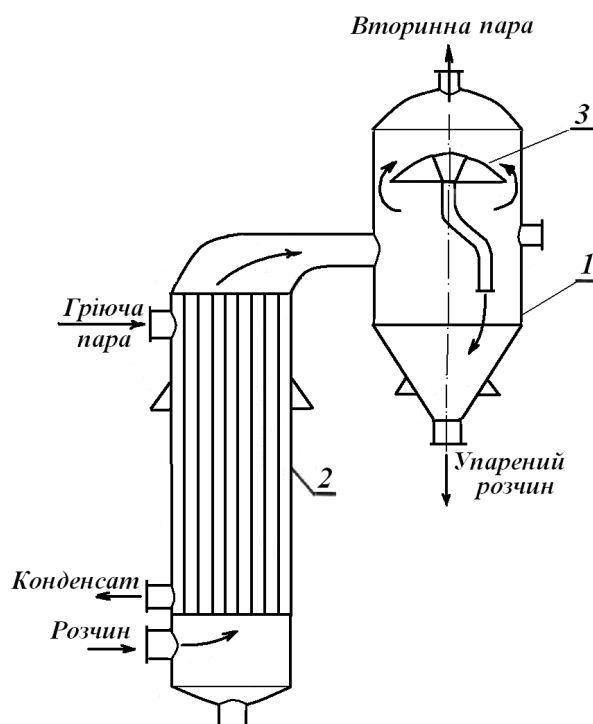


Рис. 3.6. Випарний апарат з винесеною поверхнею нагріву:

1 – корпус; 2 – циркуляційні труби; 3 – циркуляційний насос; 4 – відбійник.

3.2.6. Роторний випарний апарат

Застосовується для упарювання розчинів в тонкій плівці, особливо в'язких і термолабільних розчинів (рис. 3.7). Рідина подається насосом дозування у верхню частину апарату по патрубку 3 і тонкою плівкою стікає по внутрішній стінці циліндричного корпусу. Формування плівки здійснюється розподільником розчину 9. Гріюча пара подається в оболонку 4 апарату. Розчин захоплюється лопатками 5, розташованими на валу 8, і відцентровою силою відштовхується до стінки корпусу. Паста, яка утворюється на стінках корпусу, знімається лопатками і потрапляє на дно, звідки вона видаляється з апарату через патрубок 7 і секторний затвор 6. Окружна швидкість ротора 2–3,5 м/с. Апарат характеризується високою інтенсивністю тепловіддачі й малим перебуванням розчину в ньому (10–15 с), що підвищує якість продукту. Внизу вал закріплюється в опорному підшипнику, а вгорі він проходить через ущільнення 2. Вал обертається від приводу 1. Недоліки: мала поверхня нагріву, а отже й невелика продуктивність.

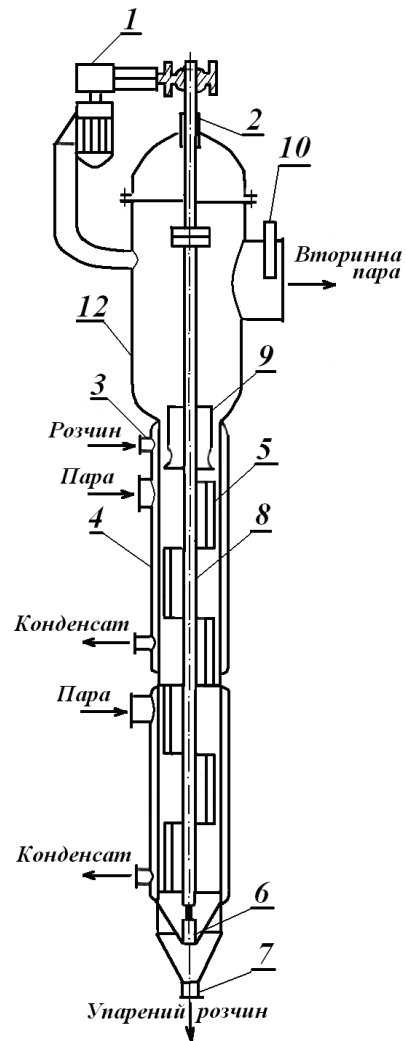


Рис. 3.7. Роторний випарний апарат:

- 1 – привод; 2 – ущільнення;
- 3, 7 – патрубки; 4 – оболонка апарату;
- 5 – лопатки; 6 – секторний затвор; 8 – вал;
- 9 – розподільник розчину.

3.2.7. Випарні апарати з заглибним пальником

Випарні апарати з заглибним пальником застосовуються для випарювання сильно забруднених і накипоутворюючих рідин (рис. 3.8). Апарат являє собою циліндричний корпус з конічним днищем (рис. 3.8, а, поз. 8). Постійний рівень рідини в апараті підтримується зливною трубою 10. Під рівень рідини на певну глибину занурюється пальник 7. Пальники діаметром 50 мм занурюють на глибину 250 мм, діаметром 250 мм – на глибину 500 мм. Повітря стискається компресором 1 і через ресивер 2, який вирівнює тиск, подається через витратомір 5 і зворотний клапан 6 в камеру змішування пальника (рис. 3.8, б). Туди ж газодувкою 11 через ресивер, витратомір і зворотний клапан подається газ. Тиск повітря і газу вимірюється манометром 4. Занурення пальника проводять після розігрівання вогнетривких стінок

камери. Димові гази барботують через розчин, нагрівають його і випаровують. Пара й відпрацьовані гази поступають в конденсатор або скруббер, де конденсуються й очищуються.

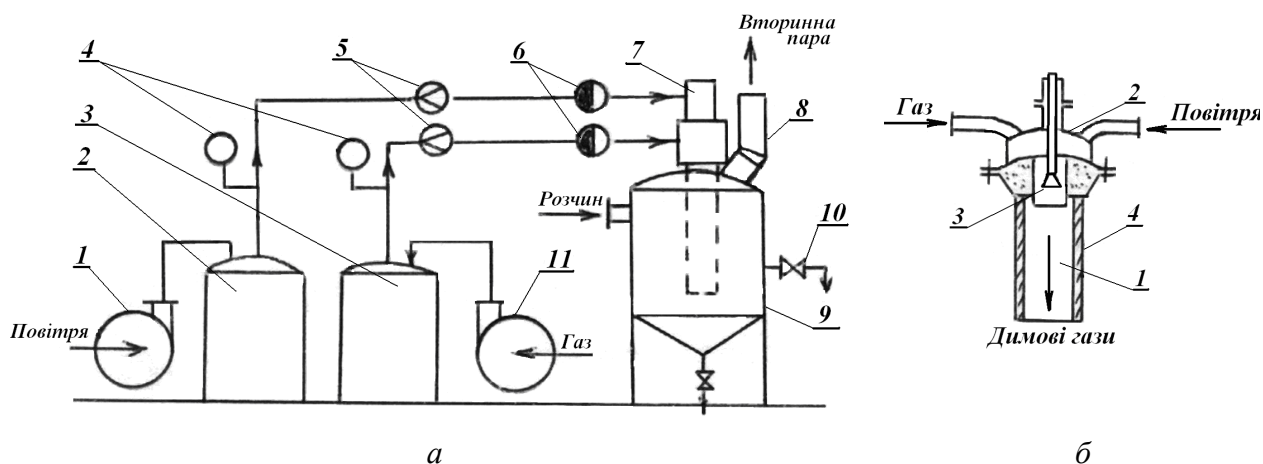


Рис. 3.8. Випарний апарат з заглибним пальником:

- а) схема установки: 1 – насос; 2, 3 – ресивери; 4 – манометр; 5 – витратомір; 6 – зворотний клапан; 7 – пальник; 8 – труба для виведення вторинної пари; 9 – випарний апарат; 10 – вентиль; 11 – газодувка;
- б) заглибний пальник: 1 – камера згоряння; 2 – камера змішування; 3 – запальник; 4 – вогнетривка футеровка.

3.2.8. Випарні апарати з горизонтальним і похилим положенням нагрівальних камер

Випарний апарат «Рapid» з горизонтальним розташуванням нагрівальної камери (рис. 3.9, а) застосовується для випарювання концентрованих електролітичних лугів. Він має горизонтальний виносний кип'ятильник 1 з U – подібними трубами. Розчин подається в корпус сепаратора 2, входить в нижні труби, а випарений розчин виходить з верхніх труб. Циркуляція розчину обумовлена різницею гідростатичних напорів рідини на вході й виході в кип'ятильні труби. Упарений розчин з кристалами збирається в солевіддільнику 3. Коефіцієнт теплопередачі в такому апараті невеликий через товсті чавунні стінки труб. Кип'ятильник пересувається на колесах.

Для розчинів, що кристалізуються, застосовують і апарати з похилим виносним кип'ятильником (рис. 3.9, б). Такий апарат складається з нагрівальної камери 1, сепаратора 2, солевіддільнику 3, продувного вентиля 4. Чищення і ремонт таких апаратів порівняно зручні.

3.2.9. Випарні апарати з терморадіаційним підведенням теплоти

Розчин кипить в жаростійких прозорих скляних трубах, що обігріваються електричними спіралями.

Застосування інфрачервоного проміння в порівнянні з паровим обігрівом дозволяє передавати великі теплові потоки через меншу поверхню нагріву. При

цьому створюються умови стерильності, які передбачають недопущення контакту з металевими поверхнями.

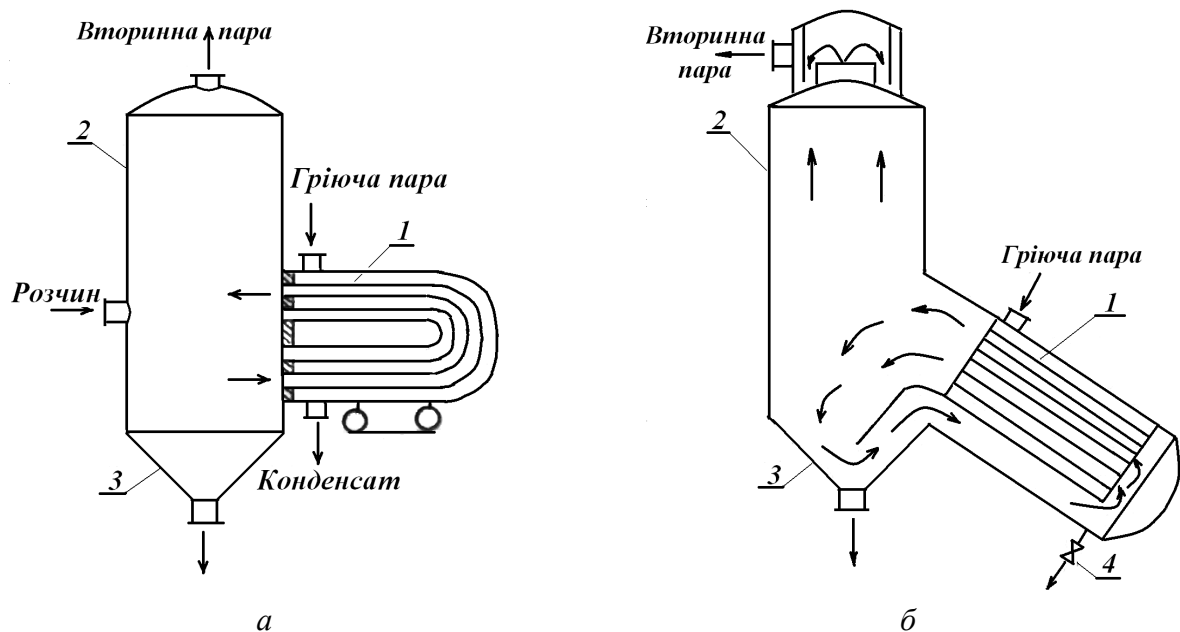


Рис. 3.9. Випарні апарати з горизонтальним (а) і похилим (б) розташуванням нагрівальних камер:

1 – нагрівальна камера; 2 – корпус; 3 – конічне днище.

3.3. Сепарація вторинної пари

Чистота вторинної пари визначається кількістю рідини (води), що виноситься з парою в паропровід. Явище винесення полягає в захопленні паром крапель киплячої рідини у вигляді туману, окремих крапель або піни. Забруднення, що містяться в краплях, відкладаються на поверхні нагріву наступного корпусу випарної станції або конденсатору і погіршують ефективність їхньої роботи. Для осадження вологи в усіх сепаруючих пристроях використовують три чинники: дію сили тяжіння; інерцію при зміні напрямку руху пари; контактну взаємодію крапель з поверхнею сепаратора, в результаті якої вона прилипає до цієї поверхні. В більшості випадків ці три способи механічної дії використовуються одночасно, або поєднуються в різній послідовності. Для розчинів, що сильно піняться, застосовують мікродози антиспінювачів. Зазвичай висоту парового простору над поверхнею киплячого розчину приймають не менше 1,5 м, а для пінистих – 2,5–3 м.

Необхідний об'єм парового простору над киплячим розчином визначається за формулою:

$$V = \frac{W}{R_v}, \quad (3.17)$$

де W – кількість випареної води, кг/с.;

R_v – масова напруга парового простору (кількість випареної води на 1 м³ об'єму на годину, кг/(м³·с).

Приблизно

$$R_v = f_1 f_2 \cdot R_v^{atm}, \quad (3.18)$$

де f_1 – коефіцієнт, що залежить від тиску;

f_2 – коефіцієнт, що залежить від рівня.

При $P=0,88 \cdot 10^5$ Па для води $R_v = 2000$ кг/(м³·год.), розчинів $R_v = 1000$, для пінистих розчинів R_v зменшують в 2 рази.

Конструкції пристроїв для сепарації різні. Найефективнішими є жалюзійні сепаратори, що набирають з гофрованих металевих пластин з плавною конфігурацією.

3.4. Технічні методи випарювання.

Типи випарних установок

В промислових умовах випарювання ведуть в апаратах одно- або багаторазової дії. Процес найчастіше ведеться безперервно. Як теплоносії зазвичай служать насичена або слабо перегріта пара, витрату якої зручно регулювати. Газове, електричне або нагрівання висококиплячим теплоносієм застосовують тільки при високій температурі кипіння розчинів, що виключає застосування водяної пари. Схему випарної станції (установки) вибирають відповідно до теплосилового господарства заводу. Багатокорпусна установка розглядається як єдине ціле, оскільки зміна режиму в одному апараті позначається на роботі інших апаратів.

Багатокорпусні випарні установки працюють як під розрідженням, так і під тиском. В установках під розрідженням вторинна пара останнього корпусу має тиск менший за атмосферний, ця пара не використовується і конденсується в конденсаторі. В установках під тиском вторинна пара останнього корпусу має тиск дещо більший за атмосферний, і вона використовується як екстра-пара для технологічних потреб заводу. Якщо гріюча пара і розчин поступають в перший корпус станції, то такі установки називають прямотечійними. Якщо гріюча пара поступає в перший корпус, а розчин рухається від останнього до першого корпусу, то такі установки називають протитечійними. Протитечійні застосовують для високов'язких і з великою температурою депресією розчинів. Такі установки постачаються насосами для перекачування розчину з корпусу в корпус, тоді як в прямотечійних розчин переходить з корпусу в корпус під дією різниці тиску. За кількістю корпусів випарні установки поділяються на три-, чотири- і п'ятикорпусні. Є установки з тепловим насосом, зазвичай однокорпусні.

3.4.1. Багатокорпусні випарні установки

3.4.1.1. Переваги багатокорпусних установок та режими їхньої роботи

Багатокорпусна установка дозволяє значно знизити витрату теплоти за рахунок багаторазового використання пари.

<i>Установки</i>	<i>Витрата гріючої пари</i>
Однокорпусні	1,1 кг / кг
Двокорпусні	0,5 кг / кг
Трихкорпусні	0,4 кг / кг
Чотирьохкорпусні	0,3 кг / кг
П'ятикорпусні	0,27 кг / кг.

У такій установці температура кипіння розчину знижується від корпусу (апарату) до корпусу. У першому корпусі температура кипіння розчину встановлюється від 125 °С і вище. В останньому корпусі установок, які працюють під розрядженням, температура складає 50–60 °С, а тих, що працюють під тиском – 102–103 °С. Корисна різниця температур для кожного корпусу повинна складати не менше 7–8 °С. В установках, які працюють під розрядженням, кількість корпусів не перевищує 5. Останній корпус з'єднують з конденсатором, обладнаним вакуум-насосом, який служить для відкачування газів, що не конденсуються. Вакуум створюється за рахунок конденсації водяної пари. В установках, які працюють під тиском, кількість корпусів не перевищує 3. В однокорпусній установці на випаровування 1 кг води витрачається приблизно 1 кг пари.

Прямотечійні установки характеризуються тим, що при переході з корпусу в корпус відбувається часткове самовипаровування розчину внаслідок зниження температури кипіння і тиску в наступному корпусі. Це слід враховувати при розрахунку. Відбір екстра-пари слід проводити з усіх корпусів випарної станції. Витрата пари на станцію зменшується, якщо відбір екстра-парів у більшій кількості припадає на останні корпуси.

Схема прямотечійної випарної установки наведена на рис.3.10.

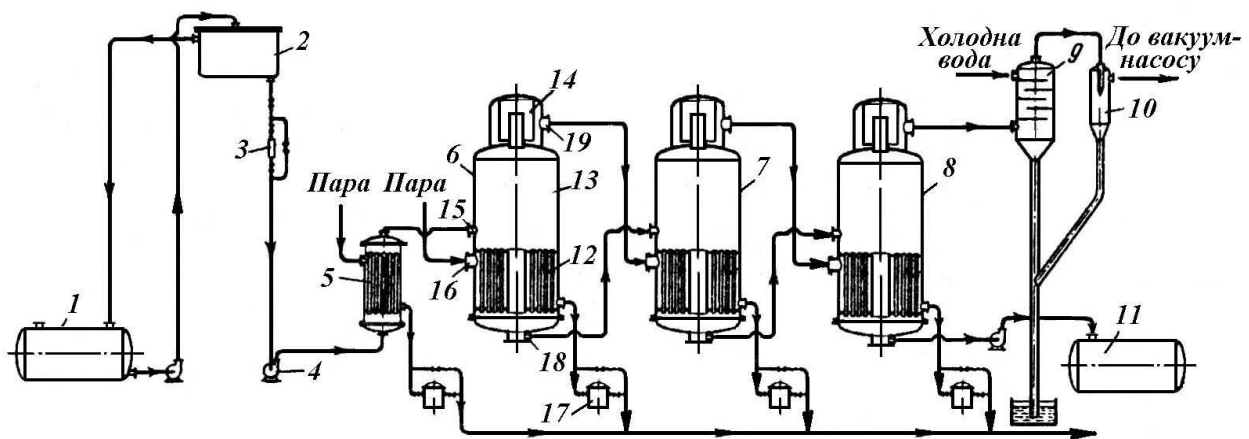


Рис. 3.10. Схема прямотечійної трикорпусної вакуум-випарної установки:

1 – сховище для розчину, що піддається випарюванню; 2 – напірний бак; 3 – витратомір; 4 – відцентровий насос; 5 – підігрівник розчину; 6–8 – корпуси установки (випарні апарати); 9 – барометричний конденсатор; 10 – пастка; 11 – сховище випареного розчину; 12 – нагрівальна камера; 13 – паровий простір; 14 – брызколовлювач; 15 – штуцер для введення розведеного розчину; 16 – штуцер для введення гріючої пари; 17 – гідравлічний затвор; 18 – штуцер для відведення випареного розчину; 19 – штуцер для виходу вторинної пари.

Вихідний розчин попередньо підігрівається у підігрівнику 5 і поступає у перший випарний апарат 6, де частина води з розчину випарюється і як гріюча пара йде до другого випарного апарату 7. Сконцентрований у першому апараті розчин направляєється в другий апарат і т.д. Вторинна пара з останнього апарату поступає у барометричний конденсатор (див. також рис. 2.12). При конденсації вторинної пари створюється вакуум, за рахунок якого розчин, який концентрується, переходить з апарату в апарат.

На рис. 3.11 і 3.12 наведені інші типові схеми випарних установок.

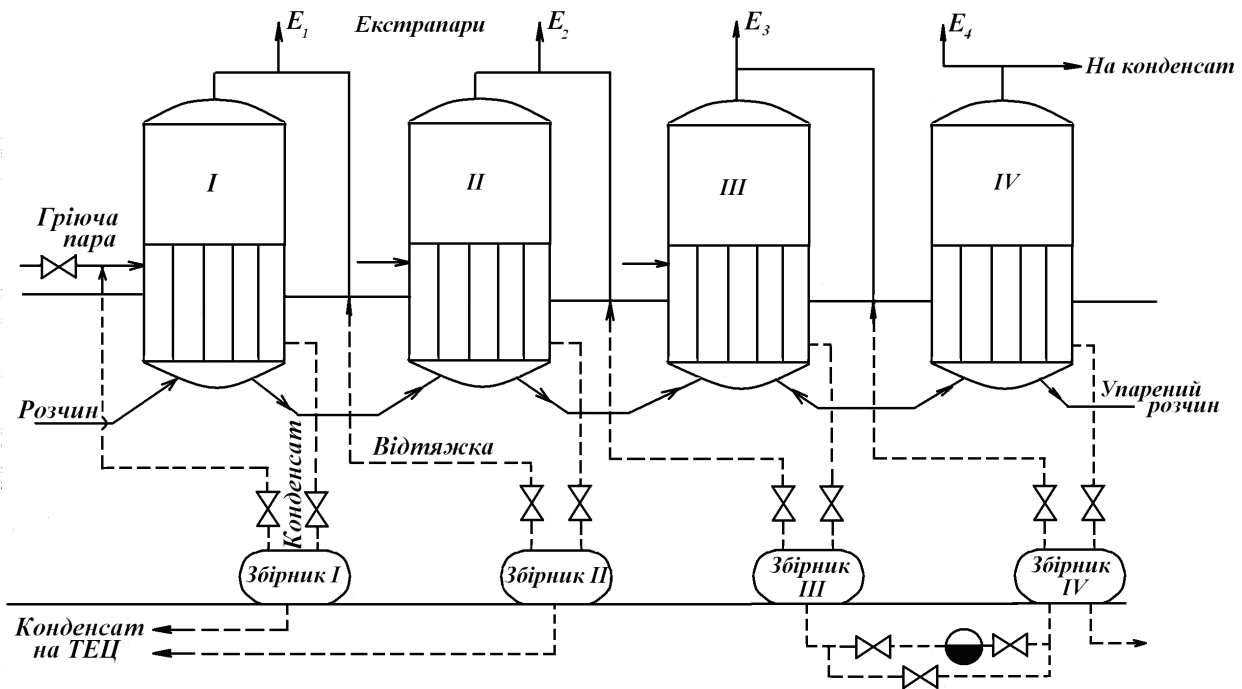


Рис. 3.11. Чотирикорпусна випарна установка, яка працює під розрідженням.

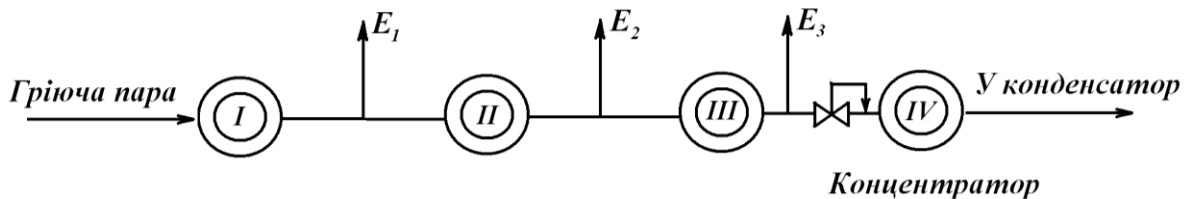


Рис. 3.12. Схема розміщення корпусів трикорпусної випарної установки, яка працює під тиском.

3.4.1.2. Випарні установки, які працюють під розрідженням

Виконуються три-, чотири- і п'ятикорпусними.

Мають такі переваги:

- велика загальна корисна різниця температур;
- низька температура кипіння в останньому корпусі;
- менша чутливість до коливань навантаження, оскільки конденсатор служить буфером;

Недоліки:

- потрібна потужна конденсаційна установка для створення вакууму;

- втрата вторинної пари останнього корпусу, що направляється в конденсатор;
- знижена температура вторинної пари останніх корпусів.

У прямотечійній чотирикорпусній установці розчин послідовно випаровується у першому, другому і подальших корпусах. Первинна гріюча пара подається у перший корпус. Решта корпусів обігрівается вторинними парами. Пара, яка відбирається для технологічних потреб, називається екстрапарою. Екстрапари мають різний потенціал E_1, E_2, E_3, E_4 . Вторинна пара з останнього корпусу прямує у конденсатор. Конденсат з кожного корпусу самопливом поступає в збірники конденсату. Відтяжки зі збірників прямують самі на себе. Конденсат може відводиться і на гідравлічні колонки, при цьому пари самовипаровування прямують на ступінь нижче (паропровід вторинної пари подальшого корпусу). З першого і другого збірників конденсат відправляють на ТЕЦ, а з останнього – або на технологічні потреби, або в дренаж.

3.4.1.3. Випарні установки, які працюють під тиском

Виконуються в основному трикорпусними без концентратора і з концентратором.

Переваги:

- краще використовується теплота;
- відносно висока температура вторинної пари, що дозволяє мати меншу поверхню нагріву;
- менші розміри конденсатора;
- менша площа під апарати.

Недоліки:

- чутливість до коливань навантаження;
- розкладання компонентів розчину під дією високої температури.

В установці з концентратором при нормальній її роботі, вторинна пара третього корпусу відбирається на технологічні потреби, а в концентраторі відбувається лише самовипаровування. Якщо ж споживання екстра-пари E_3 зменшується, то її надлишок поступає в парову камеру концентратора, тобто концентратор виконує роль буфера при коливаннях навантаження.

Поліпшення роботи можна досягти шляхом додавання пари вищих параметрів в проміжні корпуси.

3.4.1.4. Випарні установки з термокомпресором і термоінжектором

В установці з термокомпресором (рис. 3.13) вторинна пара стискається в ньому від P_2 до P_1 і подається в парову камеру. Гріюча пара використовується тільки при пуску і для поповнення втрат вторинної пари. Енергія витрачається на роботу термокомпресору.

В установці з термоінжектором (3.14) вторинна пара з тиском P_2 стискається в інжекторі робочою парою вищого тиску $P_1 = (6-10) \cdot 10^5$ Па. У

камері змішування одержують тиск пари P_3 , яка і поступає в парову камеру апарату. Надлишок пари використовують для технологічних потреб заводу. Термоінжектор виправдовує себе, якщо початкова температура змішаної пари з тиском P_3 підвищується не більше ніж на 10–20 °С.

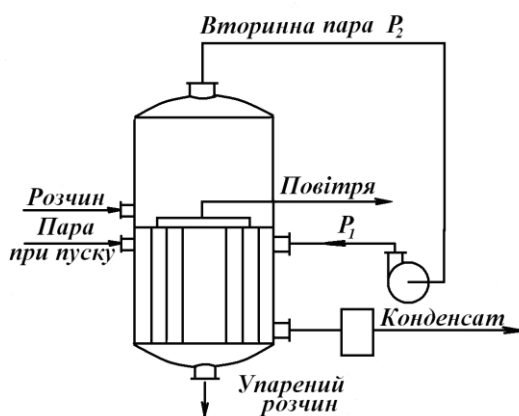


Рис. 3.13. Схема установки з термокомпресором.

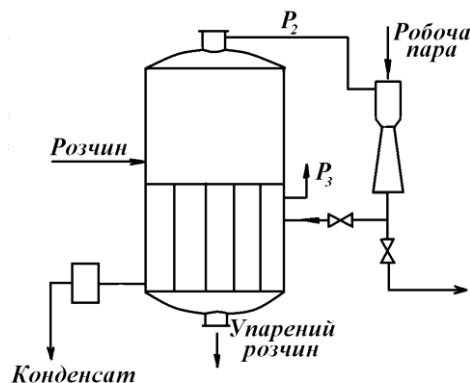


Рис. 3.14. Схема установки з термоінжектором.

3.4.2. Матеріальний баланс багатокорпусної випарної установки

Аналогічний (3.1), де W – кількість води, випареної в усіх корпусах. За формулами, аналогічними (3.1) і (3.2) визначають концентрації розчину на виході з кожного апарату:

$$b_1 = \frac{G_n b_n}{G_n - W_1}, \quad b_2 = \frac{G_n b_n}{G_n - W_1 - W_2}. \quad (3.19)$$

3.4.3. Тепловий баланс багатокорпусної випарної установки

Складається аналогічно (3.7) для кожного корпусу.

3.4.4. Розподіл по корпусах загальної корисної різниці температур

а) У разі розрахунку на найбільш вигідну (мінімальну) поверхню – пропорційно $\sqrt{Q/K}$:

$$\Delta t_i = \frac{\Delta t_{\text{кор}} \sqrt{Q_i / K_i}}{\sum_{i=1}^{i=n} \sqrt{Q_i / K_i}}; \quad (3.20)$$

б) У разі розрахунку на рівну поверхню – пропорційно Q/K :

$$\Delta t_i = \frac{\Delta t_{\text{кор}} Q_i / K_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \sqrt{\frac{Q_i}{K_i}}}, \quad (3.21)$$

де i – порядковий номер корпусу.

3.5. Відведення конденсату з випарних апаратів

Гріюча пара підводиться у парову камеру через один або два патрубки у верхній її частині по можливості рівномірно по об'єму парового простору без прямого удару у нагрівальні труби. Відведення конденсату з нагрівальної камери повинно конструктивно бути простим і забезпечувати мінімальне затоплення трубок (рис. 3.15).

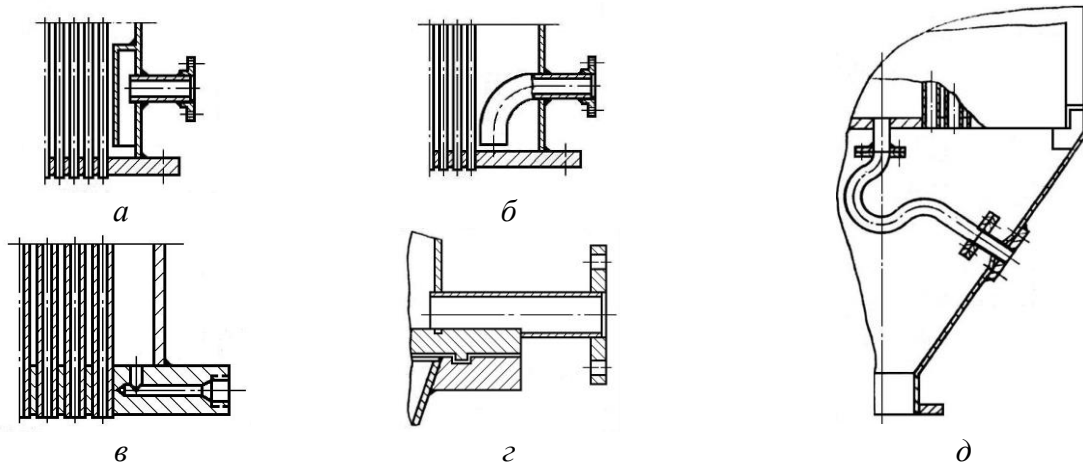


Рис. 3.15. Конструктивне оформлення вузла для відведення конденсату з нагрівальної камери:

а) патрубок з карманом; б) гнутий патрубок; в) свердління у трубній решітці; г) патрубок, приварений до трубної решітки; д) відведення конденсату з підвісної нагрівальної камери.

Для видалення з випарного апарату конденсату без пропуску пари використовують спеціальні пристрої, які називаються конденсатовідвідниками.

За принципом дії конденсатовідвідники поділяються на три групи:

1. Конденсатовідвідники з гідравлічним затвором і гідравлічним опором.
2. Конденсатовідвідники з механічним затвором.
3. Термостатичні (сильфонні) конденсатовідвідники.

Конденсатовідвідники призначені для запобігання прориву пари з апарату і рівномірного відведення конденсату. Існує багато різнотипних конструкцій конденсатовідвідників.

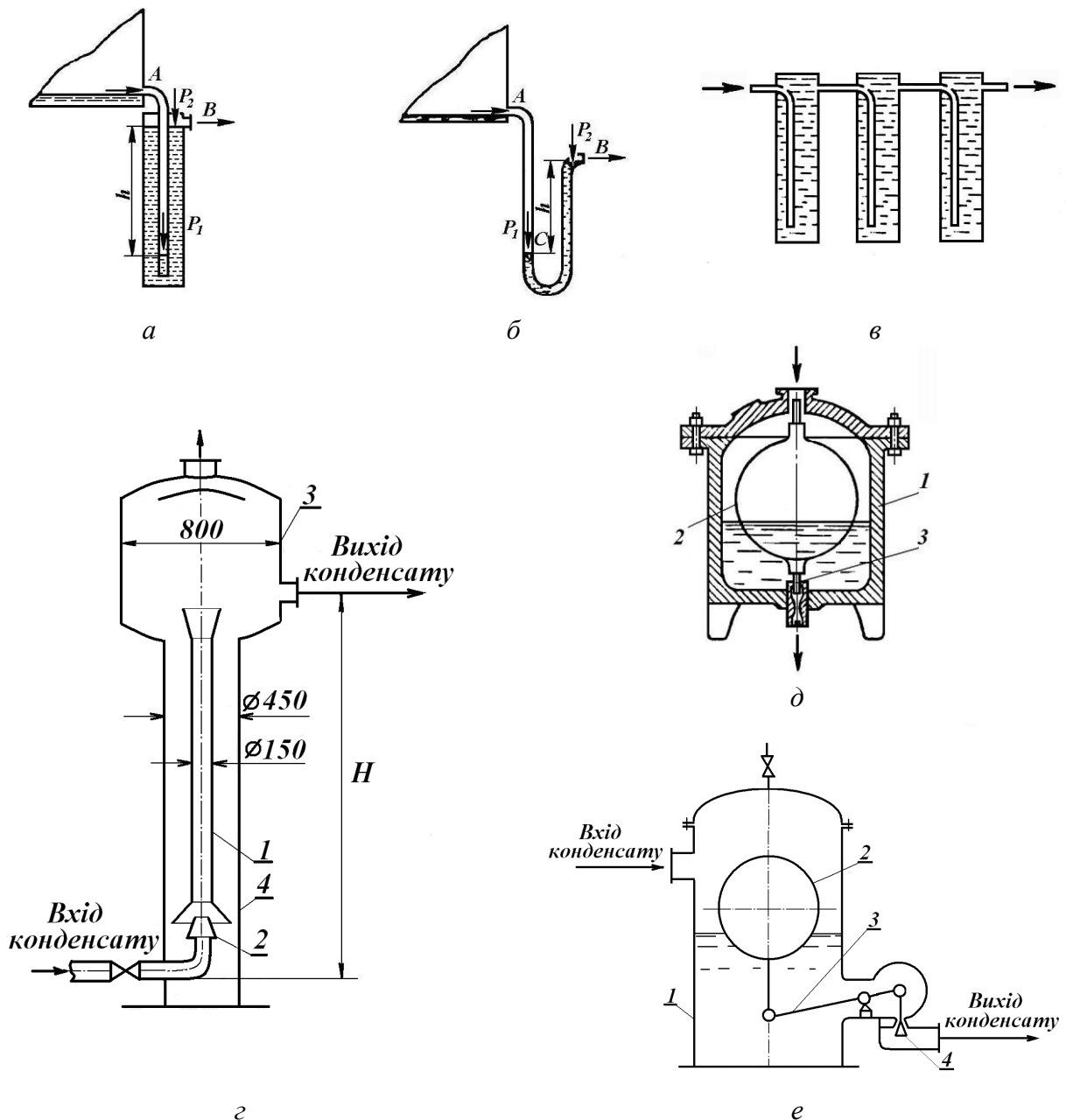
Конструкції гідравлічних затворів представлені на рис. 3.15, а, б. Принцип роботи зрозумілий з креслення. Тут h – стовп конденсату, який являє собою затвор, P_1 і P_2 – тиск до і після гідравлічного затвору, причому $P_1 > P_2$. Недоліком гідравлічного затвору є те, що при значній різниці тисків потрібна велика висота стовпа, тому вони використовуються лише для невисоких тисків. Для більшої компактності конструкції використовують батарейні затвори (рис. 3.15, в).

Прикладом конденсатовідвідника з гідравлічним опором є гідравлічна колонка ЦНС (рис. 3.15, г). Конденсат через водоструминний ежектор 2 поступає у внутрішню трубу 1. В ежекторі підвищується швидкісний натиск, який використовується для підсмоктування холоднішого конденсату, що

знаходиться в кільцевому просторі між корпусом 4 і внутрішньою трубою 1. Таким чином одержують циркуляційний контур. З внутрішньої труби конденсат поступає в сепаратор-розширювач 3 і виходить в кільцевий зазор колонки. Прорив пари стримується висотою стовпа рідини (гідравлічним затвором). Пари самовипаровування виходять через верхній патрубок колонки. Розрахунковою величиною є висота стовпа рідини H . Вихід конденсату повинен розташовуватись нижче за конденсатний штуцер апарату.

Прикладом конденсатовідвідника з механічним затвором є водовідвідник з закритим поплавцем для підвищеного тиску, показаний на рис. 3.15, д. Він являє собою водовідвідник безперервної дії. Робота водовідвідника зрозуміла з рисунку.

Водовідвідник з важільною передачею зображений на рис. 3.15, е. При подачі конденсату поплавець 2 спливає і через важелі 3 прикривається вихідний переріз клапана 4. У разі зменшення рівню конденсату поплавець опускається,



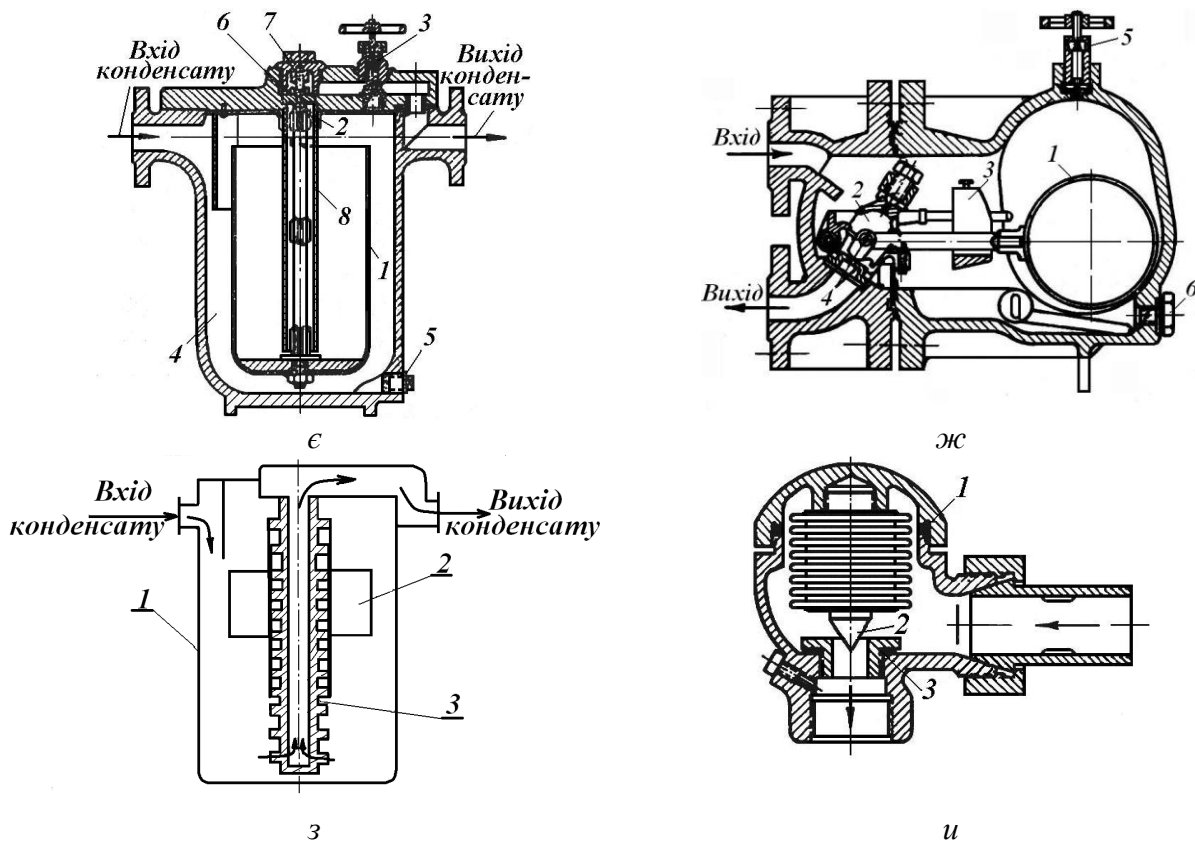


Рис. 3.15. Конденсатовідвідники:

- а) гідравлічний затвор з зануреною трубкою;
 б) гідравлічний затвор з U – подібною трубкою;
 в) батарейний гідравлічний затвор;
 г) гідравлічна колонка ЦНС: 1 – підйомна труба; 2 – водоструминний ежектор; 3 – розширювач-сепаратор;
 д) поплавковий конденсатовідвідник з закритим поплавцем для підвищеного тиску: 1 – корпус; 2 – поплавець; 3 – клапан;
 е) водовідвідник з важільною передачею: 1 – корпус; 2 – поплавець; 3 – важелі; 4 – клапан;
 є) – поплавковий конденсатовідвідник з важільною передачею: 1 – корпус; 2 – поплавець; 3 – важелі; 4 – випускний клапан;
 є) – конденсатовідвідник з відкритим поплавцем з простим клапаном: 1 – поплавець; 2 – клапан; 3 – продувний вентиль; 4 – змінний вантаж для зміни маси поплавця; 5 – дренажна пробка; 6 – шайба; 7 – зворотний клапан; 8 – направляюча трубка-гідравлічний затвор;
 ж) конденсатовідвідник з закритим поплавцем: 1 – поплавець; 2 – важіль; 3 – вантаж; 4 – клапан; 5 – повітряний вентиль; 6 – дренажна пробка;
 з) лабіринтовий конденсатовідвідник Ігнат'єва: 1 – корпус; 2 – поплавець з трубкою; 3 – трубка з лабіринтовими ущільнювачами.
 и) термостатичний конденсатовідвідник з сифоном: 1 – сифонна гармоніка; 2 – клапан; 3 – випускний отвір.

при цьому збільшується переріз клапану 4. Продування конденсатовідвідника проводиться за допомогою рукоятки 5. Повітря видаляється через верхній вентиль.

Конденсатовідвідник з відкритим поплавцем з простим клапаном (рис. 3.15, є) найбільш поширений для теплообмінників промислових підприємств. У корпусі цього конденсатовідвідника знаходиться поплавець, який являє собою циліндричний стакан, у днищі якого укріплений шпindel з направляючими ребрами; шпindel закінчується конусом і виконує роль

клапану. Конус притертий до сидла вихлопної шайби, встановленої над шпинделем; прохідний переріз шайби можна змінювати у залежності від потрібної продуктивності конденсатовідвідника; легко може бути замінена й сама шайба.

У верхній частині корпусу укріплена направляюча трубка, яка забезпечує правильний рух поплавця і точну посадку клапану в сидлі для запобігання прориву пари з корпусу в конденсатопровід і яка виконує роль гідравлічного затвору.

За шайбою у кришці конденсатовідвідника встановлений зворотний клапан, який запобігає проникненню конденсату з сусідніх пароприймачів у корпус горщика і з нього у – непрацюючий теплообмінний апарат, у якому після його зупинки утворюється вакуум. У кришці конденсатовідвідника є також продувний вентиль, який надає можливість швидко видаляти велику кількість конденсату в момент розігрівання й пуску пароприймача; після розігрівання пароприймача вентиль закривається і конденсатовідвідник включається у нормальну роботу.

Конденсатовідвідник працює таким чином. При заповненні корпусу конденсатом майже пустий поплавець спливає, закриває клапаном прохідний отвір вихлопної шайби і роз'єднує конденсатовідвідник з конденсатопроводом. Конденсат, що поступає, заповнює проміжок між поплавцем і стінкою конденсатовідвідника і потім починає переливатися у поплавець. В момент, коли у поплавці набирається така кількість конденсату, що маса поплавця стає більшою за масу витісненої води, він опускається на дно корпусу, клапан відкриває прохідний отвір шайби і конденсат з поплавця внаслідок різниці тисків до і після конденсатовідвідника видаляється у конденсатопровід. При цьому з поплавця видаляється значно більша кількість конденсату, ніж поступає за той самий час, внаслідок чого він спливає і знову закриває клапаном отвір шайби; починається наступний цикл його роботи.

Конденсатовідвідник з закритим поплавцем (рис. 3.15, ж) працює так. Коли він заповниться на 2/3 свого об'єму, поплавець 1 спливає і за допомогою важеля 2 відкривається клапан 4, випускаючи конденсат у конденсатопровід. Наявність певного об'єму конденсату в горщику виключає можливість потрапляння пари у конденсатопровід.

Прикладом конденсатовідвідника з механічним затвором є конденсатовідвідник Ігнат'єва (рис. 3.15, з) з лабіринтовими кільцевими виступами на трубці 3. Кільцеві виступи мають отвори, що з'єднують внутрішній простір конденсатовідвідника з внутрішнім проходом трубки 3. За відсутності конденсату поплавець опущений, отвори у виступах закриті. Поступаючий конденсат піднімає поплавець, що відкриває доступ конденсату до отворів, через отвори конденсат поступає усередину труби і через випускний патрубок виходить з конденсатовідвідника.

До термостатичних конденсатовідвідників, робота яких базується на деякому переохолодженні конденсату, відноситься сильфонний конденсатовідвідник періодичної дії (рис. 3.15, и). Герметична сильфонна гармоніка 1 заповнена легкокиплячою рідиною. Якщо конденсатовідвідник

заповнений парою, то рідина усередині сиффону частково випаровується; внаслідок збільшення внутрішнього тиску сиффон намагається розтягнутися і клапан 2 закриває випускний отвір 3. Конденсатовідвідник поступово заповнюється конденсатом, який унаслідок втрати тепла через стінки приладу охолоджується нижче температури пари, що поступає у конденсатовідвідник. При цьому сиффон стискається і клапан підіймається і відчиняє отвір для випуску конденсату.

4. СУШІННЯ І СУШИЛЬНІ УСТАНОВКИ

4.1. Види сушіння

Це видалення води з вологого твердого матеріалу шляхом її випаровування [1, 7, 8].

Види сушіння:

1. Конвективне – здійснюється шляхом безпосереднього контакту матеріалу з сушильним агентом.
2. Контактне – здійснюється шляхом передачі тепла від сушильного агенту до матеріалу крізь стінку.
3. Радіаційне – здійснюється шляхом передачі тепла інфрачервоними променями.
4. Діелектричне – здійснюється за допомогою струмів високої частоти.
5. Сублімаційне – здійснюється в замороженому стані або при глибокому вакуумі.

4.2. Параметри вологого матеріалу

Вологість виражається або у процентах від загальної маси матеріалу (u), або у процентах від маси сухої речовини (u'):

$$u' = \frac{100u}{100 - u}, \quad (4.1)$$

$$u = \frac{100u'}{100 + u'}. \quad (4.2)$$

4.3. Основні параметри вологого газу (повітря)

Вологий газ розглядається як суміш сухого газу і води.

Основні параметри: абсолютна вологість, вологовміст, ентальпія.

Абсолютна вологість – кількість водяної пари в кг, яка міститься в 1 м³ вологого газу. Дорівнює густині водяної пари ρ_n (кг/м³) при даній температурі й парціальному тиску p_n .

Відносна вологість, або ступінь насичення повітря (φ) – відношення маси водяної пари в 1 м³ вологого повітря (ρ_n) за даних умов до максимально можливої маси водяної пари в 1 м³ повітря (ρ_n) (густині насиченої водяної пари) за тих самих умов:

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n}. \quad (4.3)$$

Враховуючи рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} . \quad (4.4)$$

Вологовміст (d) – це маса водяної пари в кг, яка припадає на 1 кг абсолютно сухого повітря.

$$d = \frac{m_{\text{пари}}}{m_{\text{сух.пов.}}} = \frac{\rho_{\text{пари}}}{\rho_{\text{сух.пов.}}} . \quad (4.5)$$

Ентальпія (h) (кДж/кг) вологого повітря відноситься до 1 кг абсолютно сухого повітря:

$$h = h_{\text{с.п.}} + h_{\text{води}} . \quad (4.6)$$

Зображення основних процесів, які відбуваються при сушінні (нагрівання і охолодження повітря; взаємодія вологого матеріалу з повітрям при постійній ентальпії; змішування двох потоків повітря з різними параметрами; конденсація води з парорідинної суміші) здійснюється за допомогою d – h – діаграми вологого повітря (діаграми Рамзіна).

4.4. Матеріальний баланс процесу сушіння

Для всієї речовини:

$$G_{\text{п}} = G_{\text{к}} + W . \quad (4.7)$$

Для сухої речовини:

$$G_{\text{п}} (100 - u_1) = G_{\text{к}} (100 - u_2) . \quad (4.8)$$

З (4.7) і (4.8) визначаємо кількість води (W), яка видаляється з матеріалу в процесі сушіння при зміні його вологості від $u_{\text{поч.}}$ до $u_{\text{кін.}}$

$$W = G_{\text{п}} \frac{u_{\text{п}} - u_{\text{к}}}{100 - u_{\text{к}}} , \quad (4.9)$$

$$W = G_{\text{к}} \frac{u'_{\text{п}} - u'_{\text{к}}}{100} . \quad (4.10)$$

4.5. Тепловий баланс процесу сушіння

Розглядаємо складання теплового балансу для конвективного сушіння.

На сушіння поступає матеріал у кількості $(G_{\text{с}} + W)$ кг/с за допомогою транспортних засобів масою $G_{\text{т}}$, кг/с. Крім того, в сушарку поступає L кг/с абсолютно сухого повітря. Для підігрівання повітря до нього підводять тепло спочатку в калорифері ($Q_{\text{к}}$), а потім в сушильній камері ($Q_{\text{д}}$). Втрати тепла позначені $Q_{\text{втр}}$.

Використовуємо такі позначення:

$c_{\text{с}}$ – теплоємність сухого матеріалу, Дж/кг·К;

$c_{\text{т}}$ – теплоємність матеріалу транспортних засобів, Дж/кг·К;

$\theta_{\text{п}}$ – температура матеріалу, який поступає на сушіння, °С;

$\theta_{\text{к}}$ – температура матеріалу після сушіння, °С;

$t_{\text{т.п.}}$ і $t_{\text{т.к.}}$ – температури транспортних засобів на вході в сушарку і на

виході з неї відповідно, °С.

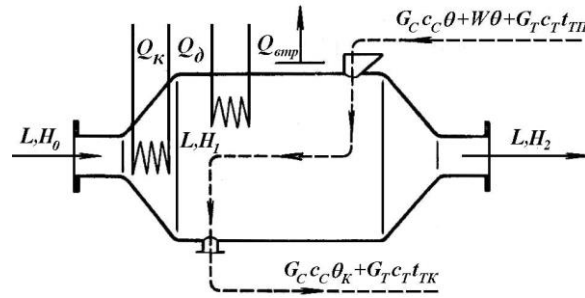


Рис. 4.1. До виведення рівняння теплового балансу конвективного сушіння.

Тепловий баланс:

$$\begin{aligned} Lh_0 + G_{cc}c_{\theta_{\Pi}} + Wc_{\theta_{\Pi}} + G_T c_T t_{\text{т.п.}} + Q_K + Q_D = \\ = Lh_2 + G_{cc}c_{\theta_K} + G_T c_T t_{\text{т.к.}} + Q_{\text{втр}}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Витрата тепла на сушіння:

$$\begin{aligned} Q = Q_K + Q_D = L(h_2 - h_0) + G_{cc}c_{\theta_K} - G_{cc}c_{\theta_{\Pi}} + \\ + G_T c_T (t_{\text{т.к.}} - t_{\text{т.п.}}) - Wc_{\theta_{\Pi}} + Q_{\text{втр}}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$Q = L(h_2 - h_0) + \sum Q. \quad (4.13)$$

$$L(h_2 - h_0) \gg \sum Q.$$

Для теоретичної сушарки

$$Q_{\text{теор}} = L(h_2 - h_0). \quad (4.14)$$

Як правило, всі витрати відносяться до 1 кг вологи (питомі витрати):

$$\frac{Q}{W} = q; \quad \frac{Q_T}{W} = q_T; \quad \frac{L}{W} = l. \quad (4.15)$$

$$l = \frac{1}{x_2 - x_0}, \quad (4.16) \quad q = \frac{h_1 - h_0}{x_2 - x_0}. \quad (4.17)$$

$$q_T = \frac{h_2 - h_0}{x_2 - x_0}, \quad (4.18) \quad q - q_T = \Delta = \frac{h_1 - h_2}{x_2 - x_0}. \quad (4.19)$$

Тепловий к.к.д.

$$\eta = r/q \quad (4.20)$$

де: r – питома теплота пароутворення води, яка визначається за температурою матеріалу в сушарці (температура мокрого термометра), кДж/кг.

4.6. Принципові схеми сушильних процесів

1. Повітря нагрівається й одноразово проходить крізь сушильну камеру.
2. З проміжним нагріванням повітря.
3. З частковим повертанням відпрацьованого повітря.
4. З багаторазовим проміжним нагріванням повітря.
5. З замкнутою циркуляцією газу, що висушується.

Розглянемо ці процеси на схемі й на діаграмі Рамзіна.

1. Як елемент входить в усі інші схеми – зображуємо самостійно.

2. Цей варіант сушіння (рис. 4.2) характеризується тим, що потрібна кількість тепла підводиться до матеріалу при зниженій температурі. Повітря з параметрами A спочатку нагрівають до t_v (верхня температура), потім воно взаємодіє з матеріалом по $h = \text{const}$, охолоджуючись до t_n (нижня температура). Далі повітря нагрівається до t_v і так далі. Пунктир показує, що якби не було проміжного підігріву, то повітря довелося би нагрівати до точки C , температура якої значно перевищує навіть верхній рівень. На практиці це може призвести до температурної деструкції матеріалу, що висушується.

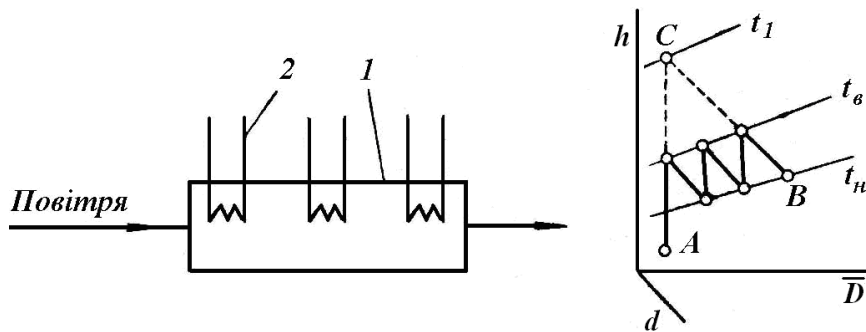


Рис. 4.2. Варіант сушіння з проміжним нагріванням сушильного агенту:

1 – сушарка; 2 – калорифери.

3. Вихідна суміш змішується з частиною відпрацьованого повітря (AC і BC), нагрівається до потрібної температури (t_D) і після цього взаємодіє з матеріалом (рис. 4.3). Особливість процесу полягає у тому, що знижена температура при контактуванні з матеріалом, підвищений початковий вологовміст матеріалу і більша масова швидкість процесу.

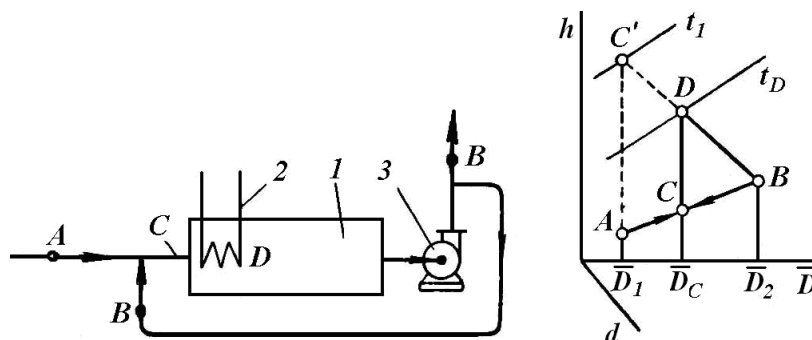


Рис. 4.3. Сушіння з проміжним нагріванням повітря:

1 – сушарка; 2 – калорифер; 3 – вентилятор.

4. Дана схема сушіння поєднує 2 і 3 варіанти.

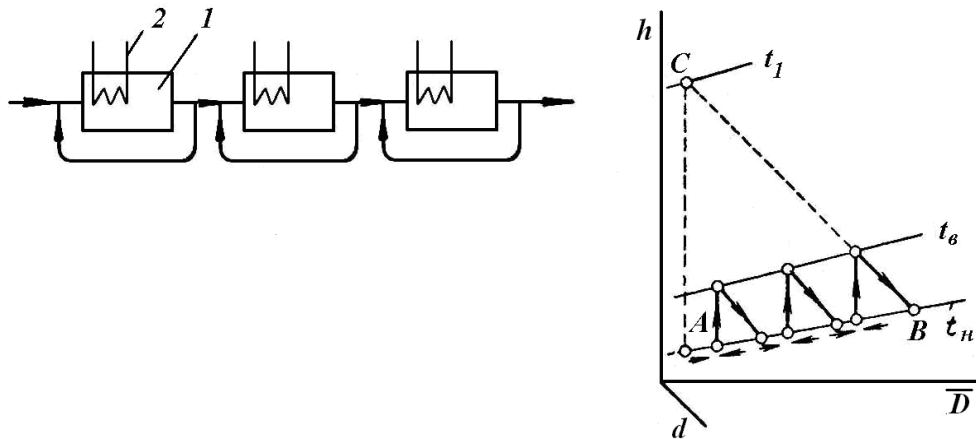


Рис. 4.4. Сушіння з багаторазовим проміжним нагріванням повітря:

1 – сушарка; 2 – калорифер.

5. Використовується при сушінні матеріалу більш дорогим, ніж повітря, газом (наприклад, воднем). Повністю насичений водяною парою газ нагрівається (AB) (рис. 4.5), в результаті чого різко знижується його відносна вологість. Після цього газ взаємодіє з матеріалом (BC), насичуючись вологою. Зволожений газ охолоджується до точки роси (CD) і частина вологи, яка знаходиться в ньому, конденсується. Потім газ знову направляє на нагрівання і сушіння.

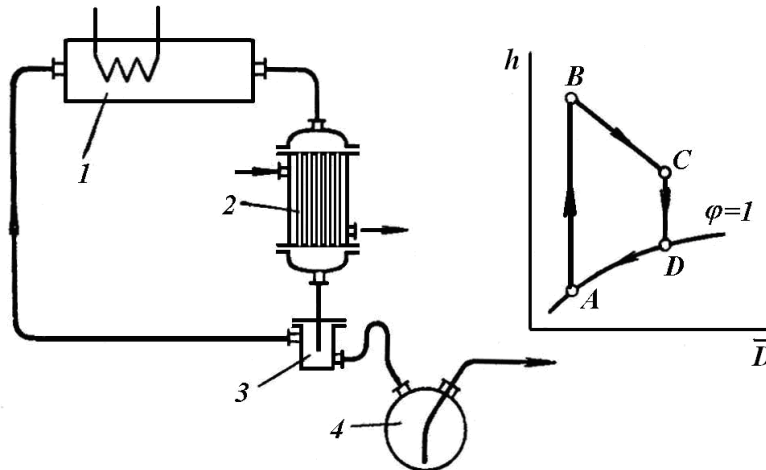


Рис. 4.5. Сушіння з замкнутою циркуляцією газу, що висушується:

1 – сушарка; 2 – конденсатор-холодильник; 3 – водовідділювач; 4 – збірник.

Використовуючи різні варіанти сушіння, можна прискорити або уповільнити процес, зробити його умови більш м'якими або жорсткими, але суттєво вплинути на теплоту, необхідну для проведення процесу, неможливо, оскільки Q визначається тільки початковими і кінцевими параметрами матеріалу, який висушується, і сушильного агенту.

4.7. Кінетика сушіння

Це процес масообміну за участю твердої фази. Вода з товщі матеріалу переміщується до поверхні поділу фаз за рахунок масопровідності, а від поверхні поділу фаз в ядро газового потоку – за рахунок конвективної дифузії.

Масопровідність у вологому матеріалі підкоряється закону:

$$\frac{dW}{dFd\tau} = -K\rho_0 \left(\frac{\partial u'}{\partial n} + \delta \frac{\partial t}{\partial n} \right), \quad (4.21)$$

$I \qquad II$

де: K – коефіцієнт масопровідності, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ_0 – густина сухого матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$;

δ – коефіцієнт термовологопровідності, $1/\text{град}$;

n – нормаль до ізоконцентричної поверхні;

I – переміщення вологи під дією градієнту вологості;

II – переміщення вологи під дією градієнту температур.

Сушіння – це і масо-, і теплообмінний процес, тому аналіз переміщення вологи (масоперенос) проводиться разом з аналізом процесу теплопередачі, (закон Фур'є). Отримують диференціальні рівняння, а від них переходять до критеріального рівняння виду:

$$\text{Nu}'_r = A \text{Re}_r^n (\text{Pr}'_r)^{0,33} \text{Gu}^{0,135}. \quad (4.22)$$

$$\text{Тут} \quad \text{Nu}'_r = \frac{\beta l}{D}; \quad \text{Re}_r = \frac{w l}{\nu}, \quad (4.23)$$

де β – коефіцієнт масовіддачі, $\text{кмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, або $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

l – довжина поверхні випаровування у напрямку руху сушильного агенту, м ;

D – коефіцієнт дифузії парів у повітрі, $\text{м}^2/\text{с}$.

У розрахунок критерію Нусельта береться коефіцієнт дифузії парів у повітрі.

Параметричний критерій Гухмана:

$$\text{Gu} = \frac{T_c - T_m}{T_c}, \quad (4.24)$$

де T_c і T_m – температури сухого і мокрого термометрів, К .

Сталі критеріального рівняння A і n залежать від Re .

При сушінні вологих матеріалів у більшості випадків швидкість сушіння суттєво змінюється зі зміною вологості матеріалу.

Існують два типових періоди сушіння (рис. 4.6):

I . Швидкість сушіння стала і не залежить від вологості матеріалу. Випаровування ведеться як з вільної поверхні рідини. Швидкість процесу

лімітується конвективною дифузією парів води від поверхні поділу фаз в ядро газового потоку.

II. Зменшення швидкості сушіння з часом. Швидкість лімітується масопровідністю усередині вологого матеріалу і залежить від його структури.

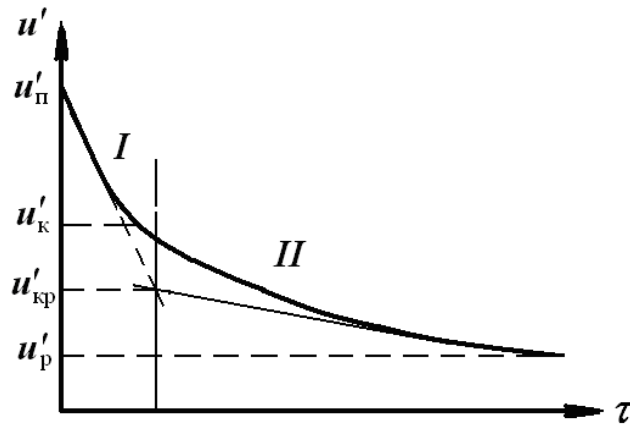


Рис. 4.6. Зміна вологості матеріалу у часі.

Індекси означають: п – початкова вологість, к – кінцева; кр. – критична; р – рівноважна.

Швидкість сушіння (N) в I періоді визначається з рівняння:

$$W = \beta F \Delta x_{\text{сер}} \tau. \quad (4.24)$$

$$N = \frac{W}{G_{\text{сух}}} = \frac{\beta F \Delta x_{\text{сер}} \tau}{G_{\text{сух}}} = \beta f \Delta x_{\text{сер}} \tau, \quad (4.25)$$

де $[\beta] = \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кг}/\text{кг})$. $f = F/G_{\text{сух}}$ – питома поверхня, $\text{м}^2/\text{кг}$.

Тривалість сушіння
для I періоду:

$$\tau_1 = 1/N (u'_{\text{поч}} - u'_{\text{кр}}), \quad (4.26)$$

для II періоду:

$$\tau_2 = \frac{u'_{\text{кр}} - u'_p}{N} \ln \frac{u'_{\text{кр}} - u'_p}{u'_k - u'_p}. \quad (4.27)$$

Загальна тривалість сушіння:

$$\tau_{\text{заг}} = \tau_1 + \tau_2.$$

Для розрахунку практичного часу сушіння вводять поправочний коефіцієнт 1,5–2.

4.8. Рушійна сила процесу сушіння

Для I періоду:

а) визначається як різниця температури повітря t і вологого матеріалу, яка дорівнює температурі мокрого термометру t_m

$$D = t - t_m, \quad (4.28)$$

де: D – потенціал сушіння;

б) як різниця вологовмістів повітря насиченого (в поверхневому шарі) і ненасиченого (в ядрі повітряного потоку)

$$\Delta d = d_{\text{нас}} - d. \quad (4.29)$$

Середня рушійна сила:

$$D_{\text{сер}} = \frac{D_1 - D_2}{\ln \frac{D_1}{D_2}}, \quad (4.30)$$

$$\Delta d_{\text{сер}} = \frac{\Delta d_1 - \Delta d_2}{\ln \frac{\Delta d_1}{\Delta d_2}}. \quad (4.31)$$

$$D_1 = t_1 - t_m; \quad D_2 = t_2 - t_m; \quad \Delta d_1 = d_{\text{нас}} - d_1; \quad \Delta d_2 = d_{\text{нас}} - d_2.$$

4.9. Сушильні установки

Сушильні установки включають власне сушарку, калорифери, вентилятори, транспортні засоби для подачі та відведення матеріалу, висушується, тощо.

Промислові сушарки класифікують за способом підведення теплоти до матеріалу:

- **конвективні** – (для сушіння сипких матеріалів), їхній обсяг складає близько 40%; сюди ж відносяться сушарки, які працюють в режимі псевдозрідженого і фонтануючого шарів, ($\approx 25\%$) і такі, де сушіння ведеться в режимі пневмотранспорту, і розпилювальні сушарки ($\approx 10\%$) для сушіння сипких і пастоподібних матеріалів ($\approx 7\%$);

- **кондуктивні (контактні)** – до них відносяться поличні, барабанні обертові, вальцеві. Застосовуються для сушіння матеріалів, для яких недопустимий контакт з теплоносієм (поличні вакуумно-сушильні шафи, вакуумні для сушіння термочутливих матеріалів), видалення органічних розчинів, токсичних і легкозаймистих речовин, коли необхідна герметизація процесу; вальцеві використовують для сушіння пастоподібних продуктів з великою початковою вологістю;

- **спеціальні:** *терморадіаційні* використовують для сушіння тонколистового матеріалу і лакофарбувальних покриттів, вони потребують великої витрати енергії; *високочастотні* використовують для сушіння матеріалів у товстих шарах; *сублімаційні* використовують для сушіння матеріалів при низьких температурах.

4.9.2. Конвективні сушарки

Конвективні апарати для сушіння в шарі поділяються на апарати безперервної дії – тунельні, стрічкові, петльові, шахтні, барабанні, і періодичної дії – камерні, поличні.

4.9.2.1. Тунельні сушарки

В таких сушарках матеріал у вагонетках і візках 1 переміщається по тунелю (сушильній камері) (рис.4.7). Довжина тунелю 25–60 м, висота 2–2,5 м. Паралельно осі тунелю або перпендикулярно їй циркулює сушильний агент (повітря, топкові гази, пара). Вентилятор 3, який працює від приводу 4, подає повітря через калорифер 2 в тунель. Тепле повітря насичується вологою, матеріал висушується. Відпрацьоване повітря видаляється з тунелю вентилятором 5. Вагонетки заочуються в камеру штовхачем через двері 6. З метою запобігання розшарування повітря по висоті і нерівномірності сушіння тунель розбивають на зони. На перекриттях камери встановлюють опалювально-вентиляційні агрегати, вони створюють вертикальну циркуляцію повітря. Швидкість теплоносія 2–3 м/с, час сушіння до 200 год. Розміри сушарки визначаються тривалістю сушіння і розмірами вагонеток.

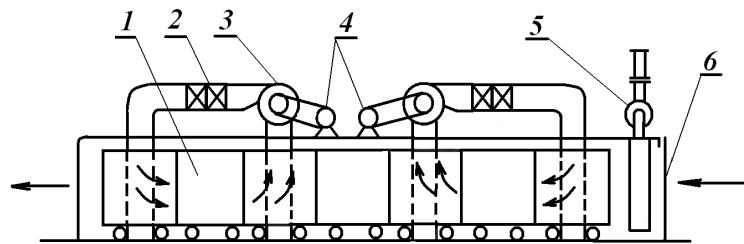


Рис. 4.7. Тунельна сушарка:

1 – візок; 2 – калорифер; 3, 5 – вентилятори; 4 – привод; 6 – двері.

4.9.2.2. Стрічкові сушарки

Призначені для сушіння штучних виробів, напівфабрикатів і сипких матеріалів, окрім тонкодисперсних. У прямокутній камері один над одним розташовуються кілька стрічкових конвеєрів, несучим полотном у яких є металева сітка, перфоровані пластини, прогумована стрічка і т. ін. Матеріал, що висушується, насипаний на полотно. В сушарках з суцільною стрічкою теплоносієм рухається над матеріалом, в напрямку, протилежному руху стрічки.

Вальцестрічкова сушарка (рис. 4.8) застосовується для сушіння пастоподібних матеріалів. Паста поступає з бункера 2 і прес-валом 1 упресовується в кільцеві канали трапецеїдального профілю, що розміщені на сушильному вальцю 3. Валець і прес-вал обігріваються паром. За один оберт вальця паста підсушується і ножем 4 у формі гребінки знімається на конвеєр 5, а потім на – конвеєр стрічкової сушарки 6.

Одноярусна стрічкова сушарка (рис. 4.9). У багатосекційній (на рис. 4.9 – п'ятисекційній) сушарці матеріал транспортується конвеєром 1. Повітря нагрівається в паровому калорифері 4 і відцентровим вентилятором 5 подається

в розподільний канал 7, проходить через шар матеріалу 3 зверху вниз і через вікна 9 повертається на рециркуляцію в камеру 8. Частина відпрацьованого повітря відводиться вентилятором 6, а свіже повітря підсмоктується через вікна (10). Для вирівнювання вологості матеріалу по висоті встановлені перегрібачі (рос. – ворошители) 2 (валки з пальцями).

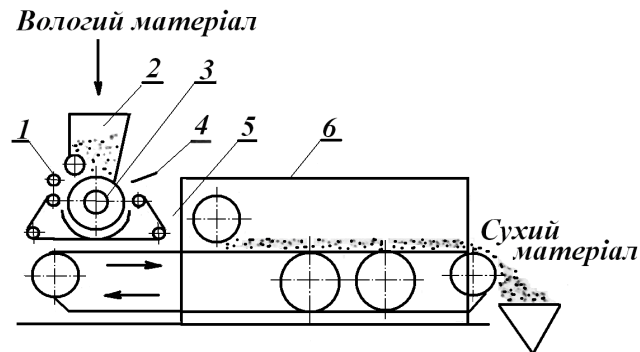


Рис. 4.8. Вальцестрічкова сушарка:

1 – прес-вал; 2 – бункер; 3 – сушильний валець; 4 – ніж;
5 – конвеєр; 6 – конвеєр стрічкової сушарки;

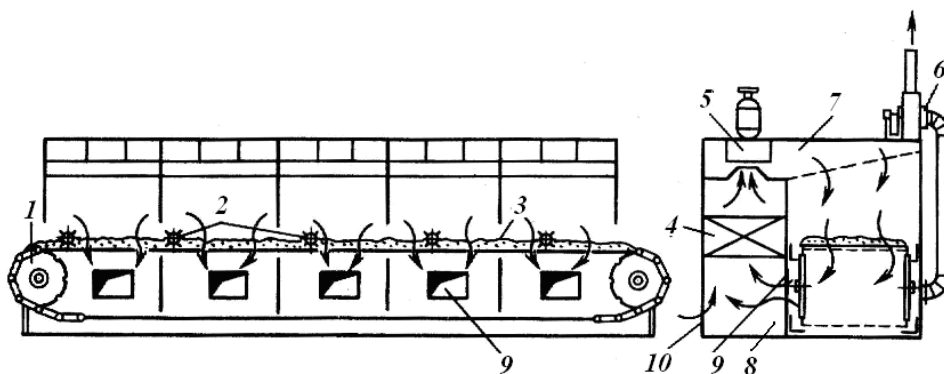


Рис. 4.9. Схема одноярусної стрічкової сушарки:

1 – конвеєр; 2 – перегрібач; 3 – шар матеріалу; 4 – паровий калорифер; 5, 6 – вентилятори;
7 – розподільний канал; 8 – рециркуляційна камера; 9, 10 – вікна.

4.9.2.3. Петльові сушарки

Застосовуються при сушінні тонких гнучких матеріалів (плівки, папір, тканини), а також для сушіння паст хімічно осадженої крейди, барвників та ін. (рис. 4.10). У середині прямокутної сушильної камери проходить сталеві нескінченна стрічка 4 з металевої сітки з глибиною комірок 10–15 мм. Паста з бункера живильника 1 потрапляє на вальці 2, які обігріваються парою і вдавлюють матеріал у комірки стрічки. Пройшовши направляючий барабан 3, стрічка поступає в камеру і утворює петлі завдяки закріпленням на ній поперечним планкам, що спираються на розміщений у верхній частині ланцюговий конвеєр 5. Далі роликом 6 стрічка підводиться до ударного пристрою 7 і сухий продукт з комірок струшується в бункер, звідки шнеком 8 виводиться з сушарки. Сушильний агент рухається перпендикулярно стрічці, процес достатньо інтенсивний, оскільки матеріал сушиться з двох боків у шарі невеликої товщини.

Загальними *недоліками* стрічкових, вальцестрічкових і петлевих сушарок є громіздкість, складність обслуговування, перекоси стрічки.

4.9.2.4. Сушарки з киплячим шаром

Призначені для сушіння зерноподібних продуктів з розмірами зерен від 0,1 до 5 мм (рис. 4.11).

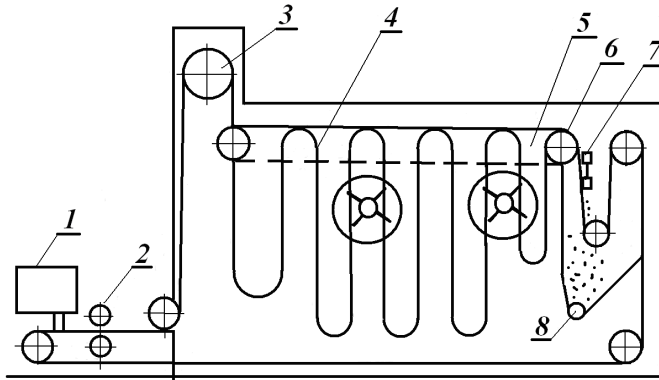


Рис. 4.10. Петлева сушарка:

1 – живильник; 2 – вальці; 3 – направляючий барабан;
4 – сталеві стрічки; 5 – ланцюговий конвеєр;
6 – ролик; 7 – ударний пристрій.

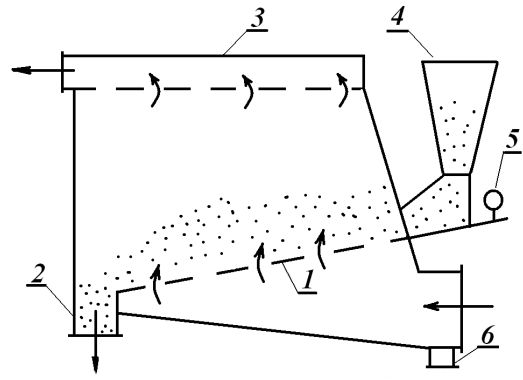


Рис. 4.11. Сушарка з киплячим (псевдо зрідженим) шаром:

1 – похила решітка; 2, 3, 6 – патрубків;
4 – бункер; 5 – вібратор;

Матеріал через бункер 4 подається на похилу решітку 1, яка може коливатися від вібратора 5. Повітря через отвори решітки піднімає зерна, вони витають в потоці і висихують. Відпрацьоване повітря через щілини поступає в патрубок 3 і виводиться з сушарки. Матеріал виходить через патрубок 2 і частково через патрубок 6. У промисловості використовуються сушарки з кількома камерами. Різновидом таких сушарок є *вихрові сушарки*. За рахунок збільшення поверхні контакту між теплоносієм і матеріалом та відведення вологи процес сушіння інтенсифікується. Можна проводити сушіння і випалення, сушіння і грануляцію. Сушарки можуть бути одно- і багатосекційними.

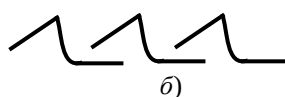
При малій швидкості сушильного агента (гарячого повітря) матеріал на решітках лежить щільним шаром. Із збільшенням подачі повітря спостерігається вузька область швидкостей, в межах якої шар розбухає, але залишається нерухомим (стан псевдозрідження), а потім, після переходу через критичну швидкість, псевдозрідження переходить у стан кипіння.

Псевдозрідження характеризується другою критичною швидкістю, після якої настає режим пневмотранспорту.

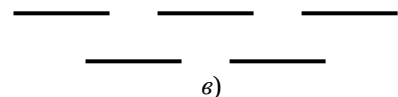
Газорозподільні решітки рівномірно розподіляють газовий потік і підтримують шар матеріалу при зупинці сушарки. Використовують провальні та безпровальні решітки (рис. 4.12). Провальні решітки – перфоровані плити з діаметром отвору найчастіше 2–3 мм, але бувають і до 5 мм. Вільний переріз складає 3–10%.



а)



б)



в)

Рис. 4.12. Схема безпровальних решіток:

а) плоска; б) жолобчаста; в) щілинна.

Плоскі решітки рекомендуються для матеріалів, схильних утворювати грудки, жолобчасті – для волокнистих, при цьому газ для кращого перемішування у решітку подається тангенціально. При температурах вище 400 °С решітка виготовляється у вигляді окремих колосників для компенсації температурних подовжень.

Для вивантаження матеріалу використовують затвори: лопатеві шнекові і затвори-мигалки (рис.4.13), іноді по 2–3 мигалки на вертикальній ділянці.

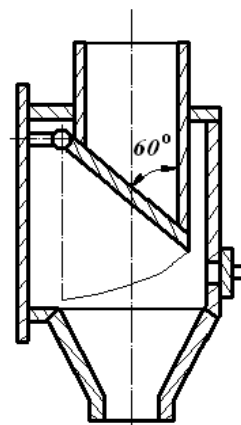


Рис. 4.13. Затвор-мигалка.

До *недоліків* сушарок з киплячим шаром відносяться: підвищена витрата енергії та можливе вибухонебезпечне пилоутворення матеріалу.

4.9.2.5. Барабанні сушарки

Застосовується для сушіння соди, солей, добрив, отрутохімікатів, палива, паст. Сушильний агент – повітря або димові гази, які рухаються прямо- або протитечійно з матеріалом. Сушарка (рис. 4.14) складається з барабану 1, до якого кріпляться бандажі 9, що спираються на опорні 3 і опорно-упорні 6 ролики. Обертання барабану передається від електродвигуна через редуктор 4, зубчатий вінець 5 і зубчате колесо 11, яке закривається щитком 10. Потужність, електродвигуна $N_{ed} = 1\text{--}40$ кВт, частота обертання барабану 1–8 об./хв. Розміри нормалізовані: діаметр від 1 до 2,8 м, довжина барабану 4, 6, 8–22 м. Матеріал, що висушується, через живильник 13 подається в приймальну камеру 8, а з неї – на приймально-гвинтову насадку 12. Лопаті насадки піднімаються і при обертанні барабану скидають матеріал. Барабан встановлений під кутом до 6° до горизонту. Між барабаном, що обертається, і нерухомою вивантажувальною камерою 2 встановлений ущільнювач 7. Для великих шматків і матеріалів, здатних до налипання, використовується лопатева насадка, для сипких – розподільна, для пилоутворюючих матеріалів – перевалочна із закритими комірками. Коефіцієнт заповнення барабану – відношення площі поперечного перерізу, заповненого матеріалом, до площі перерізу барабану, $\beta=0,05\text{--}0,235$. Нахил барабану і лопаті сприяють переміщенню матеріалу уздовж осі. Для виключення винесення газів та дрібних частинок матеріалу швидкість газового потоку повинна бути в межах 2–5 м/с. Відпрацьовані гази проходять систему пилоочищення і видаляються в атмосферу. Для запобігання сплюсненню барабану в місці опор, він обладнаний кільцевими накладками під бандажами, товщина яких в 1,5–3 рази перевищує товщину барабану. Бандажі відливають з чавуну СЧ18 або СЧ21, вони служать для передачі тиску від барабану на ролики. Їх закріплюють на барабані за допомогою башмаків, приварених до

кільцевих накладок. Виступи сусідніх башмаків повернені в різні боки, що запобігають осьовому зсуву барабану. Опорно-упорна станція включає і плити, встановлені під барабаном. На ній розташовані підшипники.

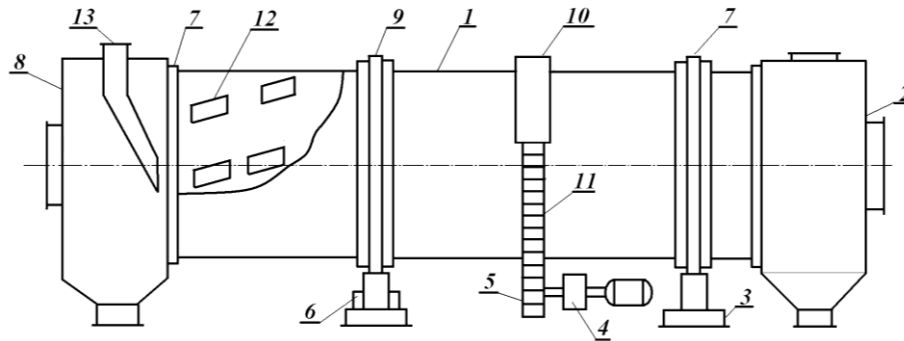


Рис. 4.14. Барабанна сушарка:

1 – барабан; 2 – вивантажувальна камера; 3, 6 – опорні і опорно-упорні ролики; 4 – редуктор; 5 – зубчатий вінець; 9 – бандажі; 10 – щиток; 11 – зубчате колесо; 12 – приймально-гвинтова насадка; 13 – живильник.

Укріплені чотири підшипникові вузли для опорних роликів. Упорні ролики розміщені під кутом до вертикалі. Бандаж упирається в упорні ролики торцевими поверхнями. Сушарки працюють під низьким вакуумом 50–250 Па, що виключає вихід у цех димових газів. Для герметизації використовують сальникові, стрічкові та секторні ущільнення. В апаратах діаметром до 2,8 м і температурою стінки барабана до 90 °С рекомендується використовувати стрічкові ущільнення, в апаратах великого діаметру – секторні.

4.9.2.6. Розпилювальні сушарки

Застосовуються для сушіння концентрованих розчинів речовин, суспензій, емульсій, паст. Готовий продукт одержують у вигляді порошку або гранул. У залізобетонному корпусі 1 (рис. 4.15) розташовані форсунки 2, через які матеріал розпилюється. Розпил збільшує площу поверхні контакту матеріалу, що інтенсифікує процес сушіння, тривалість якого складає 15–20 с. У сушильну камеру гаряче повітря подається по прямо- або по протитечійній схемі й відводиться з камери через пилоловлюючий пристрій. Висушений матеріал падає вниз на прожарювальні тарілки 3, що обігріваються димовими газами. Гребками 4 матеріал переміщається з тарілки на тарілку і після проходження охолоджуючої тарілки виводиться з сушарки. Гребки кріпляться на валу і приводяться в обертання від електродвигуна 5.

Схема установки з розпилювальною сушаркою представлена на (рис. 4.16). Повітря вентилятором 1 через калорифер 2 подається в розпилювальну сушарку 3, у верхній частині якої розташований розпилювальний пристрій 4. Сушильний агент з апарату проходить пилоочисний пристрій 6 (циклон, рукавний фільтр) і вентилятором 5 викидається в атмосферу.

За способом розпилювання апарати класифікують на відцентрово-розпилювальні (РВ) і форсуночно-розпилювальні (РФ). У відцентрових продукт

розпилюється диском, закріпленим на вертикальному валу, який обертається електродвигуном через підвищуючий редуктор. Форсуночно-розпилювальні сушарки забезпечуються пневматичними або механічними форсунками.

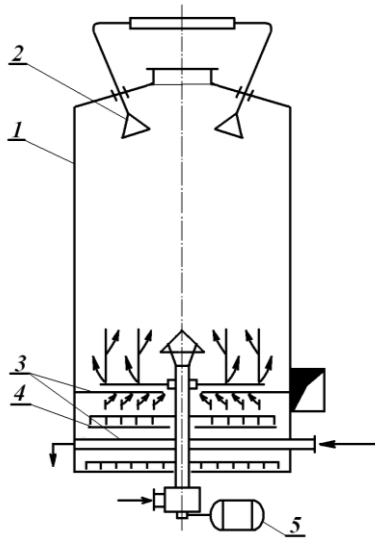


Рис. 4.15. Розпилювальна сушарка:

- 1 – корпус; 2 – форсунки;
3 – прожарювальна тарілка; 4 – гребки;
5 – електродвигун.

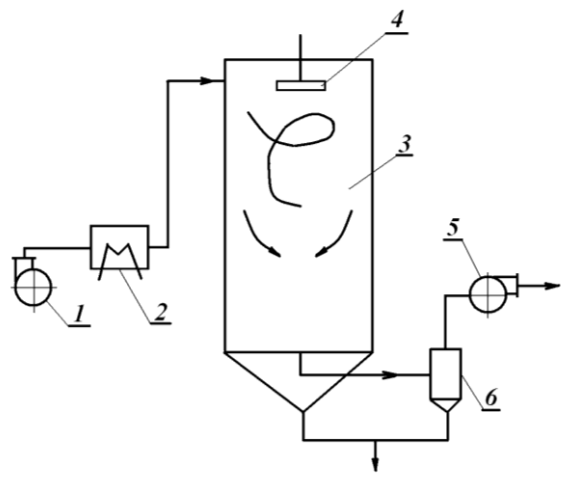


Рис. 4.16. Схема установки з розпилювальною сушаркою:

- 1 – вентилятор; 2 – калорифер; 3 – сушарка;
4 – розпилювальний пристрій; 5 – вентилятор;
6 – пилоочисний пристрій.

4.9.2.7. Комбіновані сушарки

Одним з типів комбінованої сушарки є сушарка «циклон - киплячий шар» (рис. 4.17). Вологий матеріал подається відпрацьованим сушильним агентом через пневможивильник 1 в циклон 2, де він підсушується і змішується з частинками сухого матеріалу, що виноситься з сушарки киплячого шару 5. Це перешкоджає злипанню і грудкуванню матеріалу в циклоні. Матеріал, що став сипким, підхоплюється в живильнику 3 свіжим сушильним агентом і поступає у пневмотрубу 4, де видаляється незв'язана волога, а потім – у сушарку 5. Задана кінцева вологість досягається створенням киплячого шару відповідної висоти.

4.9.2.8. Аерофонтанні сушарки

Застосовуються для видалення слабкозв'язаної вологи з дисперсних матеріалів неоднорідного гранулометричного складу в умовах, коли швидкість витання частинок значно змінюється. Аерофонтанна сушарка є апаратом циліндричної форми з конічним днищем (рис. 4.18), у якому частинки матеріалу циркулюють доти, доки їхня швидкість витання не стане меншою за швидкість газового потоку. Повітря вентилятором 5 через калорифер 1 подається в аерофонтанну сушарку 3. Гаряче повітря підхоплює вологий матеріал, що поступає з живильника 2, вносячи його в конічну частину сушарки 3. У верхній частині конусу швидкість зменшується і матеріал уздовж стінок переміщається у зворотному напрямі, що створює інтенсивну циркуляцію. Для

очищення повітря служить циклон 4. Вивантаження висушеного матеріалу проводиться з циліндричної частини апарату, в цей самий канал поступають частинки, вловлені у циклоні. Сушарки виконуються з газорозподільною решіткою і без неї. В останньому випадку швидкість газу у вузькій частині апарату $w_n = (1-2)w_v$, де w_v – швидкість витання. У широкій частині апарату швидкість потоку близька до швидкості псевдозрідження.

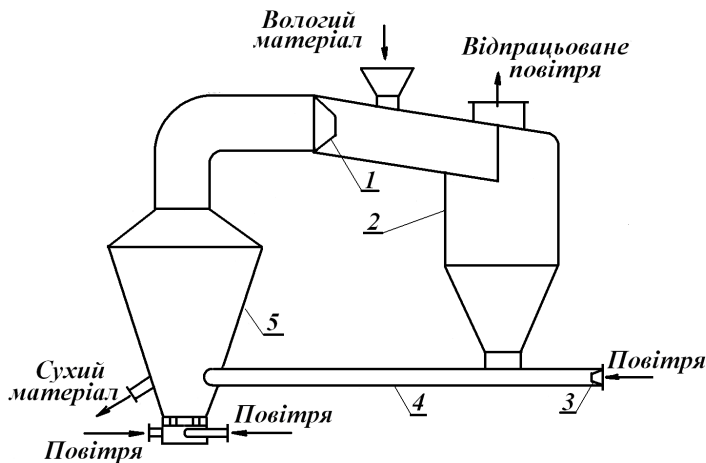


Рис. 4.17. Комбінована сушарка:

1 – пневможивильник; 2 – циклон; 3 – живильник;
4 – пневмотруба; 5 – сушарка.

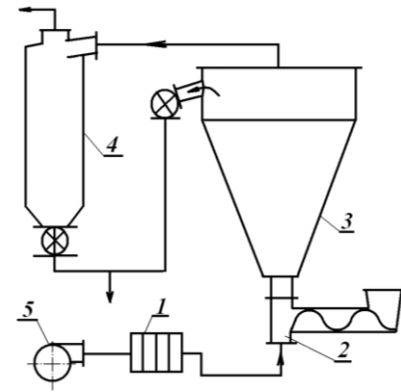


Рис. 4.18. Схема установки з аерофонтанною сушаркою:

1 – калорифер; 2 – живильник;
3 – аерофонтанна сушарка; 4 – циклон;
5 – вентилятор.

4.9.2.9. Сушіння матеріалів у режимі пневмотранспорту

Застосовується для сушіння сипких матеріалів для видалення вільної або слабкозв'язаної вологи. Не застосовується для сушіння частинок розмірами 8–10 мм і видалення зв'язаної вологи. Такий спосіб сушіння реалізується в пневмотрубах і вихрових або циклонних сушарках. Діаметр труб до 1 м, довжина до 25 м. Швидкість теплоносія 10–40 м/с, тому процес сушіння триває кілька секунд. Матеріал з бункера 2 (рис. 4.19) двошнековим живильником 1

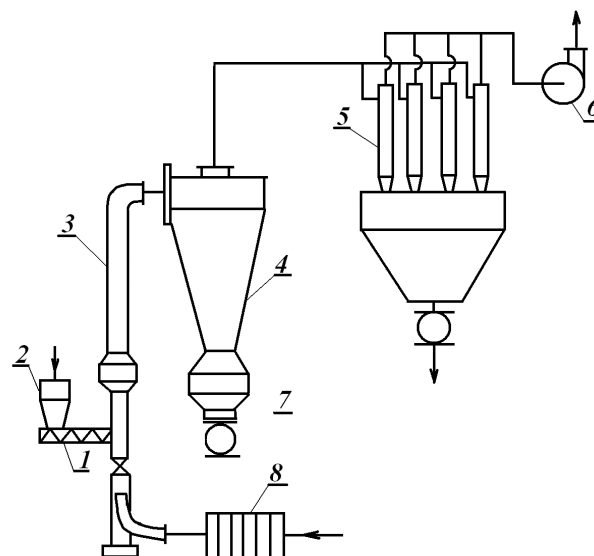


Рис. 4.19. Схема установки для сушіння в режимі пневмотранспорту:

1 – живильник; 2 – бункер; 3 – труба; 4 – циклон; 5 – система тонкого пилоочищення;
6 – вентилятор; 7 – затвор.

подається в трубу 3, в яку з калорифера 8 поступає гаряче повітря. Матеріал підхоплюється теплоносієм і транспортується в циклон 4. У трубі 3 відбувається інтенсивне сушіння матеріалу. З циклону висушений матеріал вивантажується через затвор 7, а повітря проходить систему тонкого пилоочищення 5 і вентилятором 6 викидається в атмосферу. Процес сушіння інтенсивний на нестационарній ділянці труби, де видаляється до 55% вологи. Для створення нестационарних умов руху газової суспензії труби постачають розширювачами, гвинтовими вставками і т. ін.

4.9.3. Кондуктивні сушарки

4.9.3.1. Барабанна роторна вакуумна сушарка

Серійно випускають барабанні вакуумні сушарки з плаваючим барабаном і роторні (рис. 4.20). Роторна сушарка (рис. 4.20, а) є горизонтальним циліндричним барабаном 1 з оболонкою 2. У середині барабану встановлений ротор 3 (перемішуючий пристрій) з гребками 6, які зігнуті на одній половині барабану в один бік, а на другій – в інший. Реверсивне обертання ротора автоматичне, напрям обертання міняється через 5–8 хв. Матеріал завантажується через люк 5 і гребками переміщається до периферії барабану; при обертанні ротору в інший бік матеріал переміщається до вивантажувального люка 4. Пара для обігріву підводиться в оболонку через

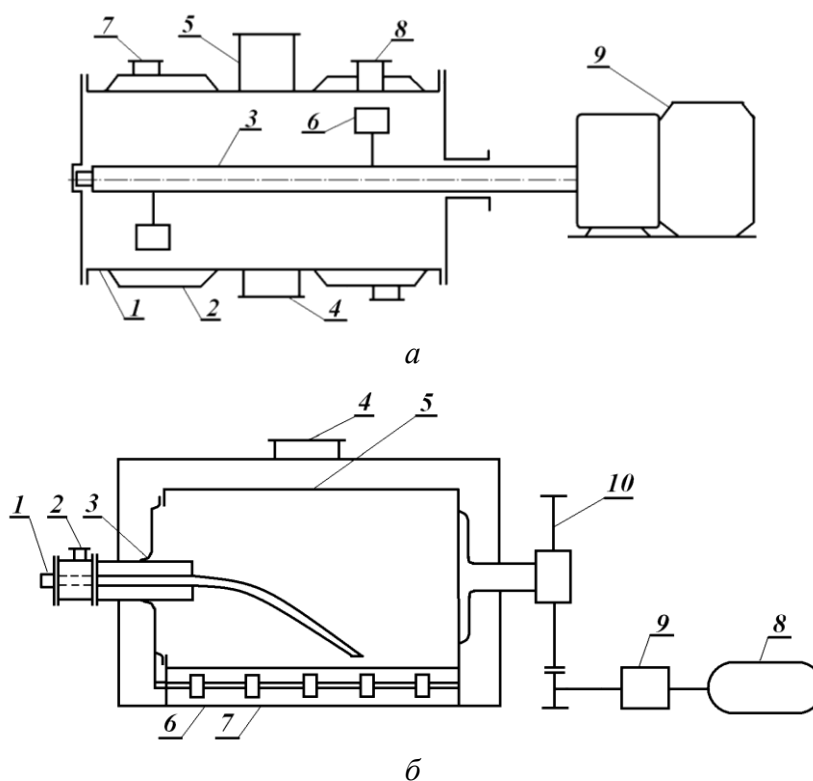


Рис. 4.20. Кондуктивні сушарки:

- а) барабанна роторна вакуумна: 1 – барабан; 2 – оболонка; 3 – ротор; 4 – вивантажувальний люк; 5 – завантажувальний люк; 6 – гребки; 7, 8 – патрубки; 9 – редуктор;
 б) одновальцева: сифонна трубка; 2, 4 – патрубки; 3 – цапфа; 5 – валець; 6 – лоток; 7 – мішалка; 8 – електродвигун; 9 – редуктор; 10 – шестерні.

патрубок 7, а випарена волога з барабану виходить через патрубок 8. Обертання здійснюється від електродвигуна через редуктор 9.

Конденсат відводиться через сифонову трубку 1. Вологий матеріал подається в лоток 6, де перемішується мішалкою 7. При обертанні вальця на його зовнішній поверхні утворюється тонка плівка матеріалу, яка калібрується скребком. Сушіння матеріалу відбувається короткочасно в тонкому шарі на поверхні барабану. Висушений матеріал зрізається ножом і по фартуху зсипається в ящик. Вологе повітря видаляється через патрубок 4. У вакуумних сушарках робочі елементи розміщуються у кожусі, сполученому з вакуумною системою. Частота обертання вальця вибирається залежно від тривалості сушіння.

4.9.3.2. Одновальцева сушарка

Вальцеві апарати призначені для сушіння в'язких і пастоподібних продуктів при атмосферному тиску або вакуумі. Ці апарати – безперервної дії. Сушарка (рис. 4.20, б) являє собою порожнистий чавунний валець 5, який обертається від електродвигуна 8 через редуктор 9 і шестерні 10. Пара усередину вальця поступає через патрубок 2 і цапфу 3. Конденсат відводиться через сифонну трубку 1. Вологий матеріал подається в лоток 6, де перемішується мішалкою 7. При обертанні вальця на його зовнішній поверхні утворюється тонка плівка матеріалу, яка калібрується шкребком. Сушіння матеріалу відбувається швидко у тонкому шарі на поверхні барабану. Висушений матеріал зрізається ножом і по фартуху зсипається у ящик. Вологе повітря видаляється через патрубок 4. У вакуумних сушарках робочі елементи знаходять у кожусі, з'єднаному з вакуумною системою. Частота обертання вальця вибирається у залежності від тривалості сушіння.

4.9.4. Спеціальні сушарки

4.9.4.1. Сушарка для терморадіаційного сушіння

Сушіння проводиться за допомогою інфрачервоного випромінювання (рис. 4.21, а). Застосовується для сушіння лакофарбових покриттів різних виробів, тонких паперових і текстильних матеріалів, подрібнених харчових продуктів і сипких матеріалів. Інтенсивність випаровування вологи в порівнянні з конвективним і контактним способами сушіння збільшується в десятки разів. Це пояснюється тим, що кількість теплоти, яка передається матеріалу, набагато вища, ніж, наприклад, при конвективному способі сушіння. Терморадіаційні сушарки бувають стаціонарні й переносні.

Сушарка складається з ванни лакування 1 і наносних валів лакувань 2. Усередині закритого кожуха розташовується стрічковий транспорт 3, який приводиться в рух від приводної зірочки 7. Вироби або сипкі матеріали

переміщуються транспортом усередині сушарки, проходять під дзеркальними лампами 4 і висушуються. Вологе повітря йде через витяжний повітропровід 5.

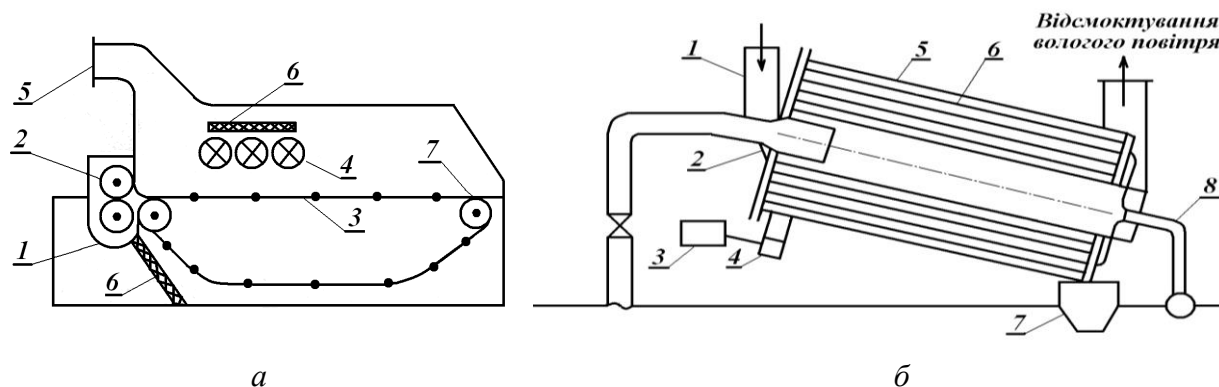


Рис. 4.21. Спеціальні сушарки:

а) терморадіаційна для сушіння лакованих деталей: 1 – ванна для лакування; 2 – наносні вали; 3 – стрічковий транспорт; 4 – дзеркальні лампи; 5 – повітропровід; 6 – термоізоляційні листи; 7 – провідна зірочка;

б) трубчаста: 1 – завантажувальний пристрій; 2 – цапфа; 3 – редуктор; 4 – фрикційний привод; 5 – похилий барабан; 6 – трубки; 7 – камера; 8 – трубопровід.

Для зменшення теплових втрат в навколишнє середовище встановлюються теплоізоляційні листи 6.

За виглядом генераторів випромінювання сушарки поділяються на лампові; з кварцовими, трубчастими або спіральними електронагрівачами; з металевими й керамічними виробами при газовому обігріві.

У сушарці поєднується радіаційний та конвективний способи сушіння. У радіаційній зоні, розташованій безпосередньо під лампами, відбувається швидке нагрівання виробу до 140–150 °С, при цьому з півки випаровується до 90% розчинника. У конвективній зоні, яка охоплює практично весь простір сушарки, відбувається вирівнювання температур по поверхні виробу і полімеризація покриття. Тривалість сушіння 10 хв. Газ спалюють в щільних пальниках, встановлених у нижній топковій зоні радіаційних панелей. Продукти згоряння змішуються з газами, які циркулюють у конвективній зоні.

4.9.4.2. Трубчасті сушарки

Застосовуються головним чином для сушіння вугілля (рис. 4.23). Трубчаста сушарка являє собою похилий барабан 5, що обертається, в днищах якого завальцьовані трубки 6 діаметром 108×4 мм для бурих і 128×4,5 мм для кам'яного вугілля. Вологий матеріал через завантажувальний пристрій 1 подається в трубки і при обертанні барабану пересувається по них до виходу для вивантаження в камеру 9. Для кращого заповнення, перемішування і дроблення матеріалу трубки всередині заповнені гвинтовими металевими вставками 7. Для обігрівання використовується пара з відбору турбін, яка подається в міжтрубний простір барабану по трубопроводу через цапфу 2. Обертання барабану передається від електродвигуна через редуктор 3 і фрикційний привод 4. Витрата електроенергії складає 5–6 кВт·год. на 1т випареної вологи. Конденсат з міжтрубного простору виводиться через трубки

10. Вологе повітря відсмоктується в атмосферу. Висушений матеріал шнеком 8 видаляється з сушарки.

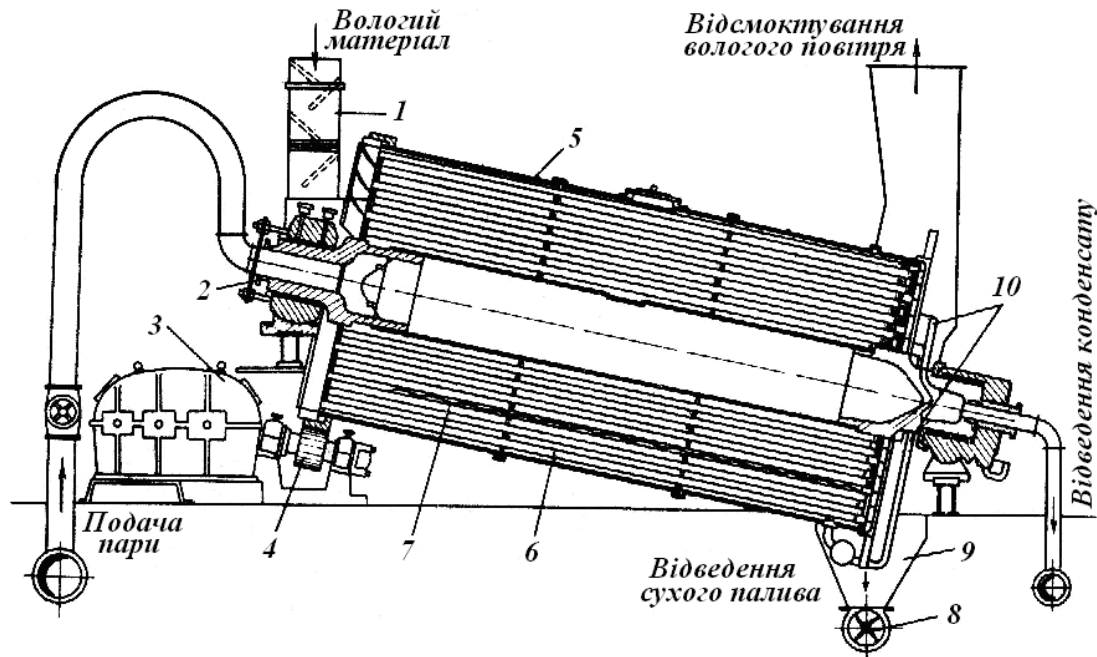


Рис. 4.23. Трубчаста сушарка:

1 – завантажувальний пристрій для подачі вологого матеріалу; 2 – передня цапфа; 3 – редуктор; 4 – фрикційний привод; 5 – барабан сушарки; 6 – трубки; 7 – гвинтові вставки у трубках; 8 – шнек; 9 – камера для вивантаження матеріалу; 10 – трубки для виведення конденсату.

4.9.4.3. Сублимаційна сушарка

Застосовується для вельми чутливих до нагрівання біологічних фармацевтичних матеріалів. Теплота на випаровування береться з навколишнього середовища. Сушарка (рис. 4.24) складається з сублиматора 1 з гріючими плитами і деками для продуктів. Сублимація є процесом переходу з твердого стану в газоподібний, сушіння проводиться при залишковому тиску 26,6–266 Па. Пара з сублиматора поступає в конденсатор-виморожувач, в якому вакуум-насосом 3 створюється вакуум. Пара конденсується, а потім волога

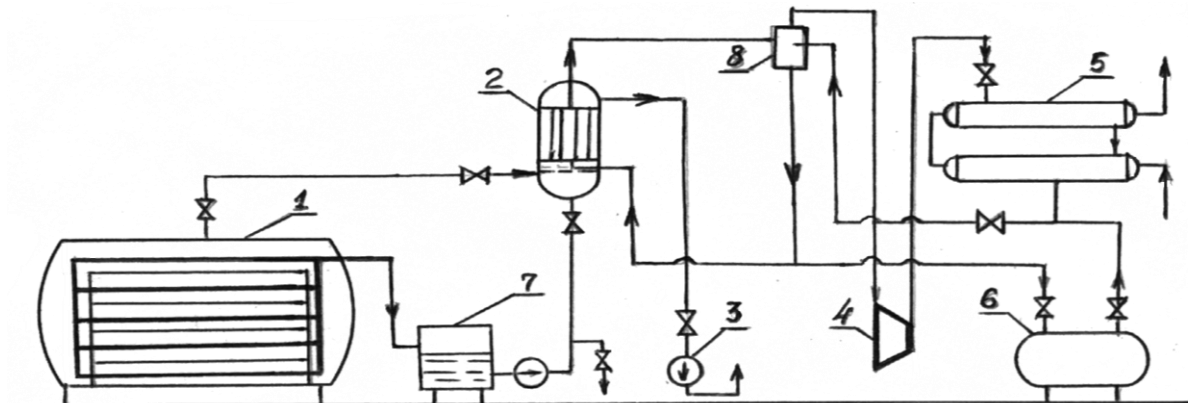


Рис. 4.24. Принципова схема сублимаційної сушарки:

1 – сублиматор з гріючими плитами і деками для продуктів; 2 – конденсатор–виморожувач пари з сублиматору; 3 – вакуум-насос; 4 – компресор холодильної установки; 5 – трубчастий конденсатор; 6 – ресивер; 7 – бак гарячої води для відтлювання льоду в конденсаторі й сублиматорі; 8 – сепаратор вологи.

замерзає на поверхні охолоджуючих елементів конденсатору. Теплота конденсації переходить до вологої пари холодоагенту, яка поступає в сепаратор вологи 8, потім на компресор 4, де стискається, а потім конденсується в трубчастому конденсаторі 5. Рідкий холодоагент після сепаратору знову поступає в елементи конденсатора-виморожувача. Ресивер 6 служить для вирівнювання тиску. Для швидкого відтаювання і зняття льоду використовується гаряча вода, яка насосом з баку 7 подається в конденсатор і сублиматор; $t_{\text{води}} = 40\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.9.4.4. Сушарки для сушіння струмами високої частоти

При такому сушінні внутрішні більш вологі шари матеріалу нагріваються швидше за зовнішні, тому у внутрішніх шарах встановлюється вища температура. Під дією градієнту температур волога інтенсивно переміщається на поверхню. Високочастотні сушарки складаються з високочастотного генератора і сушильної камери і відрізняються одна від одної будовою камери, конструкцією генератора і укладкою електродів. Через значну витрату електроенергії вони не знайшли широкого застосування.

5. ХОЛОДИЛЬНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ

5.1. Елементи компресорних холодильних машин

Компресор є основним елементом холодильної машини. Теоретичний робочий процес в компресорі відрізняється від дійсної індикаторної діаграми. Відхилення пояснюється низкою причин [4].

1. Розширенням пари з шкідливого простору, яке виражається в частках робочого об'єму циліндру C :

$$C = \frac{V_c}{V_p}, \quad (5.1)$$

де V_c – об'єм шкідливого простору; V_p – робочий об'єм.

2. Опором в клапанах при всмоктуванні та нагнітанні. В результаті всмоктування відбувається при нижчому тиску, а нагнітання – при вищому.

3. Теплообміном між стінками циліндра і холодоагентом.

4. Пропусканням через нещільності в клапанах, сальниках, поршневих кільцях і т.ін.

Всі втрати в компресорі характеризуються коефіцієнтом подачі

$$\lambda = \frac{V_g}{V_n}, \quad (5.2)$$

де V_g – дійсний об'єм, засмоктуваний компресором;

V_n – об'єм, який описує поршень.

Компресор характеризується індикаторним к.к.д. – η_i і механічним к.к.д. – η_m

$$\eta_i = \frac{N_{ad}}{N_i} = \frac{L_{ad}}{L_i}; \quad \eta_m = \frac{N_i}{N_e}, \quad (5.3)$$

де N_{ad} , L_{ad} , L_i – відповідно потужність (Вт) та робота (Вт) при адіабатному та ізотермічному стискуванні;

N_i – індикаторна потужність,

N_e – ефективна потужність.

$$N_e = N_i + N_{mp}. \quad (5.4)$$

Потужність, витрачена на тертя N_{mp} , кВт:

$$N_{mp} = \frac{V_k \cdot P_{mp} \cdot 10^4}{3600 \cdot 102}. \quad (5.5)$$

Для вертикальних аміачних компресорів $P_{mp} = 0,61 \cdot 10^5$ Па, фреонових – $P_{mp} = (0,3-0,5)10^5$ Па.

Підбір компресора проводиться за величиною холодопродуктивності. Зіставлення продуктивності різних компресорів здійснюється за стандартних умов: температура кипіння $t_0 = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура конденсації $t = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура переохолодження $t_n = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура усмоктування: NH_3 $t_{\text{усм}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, фреону -2 $t_{\text{усм}} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Конденсатор. У конденсаторі конденсуються пари холодоагенту. Теплота перегріву пари, конденсації і переохолодження конденсату відводиться водою або повітрям. Температуру конденсації приймають на кілька градусів (3–5) вищою за температуру охолоджуючої води. Конденсатори поділяються на три групи:

1. Конденсатори, в яких теплота повністю передається воді: занурені, протитечієві з подвійних труб, елементні, кожухотрубні.
2. Конденсатори, в яких теплота частково передається воді, а частково повітрю: зрошувальні, випарні.
3. Конденсатори з повітряним охолодженням.

Для розрахунку конденсатора задається: тип, холодопродуктивність, індикаторна потужність компресора N_i , температура охолоджувальної води. Розрахунок конденсатору ведеться так само, як і звичного теплообмінника. Поверхня конденсації визначається із загального рівняння теплопередачі

$$F = \frac{Q \cdot \Delta t}{K}.$$

Випарники призначені для випаровування краплин вологої насиченої пари холодоагенту.

За виглядом охолоджуваного середовища випарники поділяють:

1. Випарники для охолодження рідин (води, розсолу) – занурені змішувальні, вертикально-трубчасті секційні, кожухотрубні.
2. Випарники для охолодження повітря: випарники з природною циркуляцією повітря (пристінні й стельові батареї); випарники з примусовою циркуляцією повітря від вентилятору.

При розрахунку випарників-теплообмінників задається тип, холодопродуктивність Q_0 , температура і властивості охолоджуваного середовища. Визначається величина теплообмінної поверхні.

Аналіз роботи випарників показує:

1. Швидкість охолоджуваного теплоносія повинна підтримуватись 1,5–2 м/с.
2. Концентрацію розсолу вибирають по можливості меншою.
3. Різниця між температурою випаровування холодоагенту і температурою середовища приймають 5–6 $^{\circ}\text{C}$.
4. Втрати тиску $\Delta P = \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{м.о}}$

5.2. Абсорбційні й паро-ежекторні холодильні машини

5.2.1. Принципи дії, область застосування

Відведення теплоти від середовища, що охолоджується, в абсорбційній холодильній машині відбувається за рахунок різниці температур між середовищем і холодоагентом, який випаровується у випарнику. Як холодоагент використовують водно-аміачний розчин, аміак служить холодоагентом, а вода – поглиначем. Для високих температур випаровування застосовується система фреон-22 – діметилефіртетраетиленгліколь, а також вода – бромистий літій.

Рідкий холодоагент дроселює в дросельному вентилі 1 (рис. 5.1) і переходить в стан вологої насиченої пари, яка поступає у випарник 3, розташований в камері охолодження 2. За рахунок різниці температур теплота відводиться від об'єкту охолодження і холодоагент переходить в стан, близький до сухої насиченої пари, яка поступає в абсорбер 4, де поглинається слабонасиченим розчином аміаку. Більш концентрований розчин поступає в генератор-кип'ятильник 6, куди розчин подається насосом 5 з абсорбера 4. За рахунок підведення теплоти в генераторі розчин кипить, пари аміаку прямують у конденсатор 8, а слабонасичений розчин через дросельний ventиль 7 повертається в абсорбер 4. У конденсаторі пари аміаку конденсуються, і рідкий аміак поступає на дросельний ventиль 1. Абсорбційні машини можуть успішно конкурувати з компресійними за наявності дешевих низькопотенційних джерел теплоти.

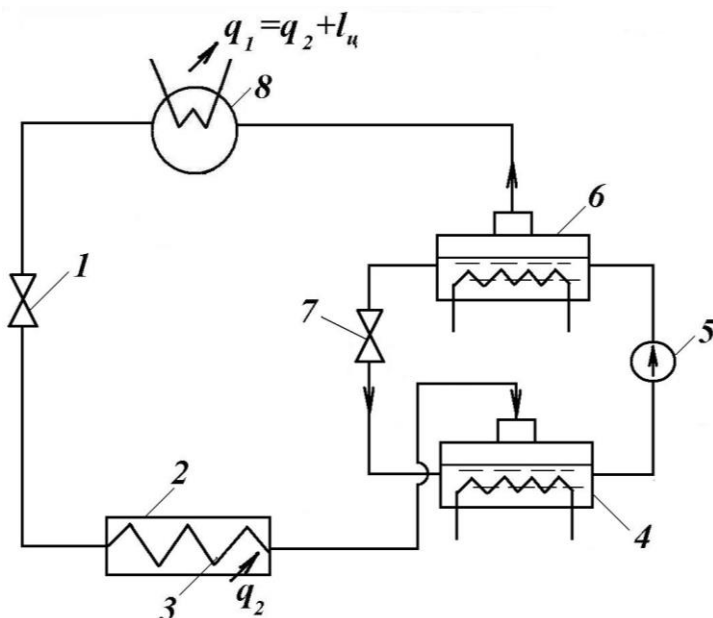


Рис. 5.1. Схема абсорбційної холодильної установки:

1,7 – дросельні ventилі; 2 – камера охолодження;
3 – випарник; 4 – абсорбер; 5 – насос; 6 – генератор-кип'ятильник; 8 – конденсатор.

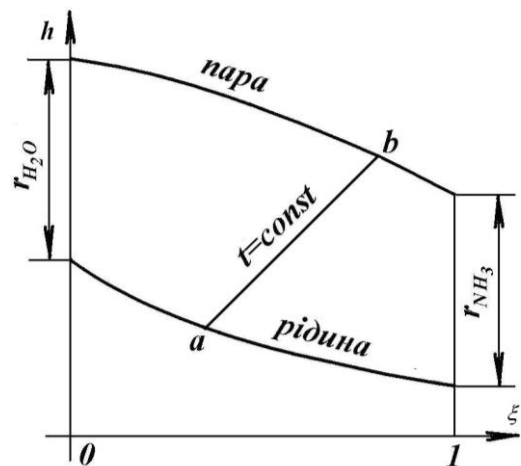


Рис. 5.2. h - ξ діаграма розчину аміаку:

Лінія ab – ізотерма. Точка a відповідає вмісту аміаку в рідині, точка b – у парі.

Склад суміші характеризується кількістю аміаку в 1 кг суміші, тобто масовою концентрацією

$$\xi = \frac{G_{NH_3}}{G_{NH_3} + G_{H_2O}}, \quad (5.1)$$

де G_{NH_3} , G_{H_2O} – маси аміаку і води в розчині.

Температура кипіння розчину при заданому тиску залежить від концентрації розчину. Пара, що утворюється при кипінні, має таку ж температуру, як розчин, але іншу концентрацію – у ній міститься більше аміаку.

Розрахунок абсорбційних машин проводиться за допомогою h - ξ діаграми, яка будується на основі експериментальних даних (рис. 5.2). Верхня крива відповідає конденсації пари, нижня – кипінню рідини. Різниця координат при $\xi=0$ відповідає теплоті перетворення r_{H_2O} , при $\xi=1$ – теплоті пароутворення чистого аміаку r_{NH_3} . Між кривими рідина–пара розташована область вологої насиченої пари, вище за криву пари – область перегрітої пари, нижче за криву кипіння – область рідини.

5.2.2. Елементи абсорбційних холодильних машин

Генератори служать для випаровування водно-аміачного розчину. За конструкціями кожухотрубні генератори виконуються вертикальними і горизонтальними (рис. 5.3). Обігрівуються паром, газами, гарячими рідинами.

Коефіцієнти теплопередачі визначаються на основі дослідних даних. Робота генераторів стає зрозумілою при розгляді рис. 5.3.

Абсорбери служать для поглинання слабким водно-аміачним розчином пари аміаку з випарника. Теплота абсорбції відводиться водою. Виконуються кожухотрубними, горизонтальними і вертикальними (рис. 5.4), кожухозмієвиковими, елементними і зрошувальними. Слабкий розчин стікає у вигляді плівки по вертикальних або горизонтальних змієвикових поверхнях, стикається з паром, що підіймається, і поглинає його. Коефіцієнти теплопередачі приймаються на основі дослідних даних.

Ректифікатори призначені для підвищення і вирівнювання концентрації пари, що утворюється в генераторі. Їх поміщають у верхній частині генератора і конструктивно виконують тарілчастими або насадковими. Пара контактує з рідиною. Для подальшого відділення водяної пари застосовують дефлегматори, які охолоджуються водою або розчином.

Конденсатори і випарники конструктивно не відрізняються від аналогічних апаратів компресійних машин.

Абсорбційні машини встановлюють на розбірних каркасах усередині або поза приміщенням. Взаємне розташування апаратів залежить від типу, холодопродуктивності й призначення установки. Машина забезпечується

ресиверами для міцного розчину і рідкого аміаку. Водно-аміачний насос – найчастіше поршневий – розташовують після збірника міцного розчину.

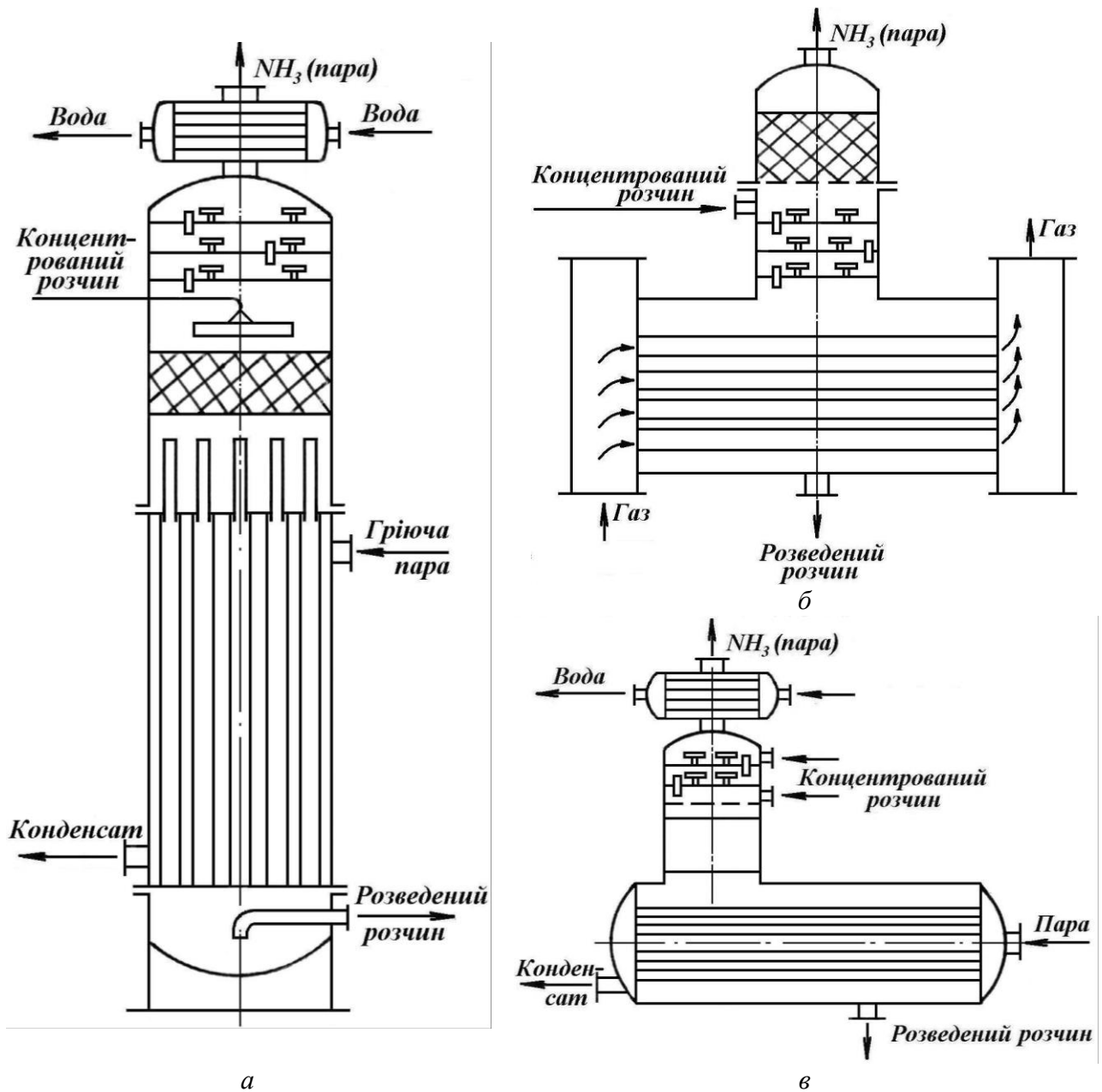


Рис. 5.3. Кожухотрубні генератори:

а) вертикальний; *б*) горизонтальний з газовим обігрівом; *в*) горизонтальний з паровим обігрівом.

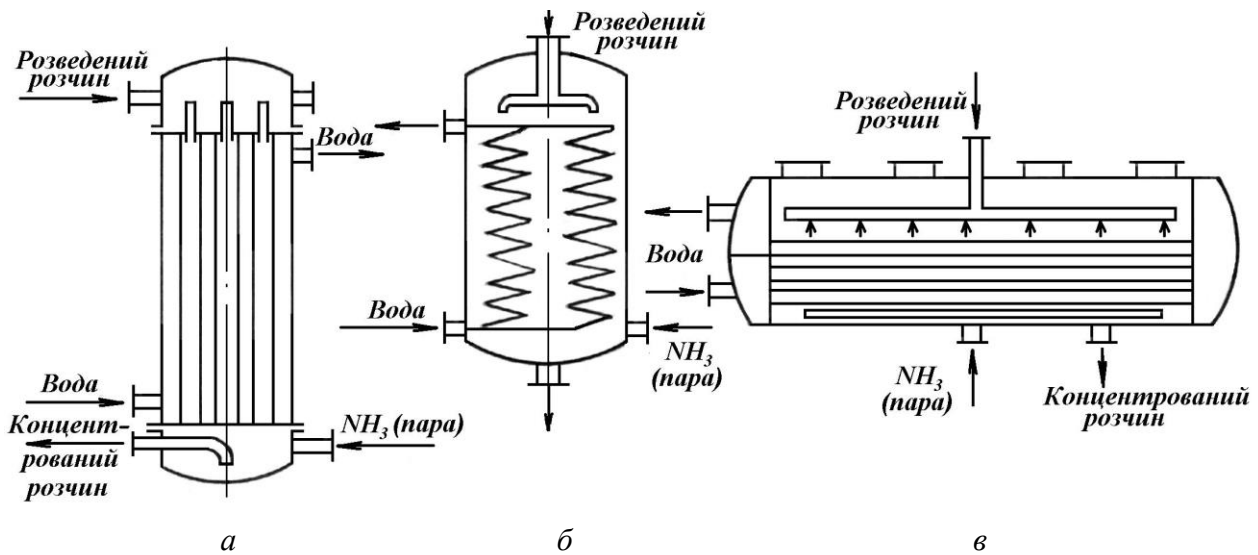


Рис. 5.4. Конструкції абсорберів:

- а) вертикальний кожухотрубний з пливковим зрошенням; б) кожухозмійовиковий;
в) горизонтальний кожухотрубний з форсунками.

5.2.3. Паро-ежекторні холодильні машини

Робочим тілом в таких машинах служить вода. Схема і цикл установки представлений на рис. 5.5. Тут на рис. 5.5, б вказані процеси:

1-2 – необоротний процес дроселювання в дросельному вентилі 1. Вода з рідкого стану переходить в стан вологої пари з невеликим значенням ступеня сухості x ;

2-3 – випаровування краплин вологої насиченої пари у випарнику 3 камери охолодження 2. Теплота відводиться за рахунок різниці температур і витрачається на випаровування краплин. $P=(4-5)10^{-2}$ Па;

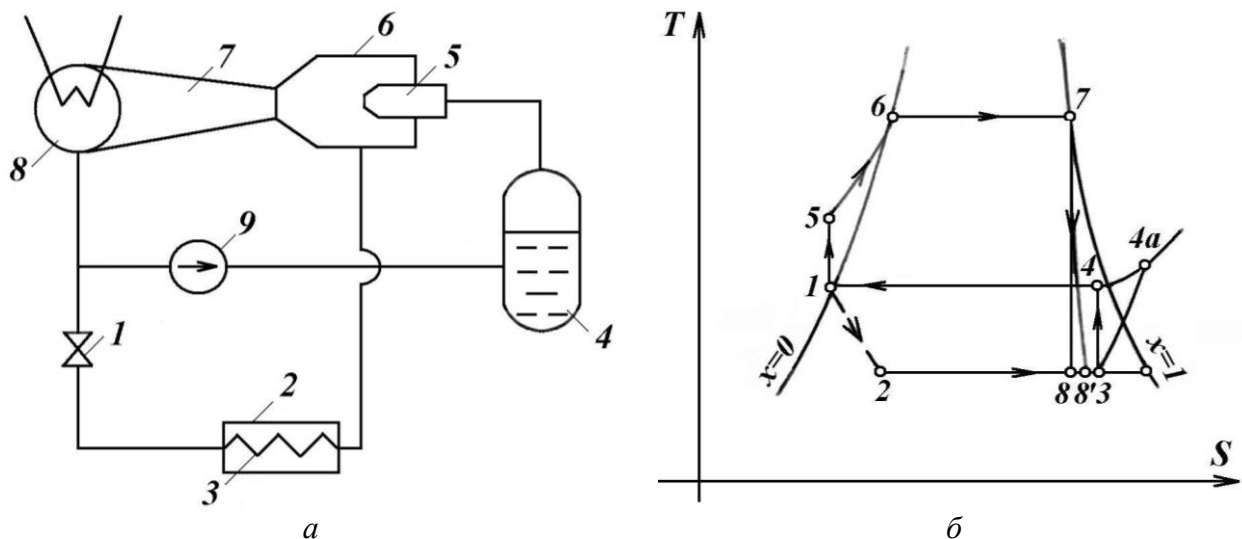


Рис. 5.5. Схема (а) та цикл (б) паро-ежекторної холодильної установки в Т-S-діаграмі:

- 1 – дросельний вентиль; 2 – камера охолодження; 3 – випарник; 4 – паровий котел; 5 – сопло;
6 – камера змішування; 7 – дифузор; 8 – конденсатор.

3-4 – адіабатне стиснення суміші пари високого й низького тиску в дифузори 7 парового ежектора 6;

4-1 – конденсація суміші пари в конденсаторі 8;

1-5 – стиснення холодоагенту в насосі 9;

5-6 – підігрівання води до температури кипіння в паровому котлі 4;

6-7 – пароутворення в котлі 4 (ізобарно-ізотермічний процес);

7-8 – адіабатне розширення пари високого тиску в соплі 5 парового ежектора 6. З сопла пара виходить з великою швидкістю, створюючи біля струменя область зниженого тиску, за рахунок цього відбувається підсмоктування пари з випарника.

Дійсні процеси розширення в соплах 5 – лінія 7-8', стиснення в дифузори – лінія 3-4 а.

Тепловий баланс установки:

$$Q = Q_0 + Q_h + L_n, \quad (5.2)$$

де Q – теплота, відведена в конденсаторі,

Q_0 – теплота, підведена у випарнику,

L_n – робота насоса.

Робота парового інжектора характеризується коефіцієнтом інжекції

$$U = \frac{G_x}{G_p}, \quad (5.3)$$

де G_x – кількість підсмоктуваної пари низького тиску,

G_p – кількість пари високого тиску.

Коефіцієнт інжекції залежить від температури у випарнику і конденсаторі, втрат у соплі, у камері змішування і дифузори, пов'язаних з безповоротністю процесів.

Спрощена формула для розрахунку коефіцієнта інжекції має вигляд

$$U = 0,75 \sqrt{\frac{i_7 - i_8}{i_4 - i_3} - 1}, \quad (5.4)$$

де i_3, i_4, i_7, i_8 – ентальпія пари у відповідних точках.

За коефіцієнтом інжекції знаходять параметри у вузлових точках циклу, необхідних для розрахунку дійсного циклу, оцінки загальних втрат системи і визначення коефіцієнту використання теплоти.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Ардашев, В.О.** Машины і апарати хімічних виробництв. Курс лекцій [Текст] / В.О.Ардашев, К.В.Луняка, Г.А.Чумаков: навчальний посібник. – Херсон : ХНТУ, 2008. – 153 с.
2. **Дытнерский, Ю.И.** Процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учебник для вузов. В 2-х кн. / Ю.И.Дытнерский. – М.: Химия, 2002.– Кн.1. 400 с. Кн. 2. 368 с.
3. **Кулинченко, В.Р.** Справочник по теплообменным расчетам [Текст] / В.Р.Кулинченко. – Киев : 1990. – 164 с.
4. **Лебедев, П.Д.** Теплообменные, сушильные и холодильные установки [Текст] / П.Д.Лебедев. – М. : Энергия, 1972.– 318 с.
5. **Михеев, М.А.** Основы теплопередачи [Текст] / М.А.Михеев, И.М.Михеева. – М. : Энергия, 1977.– 344 с.
6. **Павлов, К.Ф.** Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии [Текст] / К.Ф.Павлов, П.Г.Романков, А.А.Носков. – Л. : Химия, 1987 – 576 с.
7. Промышленные тепломассовые процессы и установки [Текст] / А.М. Бакластов и др. : учебник для вузов. / Под. ред. А.М. Бакластова. – М. : Энергоатомиздат, 1986.– 328 с.
8. Теплоиспользуемые установки промышленных производств [Текст] / Под. ред. О.Т. Ильченко. – Харьков : Высшая школа, 1985. – 368 с.
9. Справочник химика [Текст] / Т.В. – М.–Л.: Химия, 1968. – 976 с.
10. **Хаузен, Х.** Теплопередача при противотоке, прямотоке и перекрестном токе [Текст] / Х.Хаузен – М. : Энергоиздат, 1981. – 384 с.
11. **Incropera, F.P.** Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 5ht ed. [Текст] / F.P. Incropera, D.P.Defitt. – Wiley, New York, 2001.
12. **Kaminski, D.A.** Fundamentals of Thermal and Fluids Engineering [Текст] / D.A.Kaminski, M.K.Jensen. – Wiley, New York, 2005.
13. **Moran, M.J.** Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 5ht ed. [Текст] / M.J.Moran, H.N.Shapiro. – Wiley, New York, 2003.
14. **Tomas, L.C.** Heat Transfer, 2ht ed. [Текст] / L.C. Tomas. – Capston, Tulsa, 2000.

Internet - ресурси

15. http://studopedia.com.ua/114754_akumulyatori-teploti.html
16. <http://mash-xxl.info/info/114976>
17. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2121
18. <http://ru.teplowiki.org/wiki>
19. <http://mash-xxl.info/page>
20. http://www.gigavat.com/ses_optic4.php

КОНТРОЛЬ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ**Теоретичні питання*****Модуль 1. Теплові процеси***

1. Загальна характеристика теплотехнологічних процесів.
2. Теплопровідність. Диференціальне та критеріальне рівняння процесу.
3. Теплове випромінювання і променевий теплообмін.
4. Конвективний теплообмін. Закон тепловіддачі. Диференціальне та критеріальне рівняння конвективного теплообміну.
5. Тепловіддача при зміні агрегатного стану. Складний теплообмін.
6. Теплопередача. Рівняння теплопередачі. Коефіцієнт теплопередачі.
7. Аналіз коефіцієнта теплопередачі для різних випадків.
8. Рушійна сила теплових процесів.
9. Нагрівання, охолодження до звичайних температур, конденсація.
10. Теплоносії, що використовуються у процесах нагрівання.

Модуль 2. Теплообмінні апарати

1. Призначення і класифікація теплообмінних апаратів.
2. Типові конструкції теплообмінників. Кожухотрубні теплообмінники.
3. Типові конструкції теплообмінників. Теплообмінники типу Н.
4. Типові конструкції теплообмінників. Теплообмінники типу К.
5. Типові конструкції теплообмінників. Теплообмінники типу У.
6. Типові конструкції теплообмінників. Теплообмінники типу П.
8. Типові конструкції теплообмінників. Теплообмінники типу ПК.
9. Секційні теплообмінники. Теплообмінники типу «труба в трубі».
10. Елементи кожухотрубних теплообмінників.
11. Зрошувальні теплообмінники.
12. Спіральні теплообмінники.
13. Пластинчасті теплообмінники.
14. Графітові теплообмінники.
15. Виті, занурені, повітряного охолодження теплообмінники.
17. Інтенсифікація теплообміну.

Модуль 3. Випарні апарати

1. Будова і робота однокорпусної випарної установки.
2. Матеріальний і тепловий баланси однокорпусної випарної установки.
3. Типові конструкції випарних апаратів.
4. Випарні апарати з природною циркуляцією.
5. Плівкові випарні апарати.
6. Випарні апарати з посиленою природною циркуляцією.
7. Випарні апарати з примусовою циркуляцією.

8. Випарні апарати з винесеною поверхнею нагрівання.
9. Роторний випарний апарат.
10. Випарні апарати з заглибним пальником.
11. Випарні апарати з горизонтальним і похилим положенням гріючих камер.
12. Випарні апарати з терморадіаційним підведенням теплоти.
13. Сепарація вторинної пари.
14. Технічні методи випаровування. Типи випарних установок.
15. Багатокорпусні установки.
16. Типові схеми випарних установок.
17. Випарні установки, які працюють під розрідженням.
18. Випарні установки, які працюють під тиском.
19. Випарні установки з термокомпресором і термоінжектором.
21. Випарні апарати з заглибним пальником.
20. Відведення конденсату з випарних апаратів.
21. Сепарація вторинної пари.
22. Типи випарних установок.
23. Відведення конденсату з випарних апаратів.

Модуль 4

Сушіння. Холодильні апарати

1. Сушіння. Види сушіння.
2. Параметри вологого матеріалу.
3. Основні параметри вологого газу.
4. Матеріальний та тепловий баланси процесу сушіння.
5. Принципові схеми сушильних процесів.
6. Кінетика сушіння. Рушійна сила процесу сушіння.
7. Сушильні установки.
8. Типові конструкції сушарок.
9. Конвективні сушарки.
10. Кондуктивні сушарки.
11. Спеціальні сушарки.
12. Холодильні машини і апарати. Елементи компресорних холодильних машин.
13. Абсорбційні й паро-ежекторні холодильні машини. Елементи абсорбційних холодильних машин.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ.....	4
1.1. Теплопередача	4
1.1.1. Загальна характеристика теплових процесів	4
1.1.2. Передача тепла теплопровідністю.....	5
1.1.3. Теплове випромінювання і променевий теплообмін	8
1.1.4. Конвективний теплообмін (тепловіддача).....	9
1.1.5. Складний теплообмін.....	13
1.1.6. Теплопередача.....	14
1.1.7. Рушійна сила теплових процесів.....	14
1.2. Нагрівання, охолодження, конденсація.....	15
1.2.1. Нагрівання водяною парою.....	15
1.2.2. Нагрівання топковими, або димовими, газами.....	16
1.2.3. Нагрівання електричним струмом.....	17
1.2.4. Охолодження до звичайних температур.....	17
1.2.5. Конденсація.....	18
2. ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ.....	18
2.1. Призначення і класифікація апаратів.....	18
2.2. Типові конструкції теплообмінників.....	19
2.2.1. Рекуперативні апарати.....	19
2.2.2. Зрошувальні теплообмінники.....	28
2.2.3. Спиральні теплообмінники.....	29
2.2.4. Пластинчасті теплообмінники.....	29
2.2.5. Графітові теплообмінники.....	30
2.2.6. Виті, занурені, повітряного охолодження теплообмінники.....	31
2.2.7. Теплообмінники – теплові труби.....	31
2.2.8. Регенеративні теплообмінні апарати.....	35
2.2.9. Змішувальні теплообмінні апарати.....	35
2.2.10. Акумулятори теплоти.....	39
2.3. Інтенсифікація теплообміну в рекуперативних теплообмінниках.....	36
2.4. Переваги і недоліки деяких теплообмінних апаратів.....	41
3. ВИПАРЮВАННЯ.....	42
3.1. Однокорпусна випарна установка.....	42
3.1.1. Будова і робота однокорпусної випарної установки	42
3.1.2. Матеріальний баланс однокорпусної випарної установки.....	42
3.1.3. Тепловий баланс однокорпусної випарної установки.....	43
3.1.4. Поверхня нагріву випарного апарату.....	45
3.1.5. Температурні втрати.....	45
3.2. Типові конструкції випарних апаратів.....	45
3.2.1. Випарні апарати з природною циркуляцією.....	46
3.2.2. Плівкові випарні апарати.....	47
3.2.3. Випарні апарати з посиленою природною циркуляцією.....	48

3.2.4. Випарні апарати з примусовою циркуляцією.....	49
3.2.5. Випарні апарати з винесеною поверхнею нагрівання.....	49
3.2.6. Роторний випарний апарат.....	50
3.2.7. Випарні апарати з заглибним пальником.....	50
3.2.8. Випарні апарати з горизонтальним і похилим положенням нагрівальних камер.....	51
3.2.9. Випарні апарати з терморадіаційним підведенням теплоти..	51
3.3. Сепарація вторинної пари.....	52
3.4. Технічні методи випаровування. Типи випарних установок.....	53
3.4.1. Багатокорпусні випарні установки.....	53
3.4.2. Матеріальний баланс багатокорпусної випарної установки...	57
3.4.3. Тепловий баланс багатокорпусної випарної установки.....	57
3.4.4. Розділ по корпусах загальної корисної різниці температур.....	57
3.5. Відведення конденсату з випарних апаратів.....	58
4. СУШІННЯ.....	62
4.1. Види сушіння.....	62
4.2. Параметри вологого матеріалу.....	62
4.3. Основні параметри вологого газу (повітря).....	62
4.4. Матеріальний баланс процесу сушіння.....	63
4.5. Тепловий баланс процесу сушіння.....	63
4.6. Принципові схеми сушильних процесів.....	65
4.7. Кінетика сушіння.....	67
4.8. Рушійна сила процесу сушіння.....	68
4.9. Сушильні установки.....	69
4.9.1. Типові конструкції сушарок.....	69
4.10. Конвективні сушарки.....	69
4.10.1. Тунельні сушарки.....	70
4.10.2. Стрічкові сушарки.....	70
4.10.3. Петльові сушарки.....	71
4.10.4. Сушарки з киплячим шаром.....	72
4.10.5. Барабанні сушарки.....	73
4.10.6. Розпилювальні сушарки.....	74
4.10.7. Комбіновані сушарки.....	75
4.10.8. Аерофонтанні сушарки.....	76
4.10.9. Сушіння матеріалів у режимі пневмотранспорту.....	76
4.3. Кондуктивні сушарки.....	77
4.3.1. Барабанна роторна вакуумна сушарка.....	77
4.3.2. Одновальцева сушарка.....	78
4.4. Спеціальні сушарки.....	79
4.4.1. Сушарка для терморадіаційного сушіння	79
4.4.2. Трубчасті сушарки.....	80
4.4.3. Сублімаційна сушарка.....	81
4.4.4. Сушарка для сушіння струмами високої частоти.....	81
5. ХОЛОДИЛЬНІ МАШИНИ І АПАРАТИ.....	82
5.1. Елементи компресорних холодильних машин.....	82

5.2. Абсорбційні й паро-ежекторні холодильні машини.....	84
5.2.1. <i>Принцип дії, область застосування.....</i>	84
5.2.2. <i>Елементи абсорбційних холодильних машин.....</i>	85
5.2.3. <i>Паро-ежекторні холодильні машини.....</i>	87
ЛІТЕРАТУРА.....	89
ДОДАТОК	90