

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**О.М. ПРОХОРОВ
В.В. ШУТЮК**

**ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ФАРМАЦЕВТИЧНОЇ
ТА МІКРОБІОЛОГІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Частина II
Теплота процеси та обладнання

РВЦ УДУХТ 2000

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**О.М. ПРОХОРОВ
В.В. ШУТЮК**

**ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ФАРМАЦЕВТИЧНОЇ
ТА МІКРОБІОЛОГІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни
для студентів спеціальності 6.090200
*“Обладнання фармацевтичної
та мікробіологічної промисловості”*
денної форм навчання

Частина II
Теплові процеси та обладнання

СХВАЛЕНО
на засіданні кафедри
машин і апаратів
харчових виробництв
як конспект лекцій
Протокол № 6
від 27. 01. 2000 р.

Прохоров О.М., Шутюк В.В. Процеси та обладнання фармацевтичної та мікробіологічної промисловості: Конспект з дисципліни для студ. спец. 6.090200 “Обладнання фармацевтичної та мікробіологічної промисловості” ден. форми навч. – Ч. II. Теплові процеси та обладнання.- К.: УДУХТ, 2000. – 76 с.

О.М. Прохоров,
В.В. Шутюк, кандидати техн. наук

Відповідальний за випуск В.М. Таран, д-р техн. наук, проф.

Конспект лекцій друкується в авторській редакції

З М І С Т

<i>Тема 1.</i> Основи теплопередачі в фармацевтичній та мікробіологічній апаратурі	4
<i>Тема 2.</i> Теплова подібність	10
<i>Тема 3.</i> Нагрівання, охолодження і конденсація	19
<i>Тема 4.</i> Теплообмінні апарати класифікація і вибір типу теплообмінних апаратів	22
<i>Тема 5.</i> Обладнання для стерилізації живильних середовищ	32
<i>Тема 6.</i> Обладнання для стерилізації рідких середовищ.....	37
<i>Тема 7.</i> Випарювання	41
<i>Тема 8.</i> Конструкції випарних апаратів.....	52
<i>Тема 9.</i> Обладнання для концентрування біологічно активних речовин	60
<i>Тема 10.</i> Конденсація.....	65
<i>Тема 11.</i> Машини для створення вакууму	72
Література	76

ОСНОВИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В ФАРМАЦЕВТИЧНІЙ ТА МІКРОБІОЛОГІЧНІЙ АПАРАТУРІ

Основні принципи конструювання теплообмінних апаратів

Теплообмінне обладнання займає значне місце в фармацевтичній та мікробіологічній технологіях. Поряд з теплообмінниками, які є самостійними апаратами, застосовуються теплообмінні елементи як складові різних машин та апаратів. Теплообмінники працюють з різними середовищами: корозійними, токсичними та високов'язкими продуктами. Їх експлуатують при температурах 1000 °С і тисках до 200 н/мм².

Властивості середовища ставлять свої вимоги до конструкції теплообмінних апаратів. Технологічне призначення теплообмінників:

- 1) апарати для процесу теплообміну без зміну агрегатного стану продукту;
- 2) конденсатори, випарники та реакційні апарати, що супроводжуються інтенсивним теплообміном.

Під час вибору конструкції і вирішення питання, в яку порожнину спрямувати той чи інший теплоагент, керуються такими загальними правилами:

за високого тиску теплоносіїв використовують трубчасті теплообмінники, і теплоносії з високим тиском спрямовують по трубах, тому що вони мають малий діаметр і можуть витримати великий тиск;

кородуючий теплоносій в трубчастих теплообмінниках направляється по трубах;

забруднювальні теплоагенти або такі, що дають відкладення, потрібно спрямовувати з того боку поверхні теплообміну, де можливе чищення (в кожухотрубних теплообмінниках – трубний простір, у змішувачах – зовнішній бік труби);

оскільки коефіцієнт теплопередачі підвищується зі збільшенням швидкості, для підвищення ефективності теплообмінників, по можливості, зменшують січення каналу для руху теплоносіїв.

В теплообмінниках необхідно, по можливості, забезпечувати протитечійний рух теплоносіїв. Бажано, щоб напрямок руху збігався з напрямком руху природної циркуляції. У разі зміни агрегатного стану одного з теплоносіїв взаємний напрямок руху не має великого значення.

Для виготовлення теплообмінних апаратів використовують теплообмінники сталеві, з міді, латуні, алюмінію, титану, свинцю. З неметалевих матеріалів використовують графіт, скло, пластмаси, емальовані теплообмінники. Теплообмінники як апарати – нормалізовані та стандартизовані. В мікробіологічних виробництвах теплообмінні процеси

використовуються у таких технологічних процесах: гідроліз поліцукрів, стерилізація середовищ, концентрування цільових продуктів, стерилізація апаратів, культивування мікроорганізмів в асептичних умовах.

Загальні відомості про процес теплопередачі

Теплообміном називають процес передачі тепла від одного тіла до іншого, необхідною і достатньою умовою для якого служить різниця температур між цими тілами. Мірою теплообміну вважають кількість переданого тепла. За одиницю кількості тепла в системі СІ прийнято джоуль.

Речовини, що беруть участь у процесі теплообміну, називають теплоносіями. Речовину з вищою температурою, що у процесі теплообміну віддає тепло, називають гарячим теплоносієм, а речовину з нижчою температурою, що сприймає тепло, – холодним теплоносієм. Як гарячі теплоносії в харчовій промисловості найчастіше використовують водяну пару, гарячу воду, нагріте повітря, димові гази і гарячі мінеральні масла, а як холодні теплоносії – воду, повітря, ропу (розсіл), вуглекислоту, аміак і фреони.

Є три способи перенесення тепла: теплопровідність, конвекція і випромінювання.

Теплопередачею називають процес теплообміну між двома середовищами, розділеними твердою перегородкою.

Теплопровідністю називають явище перенесення теплової енергії безпосереднім контактом між частинками тіла.

Конвекцією називають процес поширення тепла в результаті переміщення і перемішування між собою частинок рідини або газу.

Випромінюванням називають процес передачі тепла від одного тіла до іншого поширенням електромагнітних хвиль у просторі між цими тілами.

Тепловіддачею називають процес теплообміну між твердою стінкою (тілом) і рідким (газоподібним) середовищем, що її омиває.

Під час розрахунку теплообмінної апаратури визначають теплове навантаження і витрати теплоносіїв. Теплове навантаження теплообмінника визначають з рівняння теплових балансів. Якщо знехтувати втратами тепла в навколишнє середовище, які зазвичай не перевищують 5%, то рівняння теплового балансу матиме вигляд:

$$Q = Q_1 = Q_2, \quad (1)$$

де Q_1 – кількість тепла, яке віддав гарячий теплоносіє, Вт; Q_2 – кількість тепла, переданого холодному теплоносію, Вт.

При витратах G_1 і G_2 та змінах ентальпії I_{1n} , I_{1k} рівняння теплового балансу

$$Q_1 = G_1 (I_{1n} - I_{1k}) = Q_2 = G_2 (I_{2k} - I_{2n}) \quad (2)$$

При конденсації перегрітої пари

$$Q = G(I_{1n} - I_{1k}) = Gc_p(t_n - t_{нас}) + Gr + Gc_k(t_{нас} - t_k) \quad (3)$$

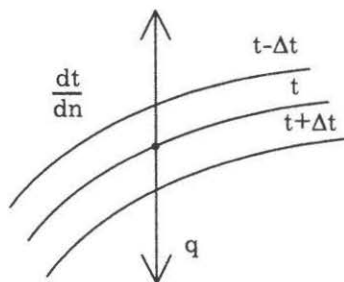
де c_p , c_k – питома теплоємність пари та конденсату.

Основне рівняння теплопередачі – зв'язок між тепловим потоком Q і основним рівнянням теплопередачі

$$Q = KF\Delta t_{cp} \tau, \quad (4)$$

де K – коефіцієнт теплопередачі; визначає середню швидкість передачі тепла по всій поверхні теплообміну; $[K = Q/F\Delta t\tau = Вт/м^2 \cdot град.]$.

Температурне поле і температурний градієнт



Температура в даній точці $t=f(x, y, z, \tau)$

$$\lim \left(\frac{\Delta t}{\Delta n} \right)_{n \rightarrow 0} = \frac{\partial t}{\partial n} = q \text{ grad } t. \quad (5)$$

Похідна температури по нормалі до ізо-термічної поверхні називається темпера-турним градієнтом.

Перенесення тепла відбувається у на-прямку падіння температури і пропорцій-не температурному градієнту зі зворотним знаком.

Рис.1. Схема температурного поля

$$q \cong - \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (6)$$

Передача тепла теплопровідністю – закон Фур'є

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF dt. \quad (7)$$

Густина теплового потоку

$$q = \frac{Q}{F\tau} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (8)$$

λ – коефіцієнт теплопровідності $[\lambda = Q \cdot \partial n / \partial t \partial F \tau = Дж \cdot м / (град \cdot м^2 \cdot с)]$; λ – характеризує здатність тіла проводити тепло шляхом теплопровідності.

Значення коефіцієнтів теплопровідності: мідь – 394; легована сталь – 25,5; повітря ($t=0^\circ C$)=0,027; вуглецева сталь – 52; капельні рідини – 0,1...0,7; гази – 0,06...0,165; теплоізоляційні матеріали – 0,06...0,175 Вт/(м²·град).

Диференціальне рівняння теплопровідності

Кількість тепла, що входить через грані:

$$Q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dy \cdot dz \cdot dt; \quad (9)$$

$$Q_y = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} dx \cdot dz \cdot dt;$$

$$Q_z = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} dx \cdot dy \cdot d\tau.$$

Кількість тепла, що виходить через грані:

$$Q_{x+dx} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dy \cdot dz \cdot d\tau - \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau; \quad (9)$$

$$Q_{y+dy} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} dx \cdot dz \cdot d\tau - \lambda \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right) dy dx \cdot dz \cdot d\tau;$$

$$Q_{z+dz} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} dx \cdot dy \cdot d\tau - \lambda \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right) dx dy \cdot dz \cdot d\tau.$$

Тоді $dQ_x = Q_x - Q_{x+dx} = +\lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dV d\tau;$

$$dQ = dQ_x + dQ_y + dQ_z = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) dV d\tau;$$

$$dQ = \lambda \nabla^2(t) dV d\tau. \quad (10)$$

За законом, збереження кількості тепла дорівнює зміні ентальпії паралелепіпеда.

$$dQ = dI = cdv \cdot \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot d\tau. \quad (11)$$

Прирівнявши формули (11) та (10), отримуємо:

$$c\rho dv \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau = \lambda \nabla^2(t) dv \cdot d\tau, \quad (12)$$

де $\frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau$ зміна температури паралелепіпеда за проміжок часу τ .

Позначивши $\lambda/(c\rho) = a$ - коефіцієнт теплопровідності

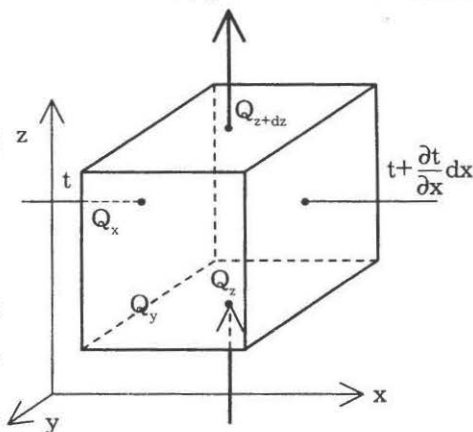


Рис.2.

$$\left[a = \frac{\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})}{\text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{град}) \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^3} = \text{м}^2 / \text{с} \right],$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2(t) \quad (13)$$

Коефіцієнт теплопровідності характеризує теплоінерційні ознаки тіла. Для сталого процесу $\partial t / \partial \tau = 0$. Тоді $\nabla^2(t) = 0$ а $\neq 0$, то

$$\nabla^2(t) = 0; \quad \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0. \quad (14)$$

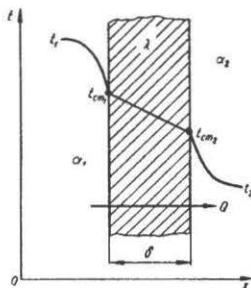


Рис 3. Схема теплопровідності однорідної плоскої стінки

Рівняння теплопровідності плоскої стінки

$t_{cr1} > t_{cr2}$. Основне рівняння теплопровідності:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0. \quad \text{То } t = C_1 x + C_2. \quad (15)$$

Температура змінюється пропорційно товщині стінки.

Початкові умови: $x=0 \quad t_{cr1} = C_2$
 $x=\delta \quad t_{cr2} = C_1 \delta + t_{cr1}$

$$C_1 = \frac{t_{cr2} - t_{cr1}}{\delta}.$$

Підставимо у формулу (15)

$$t = \frac{t_{cr2} - t_{cr1}}{\delta} \cdot x + t_{cr1}. \quad \text{Тоді } \frac{dt}{dx} = \frac{t_{cr2} - t_{cr1}}{\delta}$$

Підставимо градієнт температури в рівняння (7):

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF dt = -\lambda \frac{t_{cr1} - t_{cr2}}{\delta} dF dt = \lambda \frac{t_{cr1} - t_{cr2}}{\delta} dF dt. \quad (16)$$

Для безперервного процесу рівняння теплопровідності плоскої стінки при сталому процесі теплообміну

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{cr1} - t_{cr2}) F \quad (17)$$

Коли стінка складається із n шарів

$$Q = \frac{(t_{cr1} - t_{cr2}) \cdot F \cdot \tau}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}}. \quad (18)$$

Теплове випромінювання

Довжина хвилі теплового випромінювання лежить у межах 0,8...40 мкм. Випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла (закон Стефана-Больцмана)

$$E_0 = K_0 T^4, \quad (19)$$

де $K_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – константа випромінювання абсолютно чорного тіла.

Або можна записати $E_0 = C_0 (T/100)^4$.

Тоді $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (20)

Для сірих тіл $E_0 = \Sigma C_0 (T/100)^4$,

де $\Sigma = C/C_0$ – відносний коефіцієнт випромінювання.

Алюміній – $\Sigma = 0,055$, гума ($t = 20^\circ\text{C}$) – $\Sigma = 0,95$; вуглецева сталь ($t = 25^\circ\text{C}$) – $\Sigma = 0,82$.

Кількість тепла, яке передається за рахунок випромінювання від нагрітого до холодного тіла, визначається:

$$Q_\lambda = C_{1-2} F \tau \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi, \quad (21)$$

де C_{1-2} – коефіцієнт взаємного випромінювання; φ – середній кутовий коефіцієнт; $C_{1-2} = \Sigma_{\text{пр}} C_0$; $\Sigma_{\text{пр}}$ – приведена ступінь чорноти. Якщо тепле тіло міститься в середині холодного тіла, то

$$C_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0} \right)} \quad (22)$$

індекс 1 – нагріте тіло.

Конвективний теплообмін залежить від турбулентності руху та перемішування рідини. В ядрі потоку перенесення тепла відбувається одночасно теплопровідністю і конвекцією, а спільне їх перенесення називається конвективним теплообміном.

Закон тепловіддачі (закон охолодження Ньютона)

$$dQ = \alpha \cdot dF (t_{\text{ст}} - t_p) \cdot d\tau, \quad (23)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі; $[\alpha = Q/F\tau\Delta t = \text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град})]$

$\alpha = (\omega, \rho, \mu, C_p, \lambda, \beta, d, L, \epsilon)$.

β – коефіцієнт об'ємного розширення; ϵ – шорсткості стінки.

Диференціальне рівняння конвективного теплообміну

За рахунок конвекції надходить:

$$Q_x = \rho \omega_x dydz C_p t d\tau;$$

$$Q_{x+dx} = \rho \omega_x dydz \cdot C_p \cdot t\tau + C_p \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho \omega t}{1} dx \right) dy \cdot dz \cdot d\tau =$$

$$= \rho \omega_x dydz C_p t \cdot d\tau + C_p \left[t \frac{\partial(\rho \omega_x)}{\partial x} + \rho \omega_x \frac{dt}{dx} \right] dx dy dz d\tau;$$

$$dQ_x = Q_x - Q_{x+dx} = -C_p \left[t \frac{\partial(\rho\omega_x)}{\partial x} + \rho\omega_x \frac{dt}{dx} \right] dVd\tau.$$

$$dQ_{\text{конв.}} = dQ_x + dQ_y + dQ_z =$$

$$= -C_p \left\{ t \left[\frac{\partial(\rho\omega_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\omega_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\omega_z)}{\partial z} \right] + \rho\omega_x \frac{dt}{dx} + \rho\omega_y \frac{dt}{dy} + \rho\omega_z \frac{dt}{dz} \right\} dVd\tau.$$

Згідно з диференціальним рівнянням нерозривності потоку $\rho = \text{const.}$

$$dQ_{\text{конв.}} = -\rho C_p \left(\frac{\partial t}{\partial x} \omega_x + \frac{\partial t}{\partial y} \omega_y + \frac{\partial t}{\partial z} \omega_z \right) dVd\tau. \quad (24)$$

Кількість тепла, яке вноситься теплопровідністю

$$dQ_{\text{тепл.}} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) dVd\tau. \quad (25)$$

Сумарна кількість тепла дорівнює зміні ентальпії паралелепіпеда.

$$\begin{aligned} & -\rho C_p \left(\frac{\partial t}{\partial x} \omega_x + \frac{\partial t}{\partial y} \omega_y + \frac{\partial t}{\partial z} \omega_z \right) dV \cdot d\tau + \\ & + \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) dV \cdot d\tau = C_p \rho dV \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot d\tau. \end{aligned}$$

Після скорочень

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} \omega_x + \frac{\partial t}{\partial y} \omega_y + \frac{\partial t}{\partial z} \omega_z = a \nabla^2 t, \quad (26)$$

де
$$a = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho}.$$

Рівняння (26) – диференціальне рівняння конвективного теплообміну, або рівняння Фур'є-Кірхгофа.

Тема 2

ТЕПЛОВА ПОДІБНІСТЬ

Кількість тепла, яка проходить в приграничний шар

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial \delta} dF d\tau \quad (1)$$

Кількість тепла, яке проходить від стінки в ядро потоку визначається рівнянням тепловіддачі

$$dQ = \alpha(t_{\text{ст}} - t_p) dF d\tau \quad (2)$$

Ці кількості теплот рівні

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial \delta} dF dt = \alpha(t_{cr} - t_p) dF dt \quad \Rightarrow \quad -\lambda \frac{\partial t}{\partial \delta} = \alpha \Delta t$$

Поділимо праву частину на ліву

$$\frac{\alpha \delta}{\lambda} = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{\alpha l}{\lambda} = Nu \quad (3)$$

Nu – критерій Нусельта характеризує подібність процесу теплопереносу на границі між стінкою та потоком рідини.

Розглянемо умову подібності у ядрі потоку, використовуючи подібне перетворення рівняння (26).

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x} \omega_x + \frac{\partial t}{\partial y} \omega_y + \frac{\partial t}{\partial z} \omega_z \right) \sim \frac{t}{l} \omega \quad (4)$$

l – визначаючий лінійний розмір.

$$a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \sim \frac{at}{l^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} \sim \frac{t}{\tau} \quad (6)$$

Розділимо (5 на 6)

$$\frac{at\tau}{l^2} = \frac{at}{l^2} = F_0 \text{ - критерій Фур'є.}$$

Рівність критеріїв Фур'є в співставлених точках теплових потоків – необхідна умова безперервного процесу теплообміну.

Розділив 4 на 5 отримаємо:

$$\frac{t}{l} \omega \frac{l^2}{at} = \frac{\omega l}{a} = Pe \quad (7)$$

Критерій Пекле являється мірою співвідношення між теплом, яке переноситься шляхом конвекції і шляхом теплопровідності при конвективному теплообміні.

Необхідними умовами подібності процесів переносу тепла являється:

1) гідродинамічна подібність $\phi = H_0, Re, Fr$;

$$H_0 = \frac{\omega \tau}{l} \text{ - критерій гомохромності;}$$

$$Re = \frac{\omega l}{\nu} = \frac{\omega \rho}{\mu}; \quad Fr = \frac{\omega^2}{gl}$$

2) геометрична подібність $\frac{L_i}{L_0}$.

Загальне критеріальне рівняння конвективного теплообміну виражається

$$f(\text{Nu}, F_0, \text{Pe}, \text{Re}, \text{Fr}, \frac{L_1}{L_0}, \frac{L_2}{L_0}, \dots, \frac{L_n}{L_0}) = 0 \quad (8)$$

Критерій Пекле

$$\text{Pe} = \frac{\omega l}{a} \frac{v}{v} = \frac{\omega l}{v} \frac{v}{a} = \frac{\omega l \rho}{\mu} \frac{\mu c_p}{\rho \lambda} = \text{Re Pr} \Rightarrow \text{Pe} = \text{Re Pr} \quad (9)$$

$\text{Pr} = \frac{v}{a}$ – критерій Прандтля – характеризує фізичні властивості теплоносіїв в процесах конвективного теплообміну і являє собою міру подібності полів температур та швидкостей.

Загальне критеріальне рівняння конвективного теплообміну

$$\text{Nu} = f'(F_0, \text{Pr}, \text{Re}, \text{Fr}, \text{Ho}, \frac{L_1}{L_0}) \quad (10)$$

Для сталого процесу теплообміну.

$$\text{Nu} = f''(\text{Pr}, \text{Re}, \frac{L_1}{L_0}) \quad (11)$$

При тепловіддачі в умовах природньої конвенції.

$$\text{N} = f'''(\text{Pr}, \text{Gr}, \frac{1}{d}) \quad (12)$$

Критерій Грасгофа

$$\text{Gr} = \frac{q l^3 \beta \Delta t}{v^2} = \text{Ar} \beta \Delta t; \quad \text{Ar} = \frac{q l^3}{v^2} \frac{\Delta \rho}{\rho_0}$$

$$\Delta \rho = \rho_0 - \rho = \rho_0 - \rho_0(1 - \beta) \Delta t = \rho_0 \beta \Delta t$$

β – коефіцієнт об'ємного розширення. Для газів при сталому процесі теплообміну.

$$\text{Nu} = f''(\text{Gr}, \frac{1}{d}) \quad (13)$$

Тепловіддача без зміни агрегатного стану

1) Примусовий рух в середині труб.

Сталий турбулентний рух. $\text{Re} > 104$. Отримали

$$\text{Nu}_p = 0,023 \text{Re}_p^{0,8} \text{Pr}^{0,4} \quad (14)$$

В розгорнутому вигляді

$$\frac{\alpha d_{\text{екв}}}{\lambda} = 0,023 \left(\frac{\omega_{\text{сп}} d_{\text{екв}}}{v_p} \right)^{0,8} \left(\frac{c_p \mu_p}{\lambda_p} \right)^{0,4} \quad (15)$$

де $d_{\text{екв}} = \frac{4S}{\Pi}$; $Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{c\mu}{\lambda}$. Рівняння справедливе для $l/d > 50$

Для змійовикових труб $\alpha_R = \alpha \left(1 + 3,54 \frac{d}{D}\right)$; d -внутрішній діаметр тру-

би; D - діаметр витка змійовика.

Перехідний режим $2300 < Re_p < 10^4$.

Для наближених розрахунків

$$Nu_p = 0,008 Re_p^{0,9} Pr^{0,43} \quad (16)$$

Ламінарний режим

$$Nu_p = 0,17 Re_p^{0,33} Pr^{0,43} Gr_p^{0,1} \left(\frac{Pr_p}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25} \quad (17)$$

Де $Gr = \frac{gl^3\beta\Delta t}{\nu^2}$ - враховує вплив природної конвекції.

2) Примусовий рух зовні труби

Рух в примусовому каналі (тип труба в трубі).

$$Nu_p = 0,023 Re_p^{0,8} Pr^{0,4} \left(\frac{D_n}{d_a}\right)^{0,4} \quad (18)$$

D_n , d_a - внутрішній і зовнішній діаметр зовнішньої і внутрішньої труби. При поперечному обтіканні пучка труб $Re = 200 + 2 \cdot 10^5$

при шахматному розміщенні $Nu_p = 0,4 Re_p^{0,6} Pr_p^{0,36} \left(\frac{Pr_p}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25}$

при коридорному розміщенні $Nu_p = 0,27 Re^{0,63} Pr^{0,36} \left(\frac{Pr_p}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25} \quad (19)$

3) Тепловіддача при механічному перемішуванні

$$Nu_p = C Re_m^m Pr^n \left(\frac{\mu_p}{\mu_{\text{ст}}}\right)^{0,14}; Re_m = \frac{P_p n d_m}{\mu_p} \quad (20)$$

Апарат з рубашкою і турбінною мішалкою $C=0,68$, $m=0,67$, $n=0,33$. Апарат зі змійовиком $C=1,01$, $m=0,62$, $n=0,33$, для турбінних $C=1,4$. Для апаратів з радіальними потоками рідини

$$Nu_p = 0,17 Re_m^{0,67} Pr^{0,87} \left(\frac{d_m}{D}\right)^{0,1} \left(\frac{d_{\text{тр}}}{D}\right)^{0,5} \quad (21)$$

В Nu_p входить $d_{\text{тр}}$.

Теплопередача при зміні агрегатного стану

1) Конденсація парів

Узагальнене рівняння для визначення коефіцієнта тепловіддачі від конденсуючих парів

$$Nu = C(Ga Pr K)^{0,25} \quad (22)$$

де $K = \frac{r}{c_p \Delta t}$ - критерій конденсації $\Delta t = t_n - t_{ст}$, Ga , Pr - відносяться до плівки

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda_p}; \quad Ga = \frac{g l^3 \rho_p^2}{\mu_p^2}; \quad Pr = \frac{c_p \mu_p}{\lambda_p}; \quad K = \frac{r}{c_p \Delta t}.$$
$$\alpha = C_1 \sqrt{\frac{\lambda_p^3 \rho_p^2 g r_p}{\mu_p l \Delta t}} \quad (23)$$

2) Конденсація пара на вертикальній поверхні.

При конденсації на вертикальній стінці (трубі) $C=2,04$. H - висота вертикальної стінки. То

$$\alpha = 2,04A \left(\frac{r}{H \Delta t} \right)^{0,25}, \quad \text{де } A = \sqrt[4]{\frac{\rho_p^2 \lambda_p^3}{\mu_p}} \quad (24)$$

Це рівняння можна представити

$$\alpha = 2,58 \lambda_p \left(\frac{\rho_p}{\mu_p} \right)^{\frac{1}{3}} Re_{пл}^{-\frac{1}{3}}, \quad \text{де } Re_{пл} = \frac{q l}{r \mu_p} \quad (25)$$

q - густина теплового потоку. Рівняння отримано для $Re_{пл} < 100$.

3) Конденсація пари на горизонтальній поверхні l замінюється на d_3 - зовнішній діаметр труби.

$$\alpha = 1,28A \left(\frac{r}{d_3 \Delta t} \right)^{0,25}; \quad Re_{НА} = \frac{\pi d_3 z q}{2 \mu_p r} < 50;$$

A - знаходимо по таблицям; z -число розташованих одна над другою горизонтальні труб. Коефіцієнт тепловіддачі при плівковій конденсації водяного пару складає $(7...12) \cdot 10^3$ Вт/(м² град).

Кипіння рідини

Рекомендуються теплові навантаження $q=9,4 \cdot 10^4$ Вт/м².

Для пузирчастого режиму при кипінні води.

$$\alpha = 0,556 q^{0,7} p^{0,15} \text{ або } \alpha = 0,145 \Delta t^2 p^{0,5} \quad (27)$$

де p - тиск, Н/м².

Тепловіддача при безпосередньому стиканні фаз

Безпосереднє стикання рідини і газу (скрубери, градирні). Для випадку охолодження димових газів в насадковому скрубери запропоновано рівняння

$$\frac{Kd_e}{\lambda} = 0,004 Re_r^{0,8} Re_p^{0,7} \quad (28)$$

$$Re_r = \frac{\omega_0 d_e \rho_r}{V_{cb} \mu_p}; \quad Re_p = \frac{4WV_{cb}}{3600 v_p \alpha} \quad (29)$$

V_{cb} - вільний об'єм насадки; α - питома поверхня насадки; W - густина зрошення $m^3/(m^2 \cdot год)$.

Складна тепловіддача

Втрата тепла в навколишнє середовище визначається

$$Q = Q_k + Q_b = (\alpha_k + \alpha_b) F (t_{ct} - t_p) = \alpha_{зар} F (t_{ct} - t_p) \quad (30)$$

$\alpha_{зар} = 9,3 + 0,58 t_{ct,зоб} - t_{ct,зоб}$ - температура зовнішньої стінки.

Теплопередача при постійних температурах теплоносія

а) Плоска стінка. Процес теплообміну сталий. Тепло яке передається від нагрітого середовища до стінки

$$Q' = \alpha_1 F \tau (t_1 - t_{ct1})$$

$$\text{Теплопровідність } Q' = \frac{\lambda_1}{\delta_1} F \tau (t_{ct2} - t'_{ct});$$

$$Q' = \frac{\lambda_2}{\delta_2} F \tau (t'_{ct} - t_{ct2});$$

$$\text{Тепловіддача } Q' = \alpha_2 F \tau (t_{ct2} - t_2)$$

$$Q' \frac{1}{\alpha_1} + Q' \frac{\delta_1}{\lambda_1} + Q' \frac{\delta_2}{\lambda_2} + Q' \frac{1}{\alpha_2} = F \tau (t_1 - t_2)$$

$$Q' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} F \tau (t_1 - t_2), \text{ при } \tau = 1. \quad (31)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} - \text{коефіцієнт теплопередачі}$$

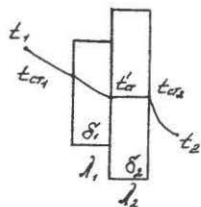


Рис.4. Теплопередача через плоску стінку

$$\left[K = \frac{Q}{F\tau(\Delta t)} = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right]$$

Висновок: величина $1/K$ називається загальним термічним опором. Величина K завжди менша одного із найменших коефіцієнтів тепловіддачі.

б) *Циліндрична стінка*

$$Q \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n r_n} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\alpha_3 r_3}} = 2\pi L \tau (t_1 - t_2) \quad (32)$$

$$K_R = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n r_n} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\alpha_3 r_3}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (33)$$

Для тонкостінних труб, K можна обраховувати по формулі (31)

Теплопередача при змінних температурах теплоносіїв
Рівняння теплопередачі при промотоці. Для елементарної поверхні dF складаємо рівняння теплового балансу

$$dQ = G_1 C_1 (-dt_1) = G_2 C_2 dt_2$$

$Gc = W$ - водяний еквівалент.

$$-dt_1 = dQ / W_1; \quad dt_2 = dQ / W_2.$$

Складаємо

$$d(t_1 - t_2) = -dQ \left(\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} \right) = -dQm;$$

$$\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} = m; \quad d(\Delta t) = -dQm; \quad dQ = -KdF\Delta t$$

Тоді $d(\Delta t) = KdFm\Delta t$

$$\int_{\Delta t_n}^{\Delta t_k} \frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = -mKF \int_0^F dF \Rightarrow \ln \frac{\Delta t_k}{\Delta t_n} = -mKF \quad (33)$$

Баланс $m = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} = \frac{t_{1n} - t_{1k} + t_{2n} - t_{2k}}{Q} = \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{Q}$

$$Q = W_1(t_{1n} - t_{1k}) = W_2(t_{2n} - t_{2k})$$

Тоді

$$\ln \frac{\Delta t_k}{\Delta t_n} = -K \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{Q} F \Rightarrow Q = KF \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{\ln \frac{\Delta t_n}{\Delta t_k}} \quad (32)$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{\ln \frac{\Delta t_n}{\Delta t_k}} - \text{середній температурний напір.}$$

Із рівняння (33) $\Rightarrow \Delta t_k = \Delta t_n e^{-mKF}$.

Коли $\frac{\Delta t_n}{\Delta t_k} \geq 2$ то $\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_n + \Delta t_k}{2}$

Для протитокоту $Q = KF \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}}$ (34)

При перехресному та змішаному тоці середню температуру знаходимо

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t)f, f - \text{множник} < 1 \quad (35)$$

Впровадження протитокоту при теплообміні більше економічно чим прямотоку, тому що швидкість теплообміну при протитоці більший чим при прямотоці.

Визначення температури стінок

Кількість тепла, яке віддає і отримує теплоносії.

$$Q = \alpha_1 F (t_1 - t_{cr1}) \Rightarrow t_{cr1} = t_1 - \frac{Q}{\alpha_1 F} = t_1 - \frac{K \Delta t_{cp}}{\alpha_1} \quad (36)$$

$$Q = \alpha_2 F (t_{cr2} - t_2) \Rightarrow t_{cr2} = t_2 + \frac{Q}{\alpha_2 F} = t_2 + \frac{K \Delta t_{cp}}{\alpha_2} \quad (37)$$

Із рівняння теплопередачі $Q = KF \Delta t_{cp}$.

Теплопередача при нестационарному режимі

Нестационарні процеси теплообміну характерні для періодично діючих апаратів різного призначення (нагрівання, охолодження нерухомих мас рідин, кристалізація із розчинів, хімічні реактори). Особливість нестационарних процесів являється безперервна зміна температур обох теплоносіїв або одного із них в часу. За час температура змінюється від t_1 до t_2 в апараті. Прийmemo що $K = \text{const}$. Припустимо, що рідина в апараті нагрівається при повному перемішування, а гріючий теплоносій в кінці деякої ділянки f поверхні теплообміну понизив свою температуру від Θ_1 до Θ .

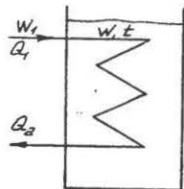


Рис. 5. Схема теплообмінного апарату з нестационарним режимом нагрівання

Рівняння теплопередачі для даної ділянки

$$dQ = -W_1 d\Theta = K(\Theta - t)df \Rightarrow \int_{\Theta_1}^{\Theta} \frac{d\Theta}{\Theta - t} = -\int_0^f \frac{K}{W_1} df \quad (38)$$

$$\ln \frac{\Theta - t}{\Theta_1 - t} = -\frac{K}{W_1} f; \quad \Theta - t = (\Theta_1 - t)e^{-\frac{Kf}{W_1}}$$

Середнє значення $\Theta - t$ для любого моменту часу по всій поверхні теплообміну виражається:

$$(\Theta - t)_{CP} = \frac{1}{F} \int_0^F (\Theta - t)df = \frac{1}{F} \int_0^F (\Theta_1 - t)e^{-\frac{Kf}{W_1}} df = (\Theta_1 - t) \frac{W_1}{Kf} \left(1 - e^{-\frac{KF}{W_1}}\right) \quad (39)$$

Кількість тепла, яка передається через всю поверхню F за час τ

$$dQ = Wdf = KF(\Theta - t_{cp})d\tau = W_1(\Theta_1 - t)(1 - e^{-\frac{KF}{W_1}})d\tau \quad (40)$$

Звідки

$$\int_0^{\tau} d\tau = -\frac{W}{W_1(1 - e^{-\frac{KF}{W_1}})} \int_{\Theta_1 - t}^{\Theta_2 - t_2} \frac{dt}{\Theta_1 - t}, \quad \tau = \frac{W}{W_1(1 - e^{-\frac{KF}{W_1}})} \ln \frac{\Theta_2 - t_2}{\Theta_1 - t_1} \quad (41)$$

Визначення температури до якої нагрівається середовище за час τ

$$t_2 = \Theta_1 - (\Theta_1 - t_1)e^{-\frac{W_1\tau}{W} \left(e^{\frac{KF}{W_1}} - 1\right)} \quad (42)$$

Із рівняння (38) отримуємо температуру гріючого теплоносія в любой момент часу.

$$\begin{aligned} \Theta_2 &= \Theta_1 e^{-\frac{KF}{W_1}} + t_2 \left(1 - e^{-\frac{KF}{W_1}}\right) = \Theta_1 e^{-\frac{KF}{W_1}} + \left\{ \Theta_1 - (\Theta_1 - t_1) e^{-\frac{W_1\tau}{W} \left(e^{\frac{KF}{W_1}} - 1\right)} \right\} \left(1 - e^{-\frac{KF}{W_1}}\right) = \\ &= \left\{ \Theta_1 - (\Theta_1 - t_1) e^{-\frac{W_1\tau}{W} \left(e^{\frac{KF}{W_1}} - 1\right)} \right\} \left(1 - e^{-\frac{KF}{W_1}}\right) \end{aligned} \quad (43)$$

Середню кінцеву температуру гріючого теплоносія на протязі розглядаємого процесу знаходимо з рівняння теплопередачі та теплового балансу

$$W_1\tau(\Theta_1 - \Theta_{cp}) = W(t_2 - t_1).$$

$$Q = K\Delta_{CP}F\tau = W(t_2 - t_1)$$

Підставимо τ із рівняння (41)

$$\Delta_{cp} = \frac{W(t_2 - t_1)}{KF\tau} = \frac{W(t_2 - t_1)W_1 \left(1 - e^{-\frac{KF}{W_1}}\right)}{KFW \ln \frac{\Theta_1 - t_2}{\Theta_1 - t_1}} = \frac{W}{KF} \left(1 - e^{-\frac{KF}{W_1}}\right) \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{\Theta_1 - t_2}{\Theta_1 - t_1}} \quad (44)$$

Коли гріючий теплоносіє зберігає постійну температуру (конденсуючий насичений пар, або кипляча індивідуальна рідина) то $W_1 =$

$$\lim \frac{W_1}{KF} \left(1 - e^{-\frac{KF}{W_1}}\right) \rightarrow 1. \text{ Тоді} \quad \Delta_{cp} = \frac{t_2 - t_1}{\ln \frac{\Theta_1 - t_2}{\Theta_2 - t_1}} \quad (45)$$

Теплова ізоляція - призначена для зниження втрат тепла в навколишнє середовище. Коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційних матеріалів складає $\sim 0,2$ Вт/м²К. Асортимент теплоізоляційних матеріалів: дерево пробка, азбест, шлакова вата, зоноліт, азбозурит та інші. Захист ізолюючих матеріалів від гігроскопічної вологи відбувається за рахунок покраски, обшивки металевою фольгою, пластиками.

У випадку одношарової ізоляції з коефіцієнтом теплопровідності λ_{i3} товщиною δ_{i3} для забезпечення зовнішньої температури ізолюючого шару виразиться.

$$\delta_{i3} = \lambda_{i3} [(t_r - t_x) / \alpha_2 (\Theta_2 - t_x) - \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right)] \quad (46)$$

Критичним радіусом, при ізоляції трубопроводів являється необхідно щоб $r_{id} > r_2$

$$r_2 = \frac{\lambda_{i3}}{\alpha_2} \quad (47)$$

Тема 3

НАГРІВАННЯ, ОХОЛОДЖЕННЯ І КОНДЕНСАЦІЯ

Теплообмінниками називаються апарати, які призначені для передачі тепла від одних речовин до інших. Речовини, які приймають участь в процесі передачі тепла, називаються теплоносіями. Теплоносії, які мають високу температуру і віддають тепло називаються нагрівачими агентами, а теплоносії, які сприймають тепло називаються охолоджуемими агентами. Вибір теплоносія залежить від потрібної температури нагрівання або охолодження та необхідності її регулювання.

Нагрівачі агенти і способи їх нагрівання

Одним із широковикористовуваним гріючим агентом являється насичений водяний пар. Теплота конденсації якого $2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг при тиску $9,8 \cdot 10^4$ Па. Недолік водяного пара - значний ріст тиску з підвищенням температури. Тому він нагрівається до $180 \dots 190$ °С при тиску $1 \dots 1,2$ мПа. Найбільше поширення знайшло нагрівання глухим паром.

Витрати D глухого пара при безперервному нагріванні визначається із рівняння теплового балансу

$$D = \frac{Gc(t_2 - t_1) + Q_{\text{вТ}}}{I_{\text{п}} - I_{\text{к}}} \quad (1)$$

G - витрати нагріваємого середовища.

Для вилучення конденсату без вилучення пари, використовується конденсатовідвідник.

Конденсат наповнює стакан 3. При цьому нижній клапан 6 перекриває патрубок 4 відведення конденсату. При наповненні поплавка рідиною він опускається і відкриває нижній клапан 6 і конденсат витискається по трубі 4. Верхній клапан 6 потрібний для перекриття поступлення конденсату в конденсатовідвідник.

У тих випадках, коли допустиме змішування нагріваємого середовища з паровим конденсатом, використовується нагрівання гострою парою, яка вводиться безпосередньо в нагріваєму рідину.

При перемішуванні рідини і її підігріванням використовуються барботери.

Витрати гострого пару визначаються.

$$DI_{\text{п}} + Gct_1 = DC_{\text{а}}t_2 + Gct_2 + Q_{\text{вТ}};$$

$$D = \frac{Gc(t_2 - t_1) + Q_{\text{вТ}}}{I_{\text{п}} - \eta_{\text{с}} t_2} \quad (2)$$

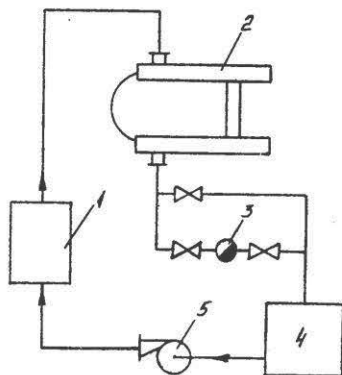


Рис.6. Схема нагрівання глухим паром

1- паровий котел; 2- теплообмінник- підігрівач; 3- конденсатовідвідник; 4- проміжна сміть; 5- відцентровий насос

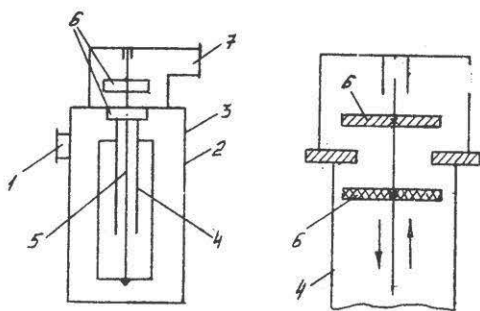


Рис. 7. Конденсатовідвідник

1- патрубок поступлення конденсату; 2- корпус конденсатовідвідника; 3- відкритий поплавок; 4- патрубок; 5- стержень поплавка; 6- клапан; 7- патрубок відведення конденсату

2) Нагрівання гарячою водою має недолік, який заключається в тому, що коефіцієнт тепловіддачі гарячої води менший чим коефіцієнт тепло-

віддачі від конденсуючої пари. Гарячу воду отримують у водогрійних котлах.

3) Нагрівання паливними газами - дозволяють нагрівати до температури 1000...1100 °С при незначному надлишковому тиску. Коефіцієнт тепловіддачі газу до стінки 35...60 Вт/(м²град).

4) Нагрівання високотемпературними теплоносіями.

а) Нагрівання перегрітою водою Р=22,1 мПа, t=374 °С. Використовуються установки з примусовою та природною циркуляцією.

б) Нагрівання мінеральними маслами (циліндрове, компресорне, циліндрове важке) - обмежене температурами 250...300 °С. Масла володіють низьким коефіцієнтом тепловіддачі який знижується при термічному розкладанні та окисленні масел. До високотемпературних органічних теплоносіїв (ВОТ) відносяться: гліцерин, етиленгліколь, нафталін, дифеніл та інші). Температура кипіння дифенільної суміші 258 °С. Недолік дифенільної суміші - мафла теплота пароутворення.

в) Нагрівання розплавленими солями -нітрит - нітритна суміш. Використовується на нагрівання до t=500...540 °С і тільки з примусовою циркуляцією.

г) Нагрівання ртуттю і рідкими металами відбувається при t=400...800 °С. Пари ртуті - ядовиті і тому потрібна примусова вентиляція.

5) Нагрівання електричним струмом -омічне, індукційне високочастотне, електричною дугою.

Нагрів електричним струмом проводиться при t=1000...1100 °С.

Індукційне нагрівання засноване на використуванні теплового ефекту, викликаємого вихровими токами Фуко. Апарат з індукційним електронагрівником подібний трансформатору, первинною обмоткою якого служить індукційна котушка, а магнітодротом і вторинною котушкою стінки апарата. Індукційний нагрів не перевищує 400 °С.

Високочастотне нагрівання використовується для нагрівання матеріалів, які не проводять електричний струм. $\nu = 10...100$ МГц.

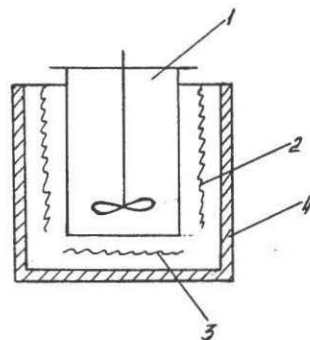


Рис. 9. Схема нагрівання електричним струмом

1- нагрівальний апарат; 2- бокові секції нагрівальних елементів; 3- донна секція нагрівального елемента; 4- футеровка пічки

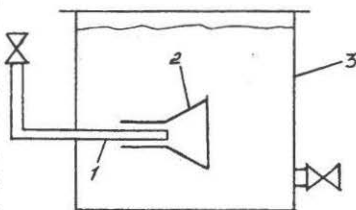


Рис. 8. Нагрівання гострою парою
1- сопло; 2- змішувальний дифузор; 3- ємкість

Охолодження. Способи охолодження та конденсації

Для охолодження до звичайних температур $t=10...30\text{ }^{\circ}\text{C}$ використовують воду і повітря. Оборотною водою охолоджують шляхом часткового випарювання у відкритих басейнах, або градирнях шляхом змішування з потоком повітря і знову направляють як охолоджуємий агент. Артезіанська вода $t=8...15\text{ }^{\circ}\text{C}$, річна, озерна, ставкова вода $t=4...25\text{ }^{\circ}\text{C}$, оборотна вода- $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура води, яка виходить із теплообмінників $t=40...50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Витрати води на охолодження визначається із теплового балансу

$$Gc(t_n - t_k) = Wc_w(t_2 - t_1)$$
$$W = \frac{Gc(t_n - t_k)}{c_w(t_2 - t_1)} \quad (3)$$

Для покращання теплообміну відведення тепла повітрям відбувається примусовою циркуляцією вентилятором і збільшують поверхню теплообміну зі сторони повітря шляхом оребрення.

Охолодження до низьких температур відбувається шляхом випарювання низькокипячих рідин (аміак, етан, CO_2), або використовують холодильні розсоли.

Конденсація пара відбувається шляхом охолодження його або шляхом охолодження і стискання одночасно. Конденсація парів відбувається в конденсаторах, які охолоджуються водою або повітрям. При конденсації парів утворюється вакуум. По способу охолодження конденсатори розрізняються: конденсатори змішування і поверхневі конденсатори.

В конденсаторах змішування пар безпосередньо стикається з охолоджуємою водою. Вони використовуються у тих випадках коли конденсуємі пари не представляють цінності. В мокрих конденсаторах конденсат і гази відкачуються одним і тим же вакуум-насосом. В сухих (барометричних) вода і конденсат вилучаються сумісно самозбіганням, а гази відкачуються окремо вакуум-насосом.

В поверхневих конденсаторах тепло відбирається від конденсуючого пара через стінку, з іншої сторони подається охолоджуємий агент-вода, повітря. Поверхневі конденсатори значно металоемні чим конденсатори змішування, більш дорожчі і вимагають більших витрат охолоджуемого агенту.

Тема 4

ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ

Класифікація і вибір типу теплообмінних апаратів

В залежності від способу передачі тепла різняться дві групи теплообмінників:

1) поверхневі теплообмінники у яких переніс тепла між обмінюючими теплом середовища відбувається через розподіляему їх поверхню теплообміну глуху стінку.

2) теплообмінники змішування у яких тепло передається від одного середовища до другого при їх безпосередньому стиканні.

В залежності від призначення теплообмінні апарати різняться: підігрівачі, реактори, дефлегматори, холодильники.

В залежності від агрегатного стану теплоносіїв та їх взаємодії ріднять апарати для теплообміну: між двома газами; між паром і газом; між газом і рідиною (холодильники для газів); між паром і рідиною (парові підігрівачі, конденсатори тощо); між двома рідинами (рідинні холодильники, теплообмінниками і ін).

В фармацевтичній та мікробіологічній промисловості використовуються теплообмінні апарати: кожухотрубні, типа "труба в трубі", зміювикові, пластинчаті, спіральні.

При вибирані теплообмінників в першу чергу керуються можливістю підвищення коефіцієнта теплопередачі, який зростає з підвищенням швидкості теплоносіїв. Але при цьому зростає гідравлічний опір. Коефіцієнт теплопередачі зменшується при забрудненні поверхні теплообміну, тому поверхня повинна бути доступна для вилучення утворених забруднень.

При обрані шляху руху теплоносіїв необхідно керуватися умовами забруднення і можливості виділення осадів теплоносія, доцільно пропускати по найбільш доступній для очищення поверхні теплообміну; щоб коефіцієнт теплопередачі був найбільший, теплоносій з меншим коефіцієнтом тепловіддачі необхідно пропускати через труби; коли охолодженню або нагріванню підлягає кородуючий продукт, то при проектуванні теплообмінника для виготовлення труб, решіток і камер необхідно передбачувати антикорозійний матеріал; а кожух із звичайного металу; в нагрівниках для зменшення втрат тепла теплоносіїв з високою температурою необхідно пропускати по трубам; в холодильниках – навпаки гарячий теплоносій пропускають в гарячий міжтрубний простір, щоб корпус не підлягав тиску – теплоносій з високим тиском необхідно пропускати по трубам.

Швидкість пропускання теплоносіїв в теплообмінниках приймають: для газів до 25 м/с, для пара при конденсації до 10 м/с, для рідини – до 3 м/с.

Кожухотрубні теплообмінники широко використовуються для нагрівання і охолодження рідких та газоподібних середовищ. Теплообмінник складається із пучка трубок, кінці яких закріплені в спеціальних трубних решітках, розташованих всередині загального кожуха. Один із теплоносіїв рухається по трубам, а інший – в просторі між кожухом

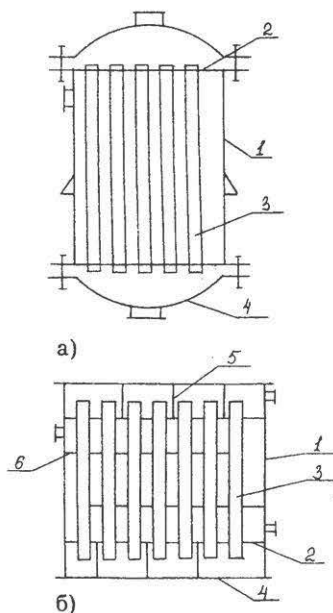


Рис. 10. Кожухотрубний теплообмінник

- а) одноходовий;
б) багатоходовий)

1- корпус; 2- трубна решітка; 3- труби; 4- кришка; 5- перегородки у кришці; 6- перегородки в міжтрубному просторі

і трубами – міжтрубний простір. Кожухотрубні теплообмінники бувають одноходові і багатоходові.

Середовища звичайно нагріваються протитоком. При цьому нагріване середовище направляють знизу вверх, а середовище, яке віддає тепло, - в протилежному напрямку.

Кожухотрубні одноходові теплообмінники доцільно використовувати при пропусканню по трубах великого об'єму теплоносія (газові теплообмінники, теплообмінники з теплообміном між газом і рідиною), а також як конденсатори парів органічних рідин.

Для збільшення швидкості теплообміну використовуються багатоходові кожухотрубні теплообмінники. Розбивку труб на ходи проводять таким чином, щоб у всіх секціях знаходилося однакова кількість труб. Для збільшення швидкості і шляху руху середовища в міжтрубному просторі служать сегментні перегородки 6. Число ходів в теплообміннику не перевищує 5-6, що пов'язано з гідравлічним опором теплообмінника.

Одноходові і багатоходові теплообмінники можуть бути вертикальними і горизонтальними.

Кожухотрубні багатоходові теплообмінники використовуються як рідинні теплообмінники або при теплообміні між конденсуючим паром і рідиною (конденсатори пара підігрівачі рідини), коли рідина проходить по трубах, а пар – по міжтрубному просторі.

Коли середня різниця температур труб і кожуха в теплообмінниках незначна використовують жорсткі конструкції, такі у яких трубні решітки приварені до корпусу, коли ця різниця стає значною $\sim 50^\circ\text{C}$, то труби і корпус подовжуються неоднаково. У даному випадку використовується кожухотрубні теплообмінники не жорсткої конструкції, які допускають деяке переміщення труб відносно кожуха апарата.

Теплообмінники з ліновими компресорами прості по конструкції, але вони використовуються при невеликих надлишкових тисках в міжтрубному просторі, який не перевищує 0,6 мПа.

При значних переміщеннях труб і кожуха використовуються теплообмінники з плаваючою головкою, у яких нижня трубна решітка 2 являється рухомою.

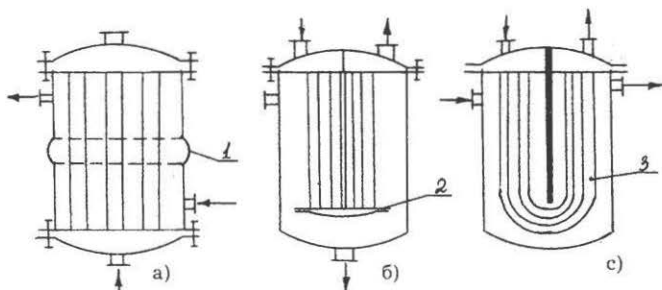


Рис. 11. Конструкції кожухотрубних теплообмінників
а) з лінзовим компресором; б) з плаваючою головкою; в) з U-подібним пучком труб.
1- компенсатор; 2) рухома трубна решітка; 3) U-подібні труби.

В кожухотрубних теплообмінниках з U-подібними трубами, самі труби 3 виконують функцію компенсуючих пристроїв. Зовнішня поверхня труб може бути легко очищена при вийманні всієї трубчатки із корпуса апарата. Недолік U-подібних теплообмінників трудність очищення внутрішньої поверхні труб і складність розміщення великого числа труб у трубній решітці.

Труби всередині кожухотрубного теплообмінника розташовуються по концентричному колу, по периметру прямокутників і шестикутників. Кожухотрубні теплообмінники використовуються для теплообміну при температурах $-60...600\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиску до 6,4 МПа. Коефіцієнт теплопередачі складає для багатьох середовищ $400...800\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$.

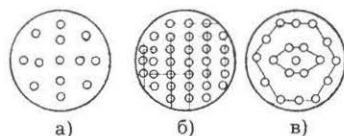


Рис. 12. Схеми розміщення труб на трубній решітці

а) по концентричних колах; б) по периметру прямокутників; в) по периметру шестикутників

Теплообмінні апарати типу "труба в трубі" – використовуються для охолодження стерильних живильних середовищ в безперервному потоці.

Внутрішня труба 1 має діаметр 57-108 мм з'єднується калачом 3. Швидкості теплоносіїв складають 1-1,5 м/с. Ці теплообмінники більш громоздкі ніж кожухотрубні, вимагають більших витрат металу на одиницю поверхні теплообміну. Коефіцієнт теплопередачі складає $\sim 1000\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$.

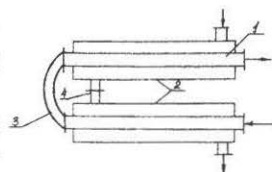


Рис. 13. Теплообмінник типу "труба в трубі"

1- внутрішня труба; 2- зовнішня труба; 3- калач; 4- патрубков

Змійовикові теплообмінники використовуються для підігрівання, або охолодження продуктів.

Діаметр труби 1 змійовика складає 15-75мм. Змійовикові теплообмінники працюють при низьких теплових навантаженнях. Вони викори-

стовуються при поверхні нагріву до 10...15м².

Спіральні теплообмінники

В спіральних теплообмінниках поверхня теплообміну створена спіральними каналами висотою 8-12мм, розміщеними між металевими стрічками 1,2 товщиною 1-4 мм зігнутих в спіраль. З торців канали закриті плоскими кришками 4.

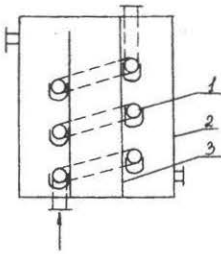


Рис. 14. Змійовиковий теплообмінник

1- спіральний змійовик; 2- корпус апарата; 3- кон-струкція для кріплення змійовика

Горизонтальні спіральні теплообмінники використовуються для теплообміну між двома рідинами.

Для теплообміну між конденсуючим паром і рідиною використовуються вертикальні спіральні теплообмінники як конденсатори і як парові підігрівачі для рідин. Поверхня теплообміну спіральних теплообмінників складає 10-100м², працюють при тиску 1,0 МПа і температурах від 20-200°С, коефіцієнт теплопередачі змінюється в межах 800-1000 Вт/м²К. Коефіцієнт гідравлічного опору спіральних теплообмінників нижче чим кожухотрубних теплообмінників. Швидкість руху рідинних теплоносіїв по каналам складає 1-2м/с.

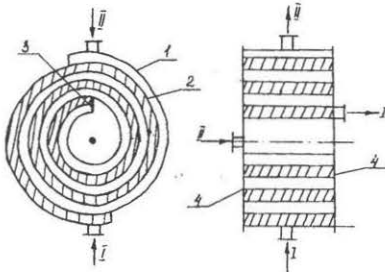


Рис. 15. Спіральний теплообмінник 1,2- стрічка згорнута в спіраль; 3- перегородка; 4- кришка

Зрошувальні теплообмінники

Зверху секції прямих труб 1 зрошуються водою, яка рівномірно розподіляється у вигляді капелів і струмків при допомозі розподільчого жолоба 3 з зубчатими краями. Відпрацьована вода відводиться з піддону 4, встановленого під секціями труб. Зрошувальні теплообмінники використовуються, основним чином, як холодильники і конденсатори при цьому майже 50% тепла відводиться шляхом випарювання охолоджуємої води. Недолік зрошувальних теплообмінників:

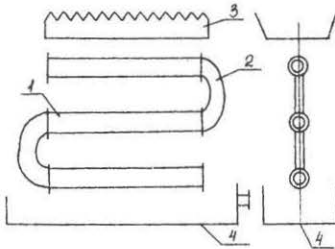


Рис. 16. Зрошувальний теплообмінник 1- секція прямих труб; 2- калач; 3- розподільний жолоб; 4- піддон

1) громоздкість; 2) нерівномірність змочування зовнішньої поверхні труб; 3) наявність капелів і бризок, які попадають в навколишнє середовище.

Ребристі теплообмінники – використовуються з метою збільшення поверхні зі сторони того теплоносія, який дає низьке значення коефіцієнта тепловіддачі (по зрівнянню з іншим теплоносієм).

Труби з поперечними ребрами різної форми використовуються в апаратах для нагрівання повітря (калориферах), а також в апаратах повітряного охолодження. Способи оребрення: поперечно круглими або поздовжніми ребрами на зовнішній поверхні труб; поздовжнені плоскі прямі і гвинтові ребра; дротяна циліндрична спіраль, навита і припаяна на зовнішній поверхні труб.

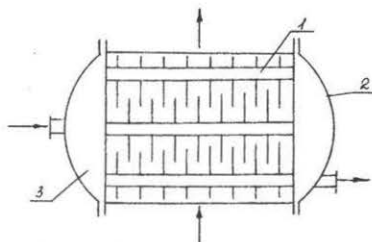


Рис. 17. Ребристий теплообмінник
1- труби з ребрами; 2- колектор для відведення конденсату; 3- колектор для підведення пари

Теплообмінні пристрої реакційних апаратів використовуються для нагрівання і охолодження середовища, у яких поверхня теплообміну створена стінками самого апарату.

До числа теплообмінних пристроїв створених елементами стінки апарату відносяться оболонки.

Оболонка 2 в деяких випадках кріпиться фланцями до корпусу апарату, або приварюється до корпусу, при цьому утруднюється її очистка і ремонт. Поверхня теплообміну оболонки не перевищує 10 м^2 . Тиск теплоносія в оболонці $0,6\text{--}10 \text{ МПа}$. Нагрівання або охолодження при підвищених тисках теплоносія (до 6 МПа) може відбуватися при допомозі змійовикових, приварених до зовнішньої стінки апарату у виготовлених із напівциліндрів розрізаних по твірній труби або із кутикової сталі.

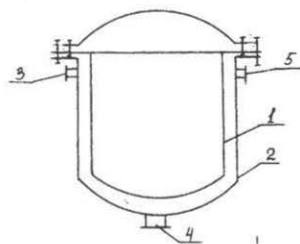


Рис. 18. Реакційний апарат
1- корпус апарату; 2- оболонка; 3- штуцер для підігрівання пари; 4- штуцер для відведення конденсату; 5- штуцер для відведення неконденсованих газів

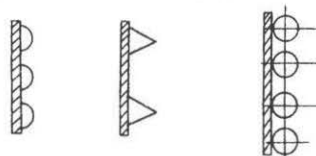


Рис. 19. Варіанти оребрення
а) із розрізаних по твірній (половнот) труб; б) із кутикової сталі; в) із труб приварених багатопаровим швом

1. Тепловий розрахунок теплообмінних апаратів

Розрахунок поверхневих теплообмінних апаратів містить тепловий, конструктивний, гідравлічний, та на міцність. Тепловий розрахунок по-

верхнього теплообмінника складається в рішенні основного рівняння теплопередачі

$$Q = KF\Delta t_{cp} \quad (1)$$

сумісно з рівнянням теплового балансу

$$Q = G_1(i_1' - i_1'')\eta = G_2(i_2'' - i_2') \quad (2)$$

η - коефіцієнт втрат в навколишнє середовище, $\eta=0,95\dots 0,97$.

Тепловміст речовин вибирається по таблицям. Коли теплоносії не змінює агрегатного стану

$$i_1' - i_2'' = c_p(t_1' - t_1''), \quad (3)$$

коли теплоносії змінює агрегатний стан то

$$i_1' - i_1'' = c_p(t_1' - \Theta) + r + c_p(\Theta - t_1''),$$

де Θ - температура зміни агрегатного стану теплоносія, r - скрита теплота зміни агрегатного стану теплоносія.

2. Температурний режим теплообмінника

В теплообмінниках можливо три основних температурних режиму теплоносіїв:

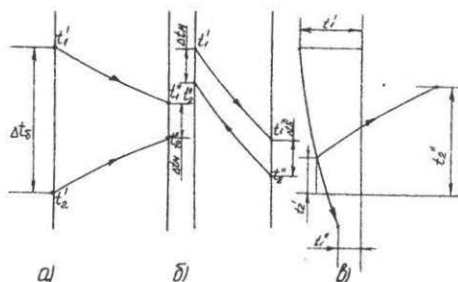


Рис. 20. Схеми руху теплоносіїв

а) прямоток; б) протиток; в) змішаний ток

1) температура обох теплоносіїв в процесі теплообміну залишається постійною. (конденсація пари - кипіння рідини, конденсація пари - плавлення рідкої речовини).

2) температура одного теплоносія зберігається постійною, а іншою безперервно змінюється (кипіння рідини, охолодження газу, конденсація пара- підігрівання рідини або газу і тощо).

3) температури обох теплоносіїв безперервно і одночасно змінюється (нагрівання або охолодження теплоносіїв без зміни агрегатного стану).

Температура початкова або кінцева одного теплоносія задана. Однією температурою другого теплоносія необхідно задатися, при чому різниця температур теплоносіїв не повинна бути $< 5^\circ \text{C}$. Потім по рівнянню теплового балансу (2) визначаємо невідому температуру другого теплоносія.

Для прямотоку і протivotоку середня різниця температур визначається як:

$$\text{при } \frac{\Delta t_{\sigma}}{\Delta t_{\text{м}}} \leq 2 \text{ тоді } \Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\sigma} + \Delta t_{\text{м}}}{2} \quad (5)$$

$$\text{при } \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m} > 2 \text{ тоді } \Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}} \quad (6)$$

При складних схемах руху теплоносіїв

$$\Delta t'_{cp} = \Delta t_{cp} \varepsilon, \quad (7)$$

де ε - поправочний коефіцієнт.

Середня різниця температур може бути представлена як різниця між середніми температурами першого t_1 і другого t_2 теплоносіїв

$$\Delta t_{cp} = t_1 - t_2. \quad (8)$$

3. Визначення коефіцієнта теплопередачі K , і поверхні теплообміну F

Коефіцієнт теплопередачі визначається

$$K_0 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (9)$$

Рекомендації по вибору швидкостей теплоносіїв

- 1) Швидкість руху рідини змінюється 0,1...0,3 м/с;
- 2) Коли у воді маються тверді домішки то швидкість $v > 1,5$ м/с;
- 3) Масова швидкість газу $w\rho$ в теплообмінниках змінюється в межах (2...20) кг/(м²с);
- 4) В зміювиках швидкість рідини $v > 1$ м/с, а газів до 10 м/с;
- 5) В спіральних теплообмінниках - $v < 2$ м/с, а $w\rho = 20$ кг/(м²с);
- 6) В пластинчатих теплообмінниках швидкість рідини $v = 0,3...1,2$ м/с;
- 7) Швидкість відведення конденсату $v = 0,6...2$ м/с;

Вплив забруднення на коефіцієнт теплопередачі

$$K = \phi K, \quad \phi = 0,7...0,8 \quad (10)$$

Поверхня теплообміну визначається

$$F = \frac{Q}{K \Delta t_{cp}}. \quad (11)$$

4. Конструктивний розрахунок теплообмінників

Задачею конструктивного розрахунку являється визначення довжини труб, кількості витків, лапок або кількості труб та їх розміщення, діаметру апарата, число ходів та розміри патрубків.

Загальне число труб n в кожухотрубному теплообміннику

$$n = \frac{F}{\pi d_p \cdot l} \quad (12)$$

Для труби коефіцієнт теплопередачі визначається

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi d_2 \alpha_2}}$$

тоді при

$$\begin{aligned} \alpha_1 \gg \alpha_2 & \quad d_p = d_2 \\ \alpha_1 \approx \alpha_2 & \quad d_p = 0,5(d_1 + d_2) \\ \alpha_1 \ll \alpha_2 & \quad d_p = d_1 \end{aligned}$$

В залежності від витрат і швидкості теплоносіїв визначається число труб n_0 одного ходу у трубному просторі

$$n_0 = \frac{4G_{\text{тр}}}{3600\pi d_{\text{вн}} \omega_{\text{тр}} \rho} \quad (14)$$

Число ходів у трубному просторі

$$Z_{\text{тр}} = \frac{n}{n_0}$$

Рекомендовано число ходів: 1; 2; 3; 4; 6; 12.

Для теплообмінників типу “труба в трубі”, зрошувальних і зміювикових довжина труб визначається

$$L = \frac{F}{\pi d_p m} \quad (16)$$

де m —кількість секцій (зміювиков)

Знаючи довжину труби і кількість секцій m можна визначити число секцій і або витків зміювика j .

$$j = \frac{L}{l} \quad j = \frac{L}{\pi D_{\text{зм}}} \quad (17)$$

де l - стандартна довжина труби.

Діаметр патрубків розраховується

$$d = \sqrt{\frac{4G}{3600\omega_p}} \quad (18)$$

5. Гідравлічний розрахунок поверхневих теплообмінників

Втрата тиску в робочому середовищі ΔP , при проходженні теплоносія через апарат визначається

$$\Delta P = \Delta P + \Delta P_{\text{мо}} = \left(\lambda' \frac{l}{d} + \Sigma \xi_i \right) \frac{\rho \omega^2}{2} \quad (19)$$

Коефіцієнт опору тертя λ' для ламінарного режиму

$$\lambda' = \frac{64}{\text{Re}} \left(\frac{\text{Pr}_c}{\text{Pr}} \right)^{1/3} \left[1 + 0,22 \left(\frac{\text{Gr} \cdot \text{Pr}}{\text{Re}} \right)^{0,15} \right] \quad (20)$$

Pr_c , Pr -критерій Прандля для рідини при температурі стінки, і при середній температурі потоку рідини.

$$\text{Re} = \frac{\omega l}{\nu}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu}{a}, \quad \text{Gr} = \frac{g l^3}{\nu^2} \beta \Delta t, \quad \text{Ar} = \frac{q l^3}{\nu^2} \frac{\Delta \rho}{\rho_0}, \quad \Delta \rho = \rho_0 \beta \Delta t.$$

Для турбулентного режиму

$$\lambda' = 0,14 \sqrt{\varepsilon} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_c}{\text{Pr}} \right)^{1/3}, \quad (21)$$

ε - відносна шорсткість стінки.

Потужність насоса визначається

$$N = \frac{G \Delta P}{3600 \cdot 1000 \cdot \rho \cdot \eta}. \quad (22)$$

Конденсатори змішування

Вони являються поверхневими конденсаторами.

Сухий поличний барометричний конденсатор працює при протитічному русі охолоджуємої води і пари.

Залишковий тиск в конденсаторі становить 0,01-0,02мПа. Конденсатори змішування використовуються для утворення вакууму в установках.

Розрахунок барометричних конденсаторів

Діаметр барометричного конденсатору

$$D = \sqrt{\frac{4G}{\pi \cdot \rho \cdot \omega_n}}, \quad (23)$$

де G , ρ - витрати і густина пари, $\omega_n = 10-15 \text{ м/с}$.

Витрати води на охолодження визначаємо із теплового балансу

$$G I_n + W c_a t_a = (G + W) c_a t_b$$

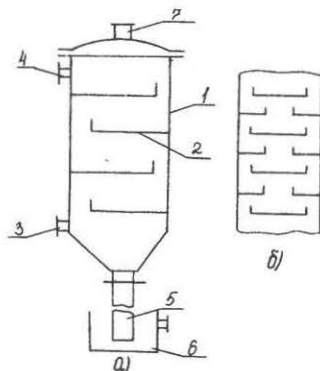


Рис. 21. Конденсатор змішування а) з сегментними поличцями; б) з кільцевими поличцями.

1- циліндричний корпус; 2- сегментні поличці; 3- патрубок підведення пари; 4- патрубок підведення води; 5- барометрична труба; 6- барометричний ящик; 7- патрубок відведення несконденсованих газів.

$$W = G \frac{I_n - c_b t_6}{c_a(t_6 - t_a)} \quad (24)$$

Звичайно

$$t_6 = t_{\text{пар}} - (3...5)^\circ\text{C}, \quad (25)$$

Діаметр барометричної труби

$$d_{\text{тр}} = 1,13 \sqrt{\frac{G + W}{\omega}}, \quad (26)$$

$\omega = (0,5...1,0)$ м/с - швидкість суміші в барометричній трубі

Кількість несконденсованого газу обчислюється:

$$G_n = \{(0,025(W + G) + 10G) \cdot 10^{-3} \text{ кг/с} \quad (27)$$

Рахується що на кожні 1000 кг охолоджуємої води і конденсату вноситься 0,025 кг повітря і на 1000 кг парового конденсату підсмоктується через нещільності 10 кг повітря.

Об'єм відсмоктуемого повітря визначається

$$V_{\text{пов}} = \frac{G_n \cdot R_n (273 + t_n)}{P_{\text{пов}}} \quad (28)$$

$R_n = 288$ Дж/(кг К) - газова постійна для повітря.

Тема 5

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СТЕРИЛІЗАЦІЇ ЖИВИЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ

При виробництві біологічно активних речовин використовують різноманітні живильні середовища, у яких можуть міститися сторонні мікроорганізми. Ці мікроорганізми повинні повністю бути зруйновані чи вилучені під час стерилізації.

Процес впливу на живильне середовище при якому руйнується або повністю вилучаються мікроорганізми, називають стерилізацією.

Вилучення і деструкція мікробів може бути досягнута різними методами: вологого тепла, вібростерилізація, током високої частоти, іонізуючого випромінювання. Значним фактором, забезпечуючим надійну стерилізацію при тепловій обробці, являється тривалість процесу.

Класифікація способів і обладнання для стерилізації живильних середовищ

Біологічно активні речовини отримують поверхневим способом культивування на сипучих твердих живильних середовищах або глибинним на рідких живильних середовищах.

Апарати для стерилізації стерильних сипучих речовин класифікуються на:

1) Установки періодичної дії:

- а) стерилізатор горизонтальний одноступеневий;
- б) стерилізатор горизонтальний двохступеневий;
- в) стерилізатор вертикальний;
- г) стерилізатор газовий;
- д) стерилізатор двохступеневий сумісний.

2) Установки безперервної дії:

- а) вібростерилізатор;
- б) стерилізатор з використанням токів високої і надвисокої частоти;
- в) стерилізатори з сильнотічними прискорювачами електронів.

Для стерилізації твердих сипких середовищ використовуються теплові і холодні способи стерилізації. Теплова стерилізація здійснюється паром (під вакуумом, атмосферним чи надатмосферним тиском), інфрачервоними променями, електронагрівом при допомозі високочастотно і надвисокочастотного нагрівання.

До холодних способів стерилізації відносяться: іонізуючого випромінювання, хімічна стерилізація окислом етилену, ультразвуковий, радіаційного впливу та фільтрування через стерилізуючі фільтри.

При стерилізації окислом етилену використовують газові стерилізатори шафного типу періодичної дії з рециркуляцією окислу етилену.

Для стерилізації сипучих середовищ іонізуючим випромінюванням використовується пучок наведених прискорених електронів до 5 МеВ, отриманих від сильнотічних прискорювачів.

Рідинні середовища стерилізуються шляхом теплової обробки або при допомозі фільтрування через асбестоцелюлозні мембранні фільтри типу МФА-03.

Процеси періодичної стерилізації рідинних середовищ відбуваються в спеціальних апаратах, або безпосередньо в ферментаторах після їх завантажування. Для стерилізації рідинних середовищ використовуються установки стерилізації УНС, а також зарубіжні установки фірми "Де-Лаваль" та роторного типу виробництва Югославії.

Стерилізатор горизонтального типу конструкції ВНДЕКІПродмаш

Використовується для стерилізації сипучих живильних середовищ, який обладнаний пароводяною оболонкою.

Вали 5 обертаються в різні сторони, при цьому середовище безперервно переміщується в протилежних напрямках, забезпечуючи інтенсивне перемішування. Для прискорення нагріву середовища призначена пароводяна оболонка 8, у яку подається пар при тиску до 0,2 МПа. Середовище витримують при заданій температурі стерилізації з періодичним включенням перемішувачів пристроїв 5. Одночасно можлива стерилізація до 400

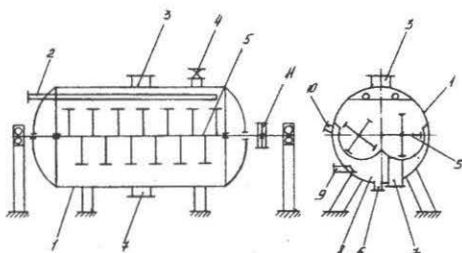


Рис. 22. Стерилізатор ВНДЕКІпродмаш

1- корпус; 2- патрубок подачі води; 3- люк для завантажування сировини; 4- повітряник; 5- вал з лопатками; 6- патрубок для впускання та випускання води; 7- розвантажувальний люк; 8- водяна оболонка; 9- патрубок для подачі пари; 10- патрубок для відведення несконденсованих парів та газів; 11- привід валу

кг. сухих компонентів і до 600 л води для отримання середовища вологістю 58...60%.

Двохступеневий стерилізатор періодичної дії горизонтального типу

Використовується для стерилізації сипучих живильних середовищ і дозуванням посівної культури. Продуктивність стерилізатора 150 кг/год.

Накопичувач 5 призначений для витримування середовища при температурі стерилізації. В

парові оболонки 3 подається пар при тиску 0,5-0,6 МПа. Тормозні лопатки 12 призначені для кращого перемішування середовища, яке

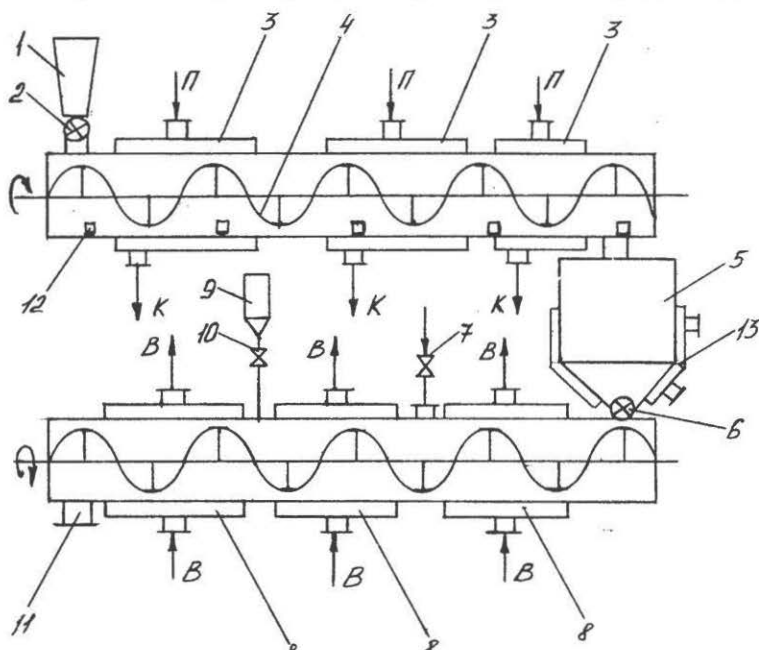


Рис. 23. Двохступеневий стерилізатор періодичної дії горизонтального типу

1- бункер для сировини; 2- дозатор сировини; 3- парова оболонка; 4- стерилізатор; 5- накопичувач; 6- дозатор сировини; 7- патрубок подачі стерильної води; 8- водяна оболонка для охолодження середовища; 9- смішть посівної культури; 10- дозатор посівної; 11- патрубок відведення стерильного середовища; 12-тормозні лопатки

стерилізується. У витримувачі 5 середовище знаходиться 60-90хв. і у нього мається парова оболонка 13.

Недолік горизонтальних стерилізаторів: неповне використання об'єму апарата, забивання вивантажувальних люків, нерівномірність стерилізації, неповне вивантажування середовища із стерилізатора.

Стерилізатор періодичної дії вертикального типу

Він призначений для стерилізації сипучих середовищ, який складається із двох ступенів.

Перша ступінь, у якій відбувається нагрівання і стерилізація зволоженого середовища, являється стерилізатором вертикального типу, а друга ступінь призначена для зволоження середовища, охолодження і засів посівної культури, являє собою змішувач горизонтального типу. Лопатки 4 виготовлені у вигляді літакового крила, щоб не спресовувати середовище. Завантажується стерилізатор через лаз 8 і кількість введеної сировини 600 кг. Частота обертання перемішуючого пристрою горизонтального змішувача $0,17...0,2 \frac{1}{\text{с}}$.

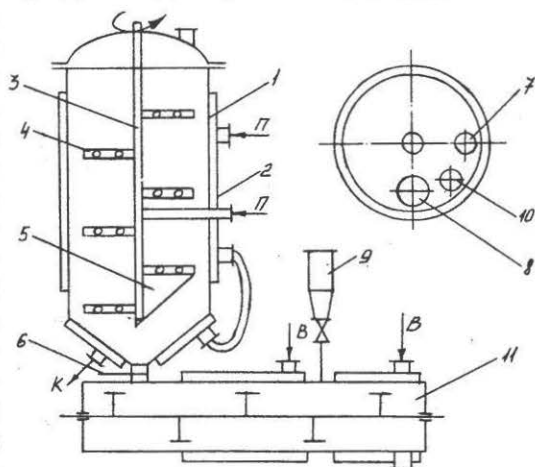


Рис. 24. Стерилізатор періодичної дії вертикального типу

1- корпус; 2- оболонка для нагрівання; 3- пустотілий вал; 4- перемішуючі лопатки; 5- лопатка вивантаження; 6- задвижка; 7- оглядове вікно; 8-завантажувальний пристрій; 9- ємність для посівної культури; 10- патрубок для запобіжного клапану; 11- змішувач горизонтального типу

Вібростерилізатор

Це апарат безперервної дії у якому відбуваються такі операції: завантажування, стерилізація і засівання культури.

Вібраційний лоток 4 по довжині розділений на три частини: 1) завантажувальну, яка виконує функцію дозатора; 2) стерилізаційну, де відбувається нагрівання і стерилізація середовища при температурі 130-140 °С і 3) засівну, де відбувається охолодження і зволоження середовища при добавленні холодної стерильної води, засівання і переміщення середовища. Регулюючий пристрій 10 призначений для вста-

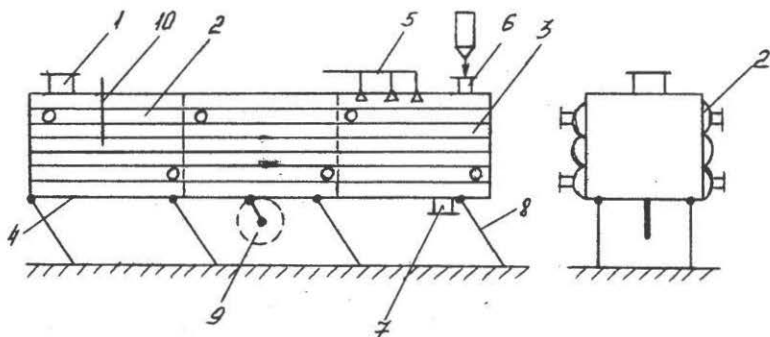


Рис. 25. Вібростерилізатор

1- завантажувальний лаз; 2- трубчатий підігрівач; 3- трубчатий охолоджувач; 4- лоток вібраційний; 5- розсіювач стерильної води; 6-патрубок для подачі посівної культури; 7- розвантажувальний люк; 8-пружні стійки; 9- вібратор; 10- регулюючий шибер

новлення висоти шару середовища. Швидкість переміщення сипучого середовища відбувається при зміні частоти і амплітуди коливання вібратора 9. Стерилізація відбувається за рахунок теплової радіації. Охолодження живильного середовища відбувається водою при допомозі трубчатого охолоджувача 3.

Недоліки вібростерилізатора:

- нерівномірність стерилізації середовища;
- комкування живильного середовища під час стерилізації;
- клейстеризація крохмалю.

Високочастотний стерилізатор безперервної дії

Відмінність високочастотного нагрівання матеріалів заключається в тому, що нагрівання досягається дуже швидко за рахунок безпосереднього перетворення енергії токів високої частоти в теплову. Швидкість нагрівання визначається напруженням електричного поля, електрофізичними властивостями матеріалу і не залежить від геометричної форми матеріалу.

Стрічковий транспортер 5 розміщений в середині герметизованої і екранованої камери. Живильне середовище завантажується в бункер 1 і дозатором 2 рівномірним шаром висотою 30мм. поступає на стрічковий транспортер. По мірі виходу із зони високочастотного нагрівання живильне середовище охолоджується за рахунок природної тепловіддачі до температури $t=40...45^{\circ}\text{C}$, а потім зсипається на другу ступінь, де відбувається охолодження, зволоження і засівання.

Для створення умов, які б виключали виникнення спонтанної мікрофлори в стерилізаційній камері встановлені бактерицидні лампи 3 БУВ-30. При допомозі високочастотного генератора досягається температу-

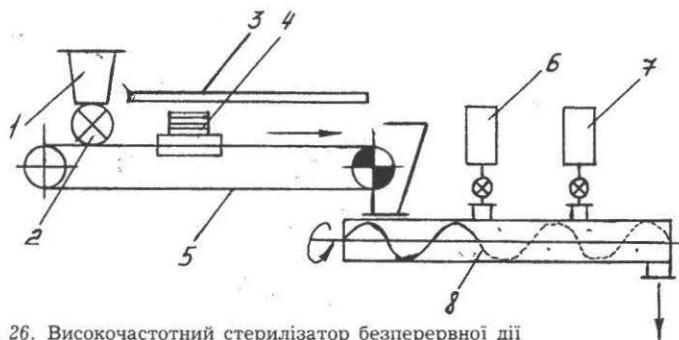


Рис. 26. Високочастотний стерилізатор безперервної дії

1- завантажувальний бункер; 2- дозатор живильного середовища; 3- бактерицидна лампа; 4- високочастотний генератор; 5- стрічковий транспортер; 6- дозатор стерильної води; 7- дозатор посівної суспензії; 8- двохсекційний шнек

ра матеріалу 140...180° С при експозиції обробки 120...180 с досягається повна стерильність середовища при вологості 10...12%.

Переваги високочастотної стерилізації по зрівнянню з тепловою: безперервність процесу, висока швидкість нагрівання середовища, просте регулювання та контролю процесу, покращання технологічних властивостей середовища. Продуктивність високочастотного стерилізатора складає 300 кг/год.

Стерилізатор з використанням іонізуючого випромінювання

Схема установки аналогічна як у високочастотному стерилізаторі, але замість генератора 4 встановлена іонізуюча пушка. Обробка живильних середовищ відбувається дозами 0,5...2,5 млн.рад. Термін обробки 30...60 с. Температура живильного середовища не змінюється. Вміст розчинних цукрів збільшується на 20...30%. Використовуються прискорювачі ЕЛТ-2,5.

Тема 6

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СТЕРИЛІЗАЦІЇ РІДКИХ ЖИВИЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ

Стерилізація живильних середовищ відбувається в стерилізаторах періодичної і безперервної дії. Стерилізація невеликих об'ємів відбувається безпосередньо у ферментаторах. При стерилізації складних середовищ необхідно, щоб деякі компоненти живильного середовища, частіше всього азотомісткі вимагають більш м'якого режиму стерилізації, тому їх стерилізують в окремих апаратах, які називаються сателітами.

Сателіт

Сателіт – апарат періодичної дії, який має об'єм 30...50 м³ і працює під тиском 280...480 кПа.

Пропелерна мішалка обертається з частотою 150 хв⁻¹. На апараті встановлені прибори для вимірювання і регулювання тиску і температури, люк для механічного миття апарату і запобіжний клапан. Під час охолодження середовища в сателітах після стерилізації проводиться подача стерильного повітря під тиском, а також подається стерильне повітря під час розвантажування апарату.

Недоліки періодичного режиму стерилізації: низька продуктивність, високі питомі витрати пара, води, електроенергії.

Установки безперервної стерилізації рідких живильних середовищ УНС-5, 20, 50, 100, 200, 300 м³/год

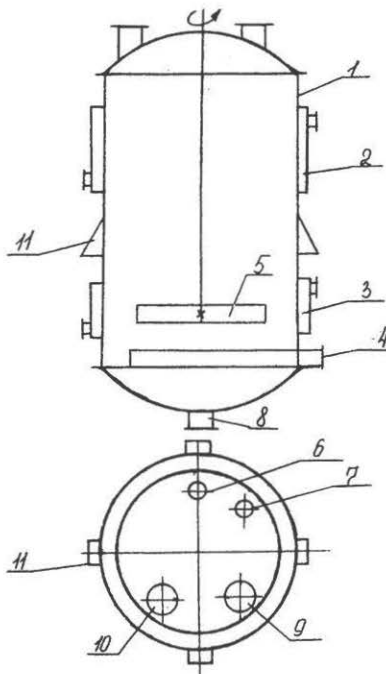


Рис. 27. Сателіт

1- корпус; 2- оболонка нагрівання живильного середовища; 3- оболонка охолодження живильного середовища; 4- патрубков для подачі стерильного повітря; 5- лопатна мішалка; 6- патрубков для підключення запобіжного клапану; 7- патрубков для подачі води; 8, 9- патрубки для вивантажування і завантажування рідкого живильного середовища; 10- лаз для миття апарату; 11- лапи для кріплення апарату

Подача живильного середовища в нагрівник відбувається вихровим насосом. Для очищення середовища від частинок \varnothing 0,8 мм використовуються фільтри у вигляді дротяної сітки із нержавіючої сталі і у фільтрувальному стакані, де встановлена така ж сітка. Стакан розташований перед витратоміром. Витримувач-змійовик трубчатого типу з діаметром труби 89 мм. Об'єм витримувача 170 л і забезпечує термін витримування при температурі 140 °С на протязі 2 хв.

Об'єм витримувача 170 л і забезпечує термін витримування при температурі 140 °С на протязі 2 хв.

Для охолодження живильного середовища до 40 °С використовується теплообмінник типу "труба в трубі". $F = 20\text{ м}^3$. Температура стерилізації 120...140 °С. До початку стерилізації живильного середовища усі вузли стерилізуються паром на протязі 4 год.

Установка безперервної стерилізації продуктивністю УНС-20 м³/год передбачує можливість рекуперації до 70-80% тепла.

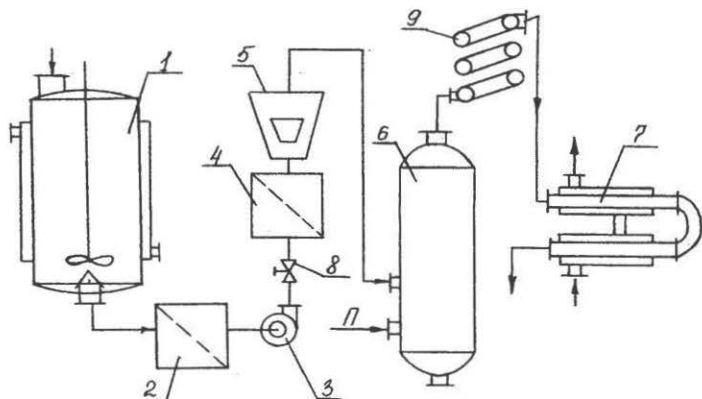


Рис. 28. Установки безперервної стерилізації рідких живильних середовищ УНС-5

1- збірник для приймання і зберігання нестерильного середовища; 2, 4- очисник виготовлений із дрютяної сітки 0,8x0,8; 3 - вихровий насос; 5- ротаметр; 6- підігрівник; 7-охолоджувач; 8- регулюючий вентиль; 9- витримувач

До початку роботи усі апарати, трубопроводи і арматура УНС стерилізується гострим паром, при температурі 140°C. Швидкість входження живильного середовища в підігрівник складає 3,5 м/с.

Підігрівник установки УНС-20

Пар подається під тиском 0,6 мПа. Ємкість корпусу 100л. Живильне середовище нагрівається до $t = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$.

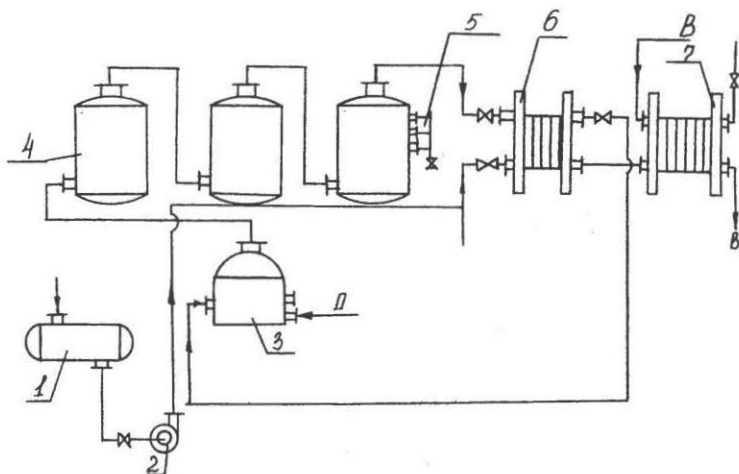


Рис. 29. Установки безперервної стерилізації рідких живильних середовищ УНС-20

1- приймальний резервуар; 2- насос; 3- нагрівник стерилізатора; 4- витримувач; 5- відбірник проб; 6- теплообмінник рекуператор; 7- теплообмінник охолоджувач

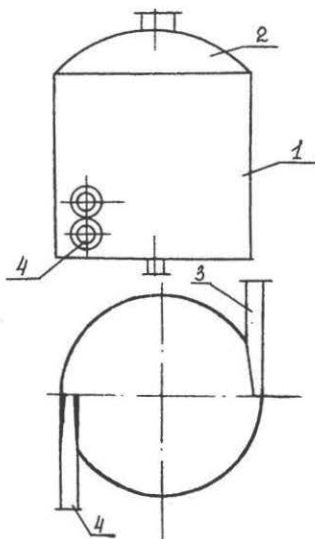


Рис. 30. Підігрівник установки УНС-20
1- циліндричний корпус; 2- сферична кришка; 3- патрубок подачі живильного середовища; 4- патрубки подачі пари \varnothing 2,5 мм.

дається із вертикальних труб діаметром 400-600 мм, з'єднаних поспідовно і покритих теплоізоляцією. Ємкостні витримувачі більше складні і у них важко досягти рівномірності потоку по зрівнянню з трубчатими.

Установка безперервної стерилізації фірми "ДЕ-ЛАВАЛЬ"

Ротаметри 1 потрібні для задачі потоків компонентів живильного середовища. Роботу установки безперервної стерилізації можна розділити на три стадії: стерилізації живильного середовища, промивка і очистка. Середовище, потік якого регулюється живильним насосом 5, подається через пластинчатий теплообмінник 6 попередньо підігрівається до $t = 90...120$ °С повертаємим із витримувача 8 стерильним, нагрітим до $t = 140$ °С живильним середовищем. Нагрівання до температури стерилізації середовища $t = 140$ °С відбувається в змішувачі-підігрівника 7. У витримувачі 8 середовище витримується 1-2 хв. До поступання середовища у ферментатор воно охолоджується до температури 40 °С в пластинчатому теплообміннику 6. Коефіцієнт рекуперації теплоти складає 60...70%.

Витримувач установки УНС-20
У витримувачі знаходиться 10 секцій. При допомозі диска 4,5,6 середовище завихрюється і краще переміщується. Діаметр витримувача 600мм. Ємкість витримувача 1,7м³. Товщина теплоізоляції 35мм.

Рекуператор - пластинчатий теплообмінник з $F=100$ м². В мікробіологічній промисловості використовується ємкостні та трубчаті витримувачі. Трубчатий витримувач скла-

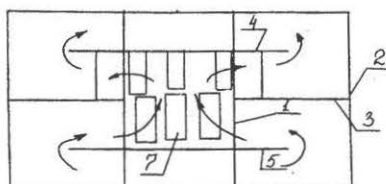


Рис. 31. Витримувач установки УНС-20
1- центральна труба; 2- корпус витримувача; 3, 4, 5, 6- диски; 7- прорізи.

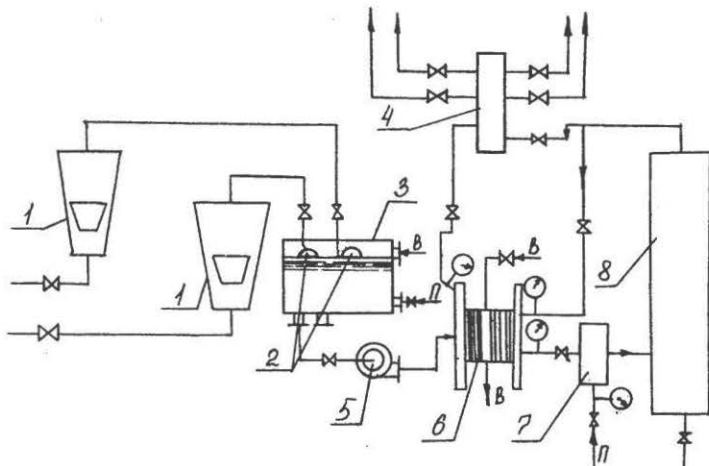


Рис. 32. Установа безперервної стерилізації фірми "ДЕ-ЛАВАЛЬ"

1- ротаметр; 2- регулюючий клапан; 3- зрівняльний бак; 4- гребінка; 5- насос; 6- пластинчатий теплообмінник; 7- змішувач-нагрівник; 8- витримувач

Тема 7

ВИПАРЮВАННЯ

Загальні відомості

Випарюванням називають процес концентрування рідинних розчинів практично нелетучих речовин шляхом часткового вилучення розчинника випарюванням при кипінні речовини. В процесі випарювання розчинник вилучається із всього об'єму розчину, в той же час як при температурі нижче температури кипіння випарювання відбувається тільки з поверхні рідини.

Випарювання іноді використовується для вилучення розчинника у чистому вигляді: при опрісненні морської води випарюванням утворюється із неї водяний пар конденсується і отриману воду використовують для чистої чи технічної мети.

У ряду випадків випарюючий розчин підлягає послідуочій кристалізації у спеціальних випарних апаратах.

Концентровані розчини і тверді речовини, отримані в результаті випарювання легше і дешевше переробляти, зберігати і транспортувати.

Тепло для випарювання можна підводити любими теплоносіями, які використовуються при нагріванні. В більшості випадків в якості грюючого агента при випарюванні використовується водяний пар, який

називається гріючим або первинним. Пар, утворений при випаровуванні киплячого розчину, називається вторинним. Тепло, необхідне для випарювання розчину, звичайно підводиться через стінку, відокремлюючи теплоносії від розчину.

Процес випарювання проводять під вакуумом, при надлишковому і атмосферному тиску. При випарюванні під вакуумом становиться можливим проводити процес при низьких температурах, що важливо у випадку концентрування розчинених речовин, які розкладаються при підвищеній температурі. При випарюванні під вакуумом, у випадку однакової корисної різниці температури, можна використовувати гріючий агент більш низьких робочих параметрів (температури і тиску). Використання вакууму дає можливість використовувати в якості гріючого агента вторину пару самої випарної установки, що знижує витрати первинної гріючої пари. Використання вакууму викликає подорожчання випарної установки, тому що потрібні додаткові затрати на пристрої для створення вакууму (конденсатори, уловлювачі, вакуумнасоси), а також збільшуються експлуатаційні витрати.

При випарюванні під надлишковим тиском можливе використання вторинної пари як для випарювання так і для інших потреб не пов'язаних з процесом випарювання.

Вторинна пара, яка відбирається на сторону, називається екстра парою. Випарювання при надлишковому тиску пов'язане з підвищеною температурою кипіння розчину. Тому такий спосіб використовується при випарюванні термічно стійких речовин.

При випарюванні при атмосферному тиску вторинний пар не використовується і вилучається в атмосферу. Такий спосіб випарювання являється простим, але й найменше економічним.

Випарювання під атмосферним тиском, а іноді випарювання під вакуумом проводять в окремих випарних апаратах однокорпусних випарних установках. Багатокорпусні випарні установки, складаються із декількох випарних апаратів, чи корпусів, у яких вторинний пар кожного попереднього корпусу направляється в якості гріючого в наступуючий корпус. В таких установках первинною парою нагрівається тільки перший корпус. Тиск в послідовно з'єднаних корпусах знижується таким чином, щоб забезпечити різницю температур між вторинною парою із наступуючого корпусу і розчином, який кипить в даному корпусі, щоб створити необхідну рухому силу процесу випарювання.

Економію первинної пари можливо досягнути в однокорпусних випарних установках з тепловим насосом. У таких установках вторинна пара на виході із апарату стискається при допомозі теплового насосу (наприклад термокомпресора) до тиску, відповідно температурі пер-

винної пари, після чого вона знову повертається в апарат для випарювання розчину.

Зміна властивостей розчину при згущенні

По мірі згущення розчину змінюється його фізичні властивості, що важливо при розрахунку, конструюванні і експлуатації випарної апаратури. Розглянемо зміну цих властивостей за час випарювання τ в залежності від зростаючої концентрації розчину CP при постійному тиску пари над киплячим розчином.

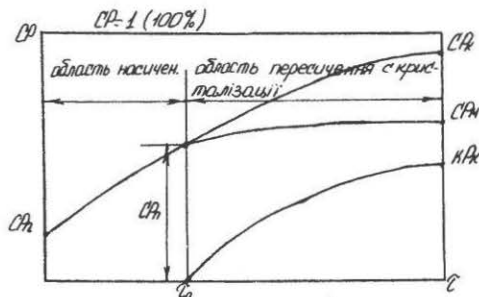


Рис. 33. Залежність зміни концентрації розчину CP при постійному тиску пари над киплячим розчином

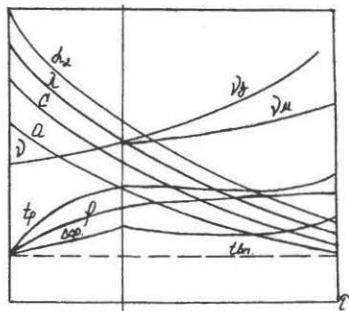


Рис. 34. Залежність зміни властивостей розчину при згущенні

Кінцева концентрація CP_k визначається технічними умовами. При підвищенні концентрації змінюються властивості розчину, температура кипіння t_p , теплопровідність λ , теплоємність c , в'язкість ν . При збільшенні концентрації розчину збільшується критерій Прантля

$$Pr = \frac{\nu}{a}$$

Коефіцієнт тепловіддачі a_2 від стінки до киплячого розчину по мірі згущення його зменшується, так як в рівнянні $\alpha_2 = A_2 q^{0.6}$, функція фізичних параметрів розчину a A_2 зменшується.

Коли до моменту часу τ_0 розчин доведений до концентрації пересичення CP_n , то подальше згущення призводить до випадання і росту масового вмісту кристалів K_p в розчині.

В області кристалізуючих розчинів крива вмісту сухих речовин розшаровується: верхня крива відноситься до всієї уварюваної маси, включаючи кристали: нижня — дає концентрацію сухих речовин CP_m в маточному (міжкристальному) розчині. Для збереження якісних характеристик концентрованих розчинів відбувається випарювання під вакуумом, при понижених температурах.

Методи випарювання

По методу ведення процесу різняться періодичне і безперервне випарювання. При періодичному випарюванні розчин поступає в один апарат і згущується до заданої концентрації, або по мірі випарювання безперервно чи періодично вводиться свіжий розчин до тих пір поки утворена маса заповне весь апарат. Згущений розчин випускається, апарат заповнюється новою порцією свіжого розчину. Безперервний процес випарювання відбувається в одиночних апаратах безперервної дії чи в багатокорпусній випарній установці. Конструктивна схема найбільш поширеного випарного апарата з вертикальними циркуляційними трубами і внутрішньою центральною циркуляційною трубою показано на мал. Умовне позначення.

Трубки розвальцьовані в двох трубних решітках. В міжтрубний простір подається пар. Знизу відводиться конденсат, а зверху - несконденсовані гази. Розчин кипить в трубах і піднімається вгору і відокремившись від вторинної пари, опускається по центральній циркуляційній трубі до входу в кип'ятильні трубки.

Витрати пари при однократному випарюванні складають 1кг/кг випареної води. Для зниження витрат пари використовуються багатокорпусні випарні установки, або випарні апарати з тепловим насосом.

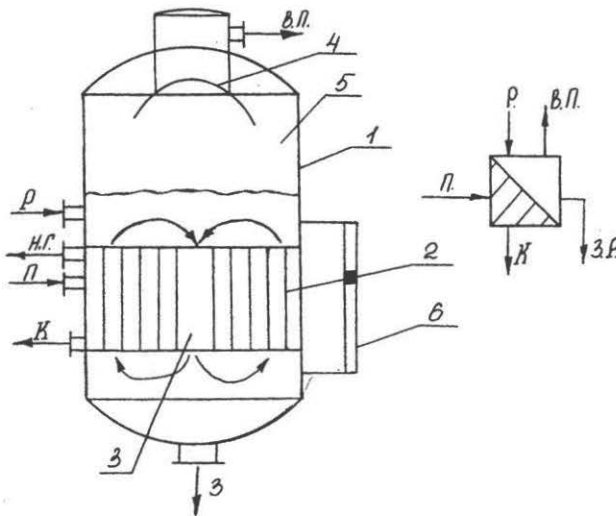


Рис. 35. Схема однокорпусної випарної установки
1 - корпус випарного апарату; 2 - нагрівальні труби; 3 - циркуляційна труба; 4 - відбійник; 5 - сепаратор; 6 - водомірне скло;

Р - розчин; П - пара; К - конденсат; ЗР - згущений розчин; ВП - вторинна пара; НГ - несконденсовані гази

Е - екстра пара;
Rd - ретурна пара;
K+B - суміш конденсату і охолоджуємої води; ПК - пароструменевий компресор; Д_в - надлишкова вторинна пара; К - конденсатор.

В кожному апараті багатокорпусної установки теплообмін забезпечується за рахунок різниці між температурою гріючої пари і киплячої рідини, яка створюється за рахунок меншого тиску в кожному посліду-

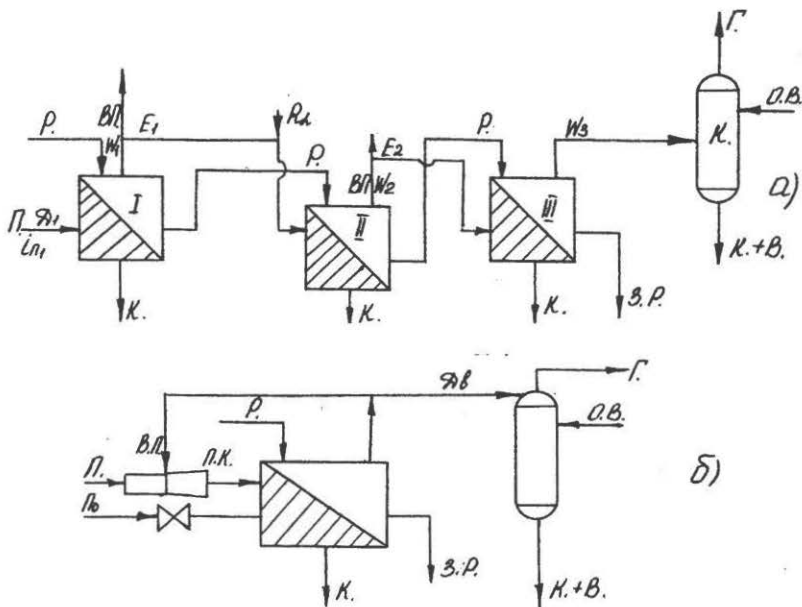


Рис. 36. Схеми випарних установок

а) багатокорпусна установка;

б) випарний апарат з пароструменевим компресором

чому корпусі по зрівнянню з попереднім. Коли вторинна пара останнього корпусу має низьку температуру і для підігрівання не використовується, то вона направляється в конденсатор К, де зріджується при контакті з охолоджуємою водою. Це забезпечує в останньому корпусі потрібний вакуум. Неконденсуємі пари із конденсатора відсмоктується вакуум насосом.

Таким чином багатокорпусна установка, крім свого основного призначення - згущення розчину, забезпечує підприємство гріючою парою та гарячою водою (конденсатом).

У випарну установку розчин може поступати по трьом схемам: протитічна, прямотічна і паралельного живлення. При прямотічному живленні розчин подається в головний (перший) корпус і самозбіганням переходить в послідовні корпуса за рахунок різниці тисків.

При протитічному живленню схема руху пара залишається, а розчин поступає в хвостовий (останній) корпус і при допомозі насосів перекачується із корпуса в корпус. При протитічній схемі самовипарювання відсутнє. Ця схема використовується при випарюванні термостійких розчинів.

При паралельному живленню розчин поступає на всі корпуси одночасно і із них відбирається, а пара зберігає послідовне з'єднання корпусів. Схема використовується при випарюванні розчинів, із яких вилучається невелика кількість розчинника.

Продукти, які не витримують короткочасної дії високих температур, при цьому використовуються випарні установки з тепловим насосом.

Матеріальний баланс однокорпусної випарної установки

По методу Класена приймаємо, що в кожному корпусі 1кг грійоучої пари при конденсації віддає кількість теплоти, достатню для отримання 1кг вторинної пари.

Коли в апараті випарюється W кг/с розчинника (води), то загальний матеріальний баланс апарата виражається рівнянням.

$$G_n = G_k + W_1 \quad (1)$$

де G_n , b_n , G_k , b_k - на випарювання поступає початкового розчину, G_n , концентрацією b_n % мас і виходить G_k і b_k , кг/с.

Матеріальний баланс по абсолютно сухій речовині

$$G_n b_n = G_k b_k, \quad G_k = G_n \frac{b_n}{b_k} \quad (2)$$

Маса води, яка підлягає випарюванню

$$W = G_n - G_k = G_n \left(1 - \frac{b_n}{b_k}\right) \quad (3)$$

Кінцева концентрація розчину по продуктивності установки обрховується.

$$b_k = G_n \frac{b_n}{b_k} = \frac{G_n b_n}{G_n - W} \quad (4)$$

Тепловий баланс однокорпусної випарної установки

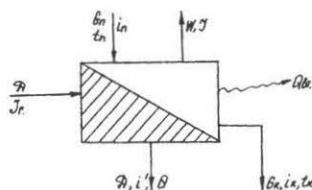


Рис. 37. Схема теплового балансу випарної установки

$$i_n = c_n t_n \quad i_k = c_k t_k$$

Рівняння теплового балансу має вигляд

$$G_n i_n + DI_r = G_k i_k + WI + Di + Q_{вт} \quad (5)$$

Можна представити із рівняння (1)

$$G_n c_n t_k = G_k c_k t_k + Wc'' t_k \quad (6)$$

де c'' - середня теплоємність води для $(0^\circ\text{C} - t_k)$

Скоротимо в рівнянні (6)

$$G_n c_n = G_k c_k + Wc'' \quad (7)$$

Отримаємо

$$G_n c_n t_n + DI_r = G_n c_n t_k - Wc''t_k + WI + Dc'\Theta + Q_{вт} \quad (8)$$

Кількість пари

$$D = \frac{G_n c_n (t_k - t_n) + W(I - c''t_k) + Q_{вт}}{I_r - c'\Theta} \quad (9)$$

Величину $Q_{вт}$ приймають у вигляді долі від теплового навантаження $Q_{апарата}$. Звичайно ($Q_{вт} = 0,03...0,05$) $Q = (0,03...0,05)D(I_r - cQ)$

Коли прийняти, що $t_n = t_k$ то

$$D = \frac{W(I - c''t_k)}{I_r - c'\Theta} = \frac{Wr}{r'} \approx W \quad (10)$$

де $I_r - c'Q = r'$ теплота конденсації гріючої пари.

$I = c''t_k = r$ -теплота випарювання води із киплячого розчину. Можна прийняти, що $r = r'$.

Питомі витрати гріючої пари складають 1,1-1,2 кг/кг випарюваної води.

Розрахунок поверхні нагрівання

На основі рівняння теплопередачі

$$F = \frac{Q}{K\Delta t_{кор}}, \quad (11)$$

де Q -теплове навантажування апарата; K - коефіцієнт теплопередачі, $\Delta t_{кор}$ - рухома сила процесу (корисна різниця температур).

Корисна різниця температур у випарному апараті рівна

$$\Delta t_{кор} = T - t_k, \quad (12)$$

де T - температура конденсації гріючої пари; t_k - температура кипіння випарюваного розчину по кінцевій концентрації.

Температурні втрати, які понижують різницю температур між гріючою парою і випарюваним розчином, складаються із температурної депресії Δ' , гідростатичної депресії Δ'' та гідравлічної депресії Δ''' .

Температурна депресія Δ' рівна різниці між температурою кипіння розчину і температурою кипіння чистого розчинника при однаковому тиску. Величину при будь-якому тиску можна отримати Δ'

$$\Delta' = 1,62 \cdot 10^{-2} \frac{T^2}{r} \Delta'_{атм}, \quad (13)$$

де $\Delta'_{атм}$ - температурна депресія при атмосферному тиску, T, r - температура кипіння чистого розчинника і його теплота випарювання при даному тиску.

Гідростатична депресія Δ'' обумовлена тим, що деяка частина висоти кип'яткових труб випарного апарату, заповнена рідиною, над якою

знаходиться паро-рідинна емульсія, вміст пари у ній збільшується по напрямленню до верхньої кромки труби. За рахунок гідростатичного стовпа рідина в трубах температура кипіння в нижче розташованих шарах рідини буде більше чим температура кипіння розчину, пов'язаного з гідростатичним ефектом, називається *гідростатичною депресією*. Тиск в даному січенні рівний суміші тисків вторинної пари та гідростатичного тиску $\Delta P_{\text{ст}}$ стовпа рідини на середині висоти H труби.

$$P = P_{\text{вт.п}} + \Delta P_{\text{ср}} = P_{\text{вт.п}} + \frac{\rho g H}{2}, \quad (14)$$

Допускаючи, що

$$\rho = \frac{\rho_p}{2} \Rightarrow P = P_{\text{вт.п}} + \frac{\rho_p g H}{4}, \quad (15)$$

По тиску P , при допомозі таблиць насиченої водяної пари знаходять температуру води t_b , яка відповідає даному тиску. Різниця між температурами води t_b і температурою вторинної пари T' визначає гідростатичну депресію

$$\Delta'' = t_b - T'$$

Приймаючи, що $\Delta'' = (1...3)^\circ\text{C}$.

Гідралічна депресія Δ''' обумовлена гідралічним опором, який повинен перебороти вторина пара при її русі через сепараційний пристрій і паропроводи. В середньому $\Delta''' = 1^\circ\text{C}$ для одиночного апарату. Температура кипіння розчину з врахуванням температурних втрат складає

$$t_k = T' - \Delta' - \Delta'' \quad (16)$$

де T' – температура вторинної пари.

Матеріальний та тепловий баланс багатокорпусної випарної установки

Загальна кількість води W , яка випаровується із всіх корпусів

$$W = G_n \left(1 - \frac{B_n}{B_k} \right) \quad (17)$$

Концентрація розчинів при виході із кожного корпусів.

$$B_1 = \frac{G_n B_n}{G_n - W_1}; \quad B_2 = \frac{G_n B_n}{G_n - W_1 - W_2}; \quad B_3 = \frac{G_n B_n}{G_n - W_1 - W_2 - W_3} \quad (18)$$

Тепловий баланс. Рівняння теплових балансів корпусів:

$$Q_1 = D_r (I_r - c'_1 \Theta_1) = G_n c_0 (t_{k2} - t_0) + W_1 (I_1 - c''_1 t_{k2}) + Q_{\text{вт1}}$$

$$Q_2 = (W_1 - E_1) (I_1 - c'_2 \Theta_2) = (G_n - W_1) c_1 (t_{k1} - t_{k1}) + W_2 (I_2 - c''_2 t_{k2}) + Q_{\text{вт2}} \quad (19)$$

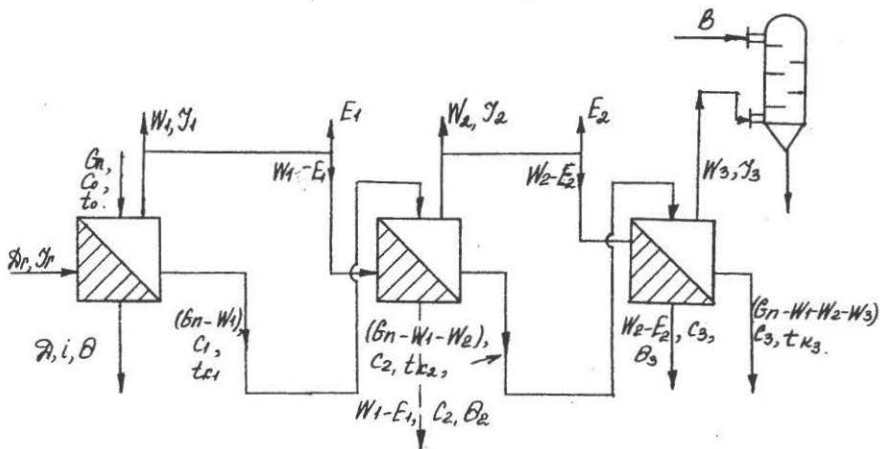


Рис. 38. Матеріальний та тепловий баланс багатокорпусної випарної установки

$$Q_3 = (W_2 - E_2)(I_2 - c_3' \Theta_3) = (G_n - W_1 - W_2)c_2(t_{k3} - t_{k2}) + W_3(I_3 - c_3'' t_{k3}) + Q_{вт3}$$

Втрати в навколишнє середовище по корпусах приймаємо (3...5 %) від Q_1, Q_2, Q_3 .

Щоб розв'язати систему (19) доповнюємо її рівнянням балансу по випареній воді

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (20)$$

Загальна корисна різниця температур і її розподілення по корпусах

Загальна різниця температур багатокорпусної прямотічної установки представляє собою різницю між температурою T_1 первинної пари, яка обігріває перший корпус і температурою насиченої пари в конденсаторі $T_{\text{конд}}$

$$\Delta t_{\text{заг}} = T_1 - T_{\text{конд}} \quad (21)$$

Корисна різниця температур для всієї установки буде менша $\Delta t_{\text{кор}}$. Для однокорпусної установки

$$\Delta t_{\text{кор}} = T - t_k = T - T' - (\Delta' + \Delta'') \quad (22)$$

Для багатокорпусної випарної установки $\Delta t_{\text{кор}}$ рівна різниці між температурою T_1 свіжої пари, яка гріє перший корпус, та температурою $T'_{\text{конд}}$ насиченої пари в конденсаторі та різницею суми температурних втрат $\Sigma \Delta$ по всім корпусах установки (з врахуванням Δ'')

$$\Sigma \Delta t_{\text{кор}} = T_1 - T'_{\text{конд}} - \Sigma \Delta \quad (23)$$

Із основного рівняння теплопередачі, поверхня нагрівання F корпусу при заданому тепловому навантаженні Q і коефіцієнту теплопередачі K визначається величиною $\Delta t_{\text{кор}}$. Поверхня нагрівання всієї випарної установки при даних теплових навантаженнях корпусів залежить від розподілення $\Delta t_{\text{кор}}$ між корпусами. В основі розподілення $\Delta t_{\text{кор}}$ лежать економічні міркування.

Розподілення $\Sigma \Delta t_{\text{кор}}$ за умови рівності поверхонь нагрівання корпусів

Такий принцип розподілення $\Sigma \Delta t_{\text{кор}}$ по корпусам дозволяє використовувати однакові по розмірам апарати установки і забезпечити їх взаємозамінність

$$\Delta t_1 = \frac{Q_1}{K_1} \cdot \frac{1}{F_1}; \quad \Delta t_2 = \frac{Q_2}{K_2} \cdot \frac{1}{F_2}, \dots, \Delta t_n = \frac{Q_n}{K_n} \cdot \frac{1}{F_n}; \quad (24)$$

Знаходимо

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta t_{\text{кор}} &= \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n = \frac{1}{F} \left(\frac{Q_1}{K_1} + \frac{Q_2}{K_2} + \dots + \frac{Q_n}{K_n} \right) \\ \Sigma \Delta t_{\text{кор}} &= \frac{1}{F} \Sigma \frac{Q}{K} \Rightarrow \frac{1}{F} = \frac{\Sigma \Delta t_{\text{кор}}}{\Sigma \frac{Q}{K}}; \end{aligned} \quad (25)$$

Підставимо (25) в(24) і отримаємо

$$\Delta t_1 = \frac{Q_1}{K_1} \cdot \frac{\Sigma \Delta t_{\text{кор}}}{\Sigma \frac{Q}{K}}; \quad \Delta t_n = \frac{Q_n}{K_n} \cdot \frac{\Sigma \Delta t_{\text{кор}}}{\Sigma \frac{Q}{K}}$$

Розподілення $\Sigma \Delta t_{\text{кор}}$ за умови мінімальної сумарної поверхні нагрівання корпусів

Приводимо цей розрахунок для двохкорпусної установки. Загальна поверхня нагрівання

$$F = F_1 + F_2 = \frac{Q_1}{K_1 \Delta t_1} + \frac{Q_2}{K_2 \Delta t_2}$$

Враховуючи

$$\Sigma \Delta t_{\text{кор}} = \Delta t_1 + \Delta t_2 \Rightarrow \Delta t_2 = \Sigma \Delta t_{\text{кор}} - \Delta t_1$$

Тоді
$$F = \frac{Q_1}{K_1 \Delta t_1} + \frac{Q_2}{K_2 (\Sigma \Delta t_{\text{кор}} - \Delta t_1)}$$

Мінімум функції отримаємо коли
$$\frac{dF}{d(\Delta t_1)} = 0$$

$$\frac{dF}{d(\Delta t_1)} = -\frac{Q_1}{K_1 \Delta t_1^2} + \frac{Q_2}{K_2 (\Sigma \Delta t_{\text{кор}} - \Delta t_1)^2} = -\frac{Q_1}{K_1 \Delta t_1^2} + \frac{Q_2}{K_2 \Delta t_2^2} = 0$$

Звідки
$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \sqrt{\frac{Q_1 K_2}{Q_2 K_1}} = \frac{\sqrt{Q_1}}{\sqrt{Q_2}} \frac{\sqrt{K_1}}{\sqrt{K_2}}$$

Згідно з властивостями пропорції

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 + \Delta t_2} = \frac{\Delta t_1}{\Sigma \Delta t_{\text{кор}}} = \frac{\sqrt{\frac{Q_1}{K_1}}}{\sqrt{\frac{Q_1}{K_1}} + \sqrt{\frac{Q_2}{K_2}}} = \frac{\sqrt{Q_1}}{\Sigma \sqrt{Q}}$$

Отримаємо
$$\Delta t_1 = \frac{\Sigma \Delta t_{\text{кор}} \sqrt{Q_1 / K_1}}{\Sigma \sqrt{Q / K}} \quad \Delta t_2 = \frac{\Sigma \Delta t_{\text{кор}} \sqrt{Q_2 / K_2}}{\Sigma \sqrt{Q / K}};$$

Використовуючи цей принцип. Отримаємо неоднакові поверхні нагрівання корпусів, що здорожує виготовлення та експлуатування установки.

Вибір числа корпусів

Зі збільшенням числа корпусів багатокорпусної випарної установки знижуються витрати гріючої пари на кожний кілограм випарюваної води. Витрати гріючої пари на випарювання 1кг води в багатокорпусній установці приблизно обернено пропорційно числу корпусів (I – 1кг/кг, II – 1/2 кг/кг, III – 1/3 кг/кг).

В дійсності витрати гріючої пари на 1кг випареної води рівні.

Число корпусів	1	2	3	4	5
Витрати гріючої пари	1,1	0,57	0,4	0,3	0,27
Процент економії пари	50	30	25	10	

Границею числа корпусів випарної установки, являється збільшення температурних витрат зі збільшенням числа корпусів. Корисна різниця температур, це – різниця між температурами гріючої пари і киплячим розчином, рівна 5...7 °С для апаратів з природною циркуляцією і не менше 3° С для апаратів з примусовою циркуляцією.

Приклад: $T_1 = 160 \text{ }^\circ\text{C}$, $T'_{\text{конд}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

I
$$\Delta t_{\text{кор}} = T_1 - T'_{\text{конд}} - \Delta = 160 - 60 - 25 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$$

II
$$\Sigma \Delta t_{\text{кор}} = T_1 - T'_{\text{конд}} - \Sigma \Delta = 160 - 60 - 2 \cdot 25 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{кор}} = \frac{\Sigma \Delta t_{\text{кор}}}{2} = \frac{50}{2} = 25^{\circ}\text{C}$$

$$\text{III} \quad \Sigma \Delta t_{\text{кор}} = T_1 - T'_{\text{конд}} - \Sigma \Delta = 160 - 60 - 3 \cdot 25 = 25^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{кор}} = \frac{\Sigma \Delta t_{\text{кор}}}{3} = \frac{25}{3} = 8,3^{\circ}\text{C}$$

$$\text{IV} \quad \Sigma \Delta t_{\text{кор}} = 160 - 60 - 4 \cdot 25 = 0^{\circ}\text{C} \quad \Delta t_{\text{кор}} = \frac{0}{4} = 0$$

Межа можливої кількості корпусів рівна трьом.

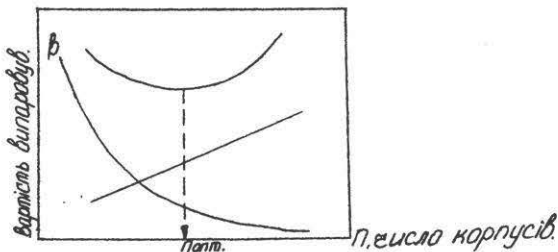


Рис. 39. Оптимальне число корпусів багатокорпусної випарної установки

Тема 8

КОНСТРУКЦІЯ ВИПАРНИХ АПАРАТІВ

Конструкції випарних апаратів можна класифікувати:

1. По типу поверхні нагрівання: парові оболонки, зміювки, трубчатки різних видів.
2. По розміщенню поверхні нагрівання у просторі: апарати з вертикальними, горизонтальними і нахиленими нагрівальними камерами.
3. По роду теплоносія: водяний пар, високотемпературні теплоносії, електричний струм.
4. По інтенсивності циркуляції розчину: природного (неорганізованого) та примусової циркуляцією розчину; прямотічний, у яких випарювання розчину відбувається за один його прохід через апарат без циркуляції та апарати з багатократною циркуляцією розчину.
5. По організації процесу: періодичні та безперервно діючі випарні апарати.

Апарати з природною (вільною) циркуляцією розчину

У випарних апаратах з оболонками відбувається малоінтенсивна неупорядкована циркуляція випарюваного розчину під дією різниці густин

нагрітих і менше нагрітих частинок. Випарні апарати з оболонками використовуються в невеликих виробництвах при випаровуванні сильноагресивних і в'язких розчинів, виділяюмих твердих осадків, розчинів у яких поверхня нагрівання захищена від корозії і легко очищується. Для її очищення використовується якірні мішалки і ін.

Значно більшою поверхнею нагрівання в одиниці об'єму володіють змійовикові випарні апарати.

Змійовики 2 виконані із окремих секцій, так як у довгих змійовиків, внаслідок накопичення конденсату поверхня нагрівання погано використовується. При секціонуванні змійовиків можливо послідовне відключення окремих секцій по мірі зниження рівня розчину в періодично діючому апараті.

Очищення та ремонт змійовикових апаратів затруднено. В таких апаратах випарюється невелика кількість хімічно агресивних речовин.

Випарні апарати з горизонтальною трубчатого нагрівальною камерою і вертикальним циліндричним корпусом

Верхня частина апарату служить сепаратором 3. Розвиток конструкцій випарних апаратів направлений на підвищення природної циркуляції розчину. Це досягається таким шляхом:

1) збільшення висоти кип'ятильних труб і підвищення інтенсивності пароутворення у них, з метою зменшення густини паро-рідинної суміші, утвореної із киплячого розчину.

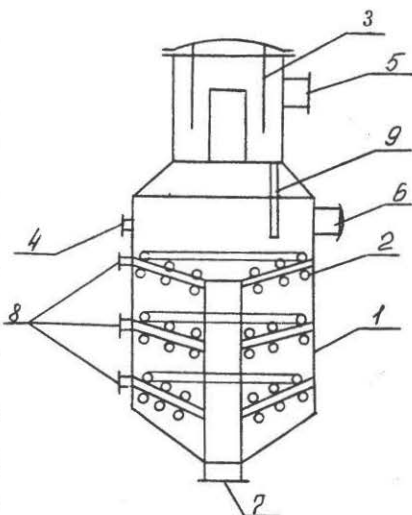


Рис. 40. Змійовиковий випарний апарат
1- корпус; 2- парові змійовики; 3- бризкоуловлювач; 4- патрубок для подачі розчину; 5- патрубок для відведення вторинної пари; 6- лаз; 7 - патрубок для відведення упареного розчину; 8- патрубки для підведення пари; 9- труба для стікання уловлюємих бризок.

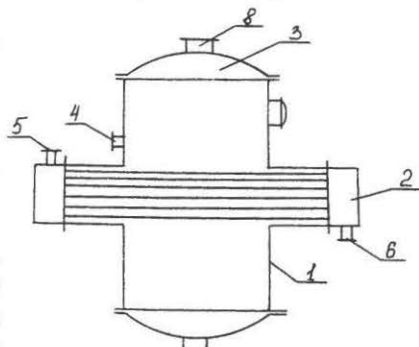


Рис. 41. Випарний апарат з горизонтальною камерою

1- корпус; 2- нагрівальна камера; 3- сепаратор; 4- патрубок для подачі розчину; 5,6- патрубки для подачі пари і відведення конденсату 7- патрубок відведення упареного розчину.

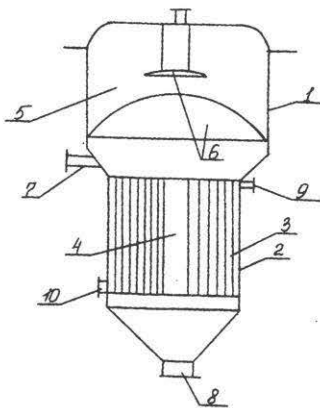


Рис. 42. Випарний апарат центральною циркуляційною трубою

1- корпус; 2- нагрівальна камера; 3- кипятильні труби; 4- циркуляційна труба; 5- сепараційний простір; 6- бризкоуловлювач; 7- патрубок для подачі початкового розчину; 8- патрубок для відведення упареного розчину; 9, 10- патрубок для підведення пари і відведення конденсату

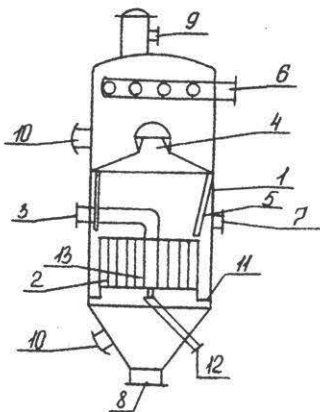


Рис. 43. Випарний апарат підвищеною нагрівальною камерою

1- корпус; 2- нагрівальна камера; 3- патрубок підведення пари; 4-бризкоуловлювач; 5- труби для заливання рідини бризок; 6- патрубок для подачі води в микочу перфоровану трубу; 7, 8- патрубки для подачі і відведення розчину; 9- патрубок відведення вторинної пари; 10- лази; 11- кріплення нижньої трубною решітки; 12- патрубок відведення конденсату; 13- центральна циркуляційна труба

2) покращання природного охолодження циркуляційної труби для того щоб, опускаюча по ній рідина мала більшу густину.

3) підтримування в опускній трубі визначеного рівня рідини, необхідного для урівноваження стовпа парорідиної суміші в підймальних трубах при заданій швидкості її руху.

Апарати з внутрішньою та центральною циркуляційною трубою

Нагрівальна камера 2 складається із кипятильних труб 3 довжиною 3-4 м і циркуляційної труби 4, яка встановлена по осі камери. Розчин поступає по патрубку 7 над верхньою трубною решіткою. Циркуляція розчину в апараті відбувається за рахунок різниці густини розчину в циркуляційній трубі та парорідинної суміші у кип'ятільних трубах. Циркуляція розчину покращує теплопередачу і перешкоджує утворенню накипі на поверхні теплообміну. Недолік цих апаратів - жорстке кріплення кип'ятільних труб, яка допускає подовження труб при нагріванні.

Випарний апарат з підвищеною нагрівальною камерою

Циркуляції розчину відбувається не тільки по циркуляційній трубі 13, але й по кільцевому каналу, утвореного стінками обичайки підвищеної нагрівальної камери 2 і стінками корпусу апарата 1. Нагрівальна камера 2 легко демонтується. Інтенсивність циркуляції в апаратах з підвищеними нагрівальними камерами і центральною циркуляційною трубою недостатня для випарювання високов'язких, кристалізуючих розчинів.

Випарні апарати з виносними циркуляційними трубами

Розчин, що опускається по циркуляційній трубі охолоджується. При цьому збільшується природна циркуляція, яка призводить до збільшення інтенсивності теплопередачі.

Випарні апарати з виносною нагрівальною камерою

Вони дозволяють підвищити інтенсивність випарювання за рахунок збільшення різниці між густиною рідини і паро-рідинної суміші в циркуляційному контурі і за рахунок збільшення дожини кип'ятильних труб. Довжина кип'ятильних труб досягають 7 м.

Вторинна пара тангенціально входить в бризкоуловлювач 4 і відводиться по патрубку 10.

Швидкість циркуляції в нагрівальній камері розчину досягає 1,5 м/с що дозволяє випарювати концентровані і кристалізуючі розчини. Такі апарати знайшли найбільше поширення в промисловості.

Випарний апарат

з винесеною зоною кипіння

Нагрівальна камера 1 оснащена трубами довжиною 4...7м. Розчин в трубах 1 перегрівается і кипить в трубі 2. Пароутворення відбувається за межами поверхні нагрівання. Упарений розчин відводиться в нижній частині сепаратора 3 через патрубок 7. Перепад температури між гріючою парою і киплячого розчину складає $\sim 30^{\circ}\text{C}$ і швидкість циркуляції досягають значних величин. Коефіцієнт теплопередачі дося-

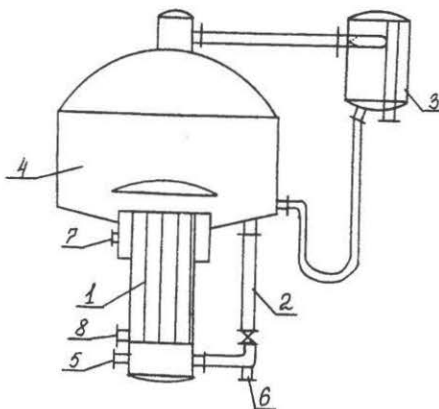


Рис. 44. Випарний апарат з виносними циркуляційними трубами

1- нагрівальна камера; 2- циркуляційна труба; 3- центральний бризкоуловлювач; 4- сепаратійний простір; 5,6- патрубки подачі початкового розчину і відведення упареного розчину; 7,8- патрубок підведення пари і відведення конденсату

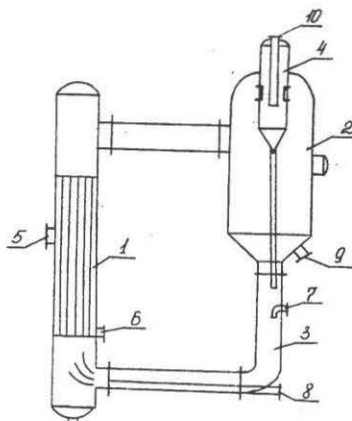


Рис. 45. Випарний апарат з виносною нагрівальною камерою

1- нагрівальна камера; 2- сепаратор; 3- циркуляційна труба; 4- бризкоуловлювач; 5,6 - патрубки для підведення пари і відведення конденсату; 7- патрубки для подачі початкового розчину; 8- патрубок для відведення упареного розчину; 9-патрубок відведення упареної рідини; 10- патрубок відведення вторинної пари

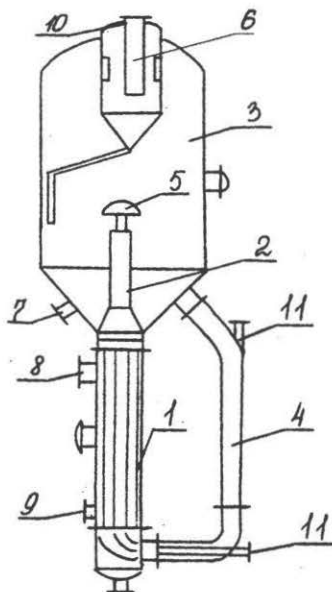


Рис. 46. Випарний апарат з винесеною зоною кипіння

1- нагрівальна камера; 2- труба кипіння; 3- Сепаратор; 4- необігриваєма циркуляційна труба; 5- відбійник; 6- бризкоуловлювач; 7- патрубок для відведення упареного розчину; 8,9- патрубки для подачі пари і відведення упареного розчину; 10- патрубок відведення вторинної пари; 11- патрубок подачі початкового розчину

рування високо в'язких розчинів. Перевагою даних апаратів є: короткочасний контакт розчину з поверхнею нагрівання та велике значення коефіцієнта теплопередачі.

Випарні апарати з підіймаючою плівкою

Діаметр труб нагрівальної камери 1 складають 15-25 мм і довжина 4-9м. На рівні 20-25% висоти труб відбувається інтенсивне кипіння. Парорідинна суміш переміщується у вигляді плівки яка підіймається по внутрішній поверхні труб. Температура випарювання складає 60-90 °С. В плівкових апаратах важко забезпечити рівномірну товщину плівки випарюємої рідини і вони чутливі до коливань навантажування по розчину і затруднене очищення труб малого діаметра утруднена. Коефіцієнт теплопередачі сягає $K=1700 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, а термін випарювання $\tau=4-6 \text{ хв}$.

гає 3000 Вт/(м²К). Апарати з винесеною зоною кипіння використовуються для випарювання кристалізуючих розчинів незначної в'язкості.

Прямотічні плівкові апарати мають відмінну властивість від розглянутих апаратів з природною циркуляцією ту, що випарювання у них відбувається при однократному проходженні випарюваного розчину по трубах нагрівальної камери. Випарювання відбувається без циркуляції розчину. Розчин випарюється при переміщенні у вигляді тонкої плівки по внутрішній поверхні труб. Прямотічні апарати поділяються на апарати з підіймаючою і опускаючою плівкою.

Випарний апарат з опускаючою плівкою

Плівкові апарати з підіймаючою плівкою використовуються для випарювання термолабільних і пінючих розчинів. Довжина труб нагрівальної камери 6-7м.

Випарні апарати з опускаючою плівкою використовуються для упа-

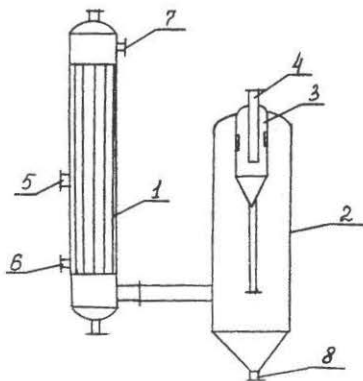


Рис. 47. Випарний апарат з падаючою плівкою

1- нагрівальна камера; 2- сепаратор; 3- бризкоуловлювач; 4- патрубок відведення вторинної пари; 5, 6- патрубок підведення пари і відведення конденсату; 7- патрубок підведення упареного розчину; 8- патрубок відведення концентрованого розчину

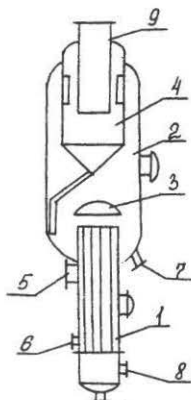


Рис. 48. Випарний апарат з піднімаючою плівкою

1- нагрівальна камера; 2- сепаратор; 3- відбійник; 4- бризкоуловлювач; 5, 6- патрубки для підведення грюючої пари і відведення конденсату; 7- патрубок підведення упареного розчину; 8- патрубок підведення початкового розчину; 9- патрубок відведення вторинної пари

Роторні прямотічні випарні апарати

Роторні прямотічні випарні апарати призначені для випарювання нестійких до підвищених температур в'язких і пастоподібних розчинів. Випарюємий розчин поступає зверху апарата, захоплюється обертаючими скребками 4 і під дією відцентрових сил відкидається на стінки апарата 1 і переміщується по внутрішній поверхні у вигляді турбулентно рухомої плівки. На стінках утворюється тонкий шар порошка або пасти, яка знімається обертаючими скребками. Зазор між стінкою та скребком складає 1мм. Кругова швидкість кінця скребка $v=3м/с$. Обертаюча лопасть 9 призначена для розподілення поступаючого розчину у вигляді стікаючої плівки. Час знаходження розчину в зоні випарювання 5-25с.

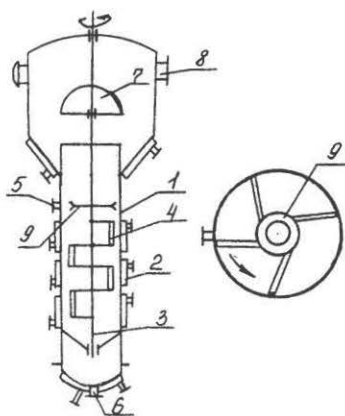


Рис. 49. Роторний прямотічний випарний апарат

1- корпус; 2- парова оболонка; 3- ротор; 4- скребки; 5- патрубок подачі початкового розчину; 6- патрубок відведення упареного розчину; 7- відбійник; 8- патрубок відведення вторинної пари; 9- обертаюча лопасть

Випарні апарати з примусовою циркуляцією

Використовується при випарюванні кристалізуючих розчинів.

Швидкість циркуляції розчину у цих апаратах залежить від продуктивності циркуляційного насосу 4 і не залежить від рівня рідини в трубах, а також від інтенсивності пароутворення. Корисна різниця температур не перевищує 3-5 °С і не залежить від в'язкості розчину. Зона кипіння розчину переміщується у саму верхню частину нагрівальної камери 1. Для перекачування випарюваного розчину використовуються пропелерні насоси. Швидкість руху розчину по нагрівальній камері 2,5-3,0 м/с. Недоліком таких апаратів є значні витрати енергії на привід циркуляційного насосу.

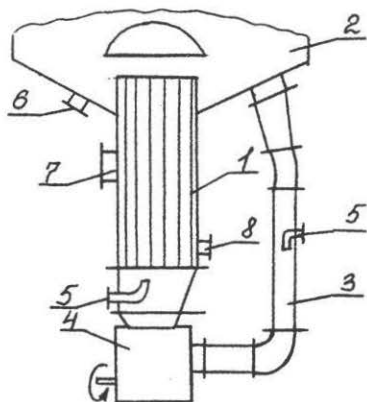


Рис. 50. Випарний апарат з примусовою циркуляцією

1- нагрівальна камера; 2- сепаратор; 3- циркуляційна труба; 4- циркуляційний насос; 5- патрубки для подачі початкового розчину; 6- патрубок для відведення упареного розчину; 7,8- патрубки для подачі гріючої пари і відведення конденсату

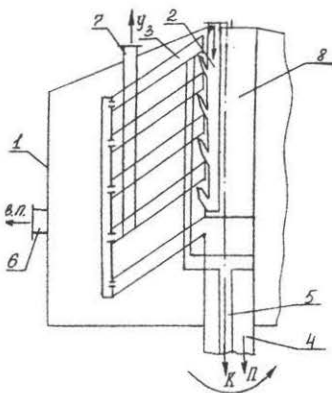


Рис. 51. Відцентровий плівковий вакуум випарний апарат

1- корпус апарату; 2- розподільна нерухома труба подачі розчину; 3- робочі корпуси; 4,5- патрубки для подачі гріючої пари і відведення конденсату; 6- патрубок відведення упареного розчину; 7- патрубок відведення конденсату; 8- центральний стояк

Відцентровий плівковий вакуум випарний апарат

Розчин подається в апарат через нерухому розподільну трубу 2. На кінцях розподільної труби встановлені сопла, які розподіляють розчин під нижньою поверхнею робочого корпусу 3, а відцентрова сила миттєво розподіляє розчин по всій поверхні нагрівання у вигляді плівки товщиною 0,1мм. Час перебування розчину на поверхні нагрівання 1с. Вторинна пара вилучається із випарного апарату через центральний стояк 8 і патрубок 6. Згущений розчин збирається на перефирії робочих корпусів 2, які з'єднані вертикальними отворами, підіймається наверх і відводиться через патрубок 7, при допомозі вакууму.

Гріюча пара подається через порожнинний трубний вал 4 і поступає у внутрішню порожнину робочого корпуса 3, підігріває рухома по іншій стороні корпуса упарену рідину і конденсується. Відцентровою силою конденсат відкидається до верхньої внутрішньої стінки корпуса 3, і вилучається по нерухомій трубі 5.

Температура випаровування становить 50 °С. При площі нагрівання 15м², продуктивність вакуум випарного апарата становить 5 м³/год. Потужність привідного електродвигуна 27кВт. Максимальна концентрація сухих речовин в упареному розчині 85 %. Коефіцієнт теплопередачі складає до 10к Вт/(м²·К). Відцентрові плівкові вакуум випарні установки використовуються для концентрування амінокислот, антибіотиків, ферментів та вітамінів.

Шляхи економії витрат пари для випаровування. Використання вторинної пари можливо не тільки в багатокорпусній випарній установці, але й в однокорпусному апараті з термокомпресором або термоінжектором, у яких утворений вторинний пар стискається до тиску робочої пари і використовується у тому ж апараті.

Випарна установка з термокомпресором

У даній установці витрати на випаровування пов'язані тільки із енергетичними витратами на приведення в рух термокомпресора.

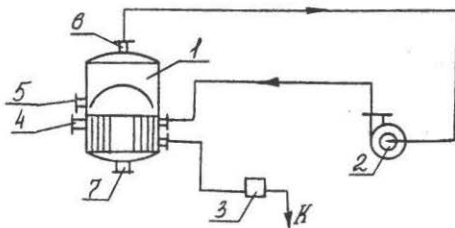


Рис. 52. Схема випарної установки з термокомпресором

1- однокорпусний випарний апарат; 2- термокомпресор; 3- конденсатопідвідник; 4- патрубок для подачі гріючої пари при пуску установки; 5- патрубок подачі початкового розчину; 6- патрубок відведення вторинної пари; 7- патрубок відведення упареного розчину

Випарна установка з пароінжекцією

Робоча пара поступає в інжектор 2 під тиском 0,6...1,0МПа термокомпресія пари виправдується коли термопара вторинної пари підвищується на 10-15°С. Термокомпресія пари доцільно використовувати при упарюванні розчинів з невисокою температурною депресією.

Вибір типу випарних апаратів

При виборі типу випарного апарата необхідно керуватися.

1. Апарат повинен задовольняти технологічні умови випаровування даного конкретного продукту.

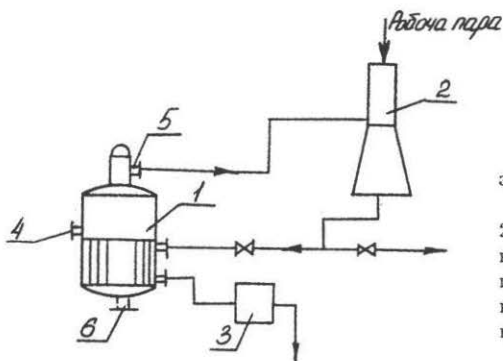


Рис. 53. Схема випарної установки з паровікцією

1- однокорпусний випарний апарат; 2 - термоінжектор; 3- конденсатівідвідник; 4- патрубок подачі початкового розчину; 5- патрубок відведення вторинної пари; 6- патрубок відведення упареного розчину

2. Апарат повинен бути простим по будові, компактним і надійним в роботі, зручним при монтажі, ремонтні та експлуатації, зручним при очищенні.

3. Поверхня нагрівання апарата повинна мати високі масові навантажування та високі коефіцієнти теплопередачі, апарат повинен мати надійний відвід конденсату і несконденсованих газів, хорошу паросепарацію, можливо меншу масу і вартість.

Тема 9

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ КОНЦЕНТРУВАННЯ БІОЛОГІЧНО АКТИВНИХ РЕЧОВИН

Концентрування цільового продукту біосинтезу в перерахунку на вміст сухих речовин в культуральній рідині складає 2...10%.

Для концентрування розчинів, які містять 15...40% біологічно активних речовин, використовуються процеси випарювання, фільтрування, кристалізації, ультрафільтрації, флотажі тощо. Продукти мікробного синтезу мають високу термолабільність. Ферменти при температурі випарювані рівній 45 °С на протязі 2 год інактивуються на 20 %, а при температурі 55 °С на протязі 4...5год їх активність втрачається повністю. При концентруванні розчину лізину при температурі більше 60 °С лізин вступає в хімічну реакцію з моноцукрами і його активність втрачається.

Максимальна температура концентрування ферментів повинна бути 30...35°С, кормових дріжджів та біомас других мікроорганізмів - 70...80°С, вітамінів і антибіотиків- 50...55°С. Тому для концентрування продуктів мікробного синтезу необхідно використовувати технологічне обладнання, у якому забезпечується проведення процесу при низьких температурах та найменшому часу перебування продукту в апараті.

Вакуум-випарна установка з примусовою циркуляцією періодичної дії

Культуральна рідина безперервно циркулює по замкненому кільцю, підігрівник - випарний апарат - сепаратор - нижня циркуляційна труба - циркуляційний насос - підігрівник. Вторинна пара поступає в бризкоуловлювач 3 де від неї відокремлюється краплини рідини які повертаються в нижню частину випарного апарату. Пара після бризкоуловлювача поступає в перший водяний теплообмінник 4, конденсується і частково відводиться в приймальник 10. Несконденсовано у теплообміннику 4 водяна пара поступає на другий розсолний теплообмінник 5 і у вигляді конденсату збирається в приймальнику 6. Культуральна рідина безперервно по патрубку 12 поступає в підігрівник 1 і після концентрування до заданого рівня, нагрівання і випарювання закінчується, тиск вирівнюється і концентрат у вигляді сиропу вивантажується через штуцер 12.

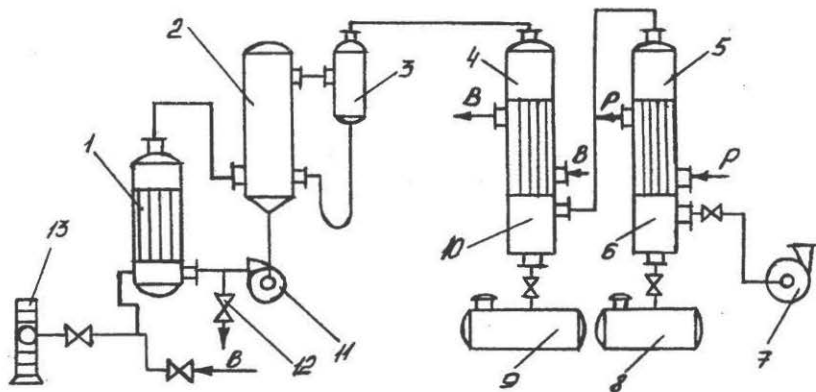


Рис. 54. Схема вакуум випарної установки з примусовою циркуляцією періодичної дії
1- підігрівник; 2- варочний апарат; 3- бризкоуловлювач; 4, 5- теплообмінники з водяним і розсолним охолодженням; 6, 10- приймальники конденсату; 8, 9- збірники конденсату; 7- сухоповітряного вакуум-насоса, працюючого в системі концентрування витяжок; 11- циркуляційний насос; 12- штуцер для завантажування і розвантажування розчину і концентрованої рідини; 13- мокроповітряного вакуум-насоса, працюючого в системі вилучення пара із нагрівальної системи

Розрахунок багатокорпусних випарних апаратів

Тепловий розрахунок багатокорпусної випарної установки при її проектуванні зводиться до визначення поверхні нагрівання корпусів при заданих умовах роботи апаратів. По зрівнянню з однокорпусною випарною установкою, особливість розрахунку багатокорпусної установки полягає в тому, що загальну корисну різницю температур не-

обхідно раціонально розподілити між корпусами і знайти кількість випареної води і витрати гріючої пари для кожного корпусу.

Задаються слідуючі величини.

G_n - витратити початкового розчину, $b_n b_k$ - концентрації розчину, t_0 - температура початкового розчину, T_1 - температура гріючої пари, $T_{\text{конд}}$ - температура вторинної пари в конденсаторі, E_1, E_2 -кількість відібраної екстра-пари.

Визначаються величини: W, W_i - загальна кількість випареної вологи і її розподілення по корпусам, D_1 - витрати свіжої пари, $F_1 \dots F_n$ - поверхні нагрівання.

Шукані величини отримують шляхом вирішення система рівнянь: матеріального балансу, теплового балансу і теплопередач.

Розрахунок проводиться методом послідовних наближень.

Наближений розрахунок

Кількість випареної води по корпусам

$$\begin{aligned} W_1 &= D_1 \\ W_2 &= D_1 - E_1 \\ W_3 &= D_1 - E_1 - E_2 \\ W_n &= D_1 - E_1 - \dots - E_{n-1} \end{aligned} \quad (1)$$

Загальна кількість випареної води

$$W = W_1 - W_2 + \dots + W_n = nD_1 - (n-1)E_1 - (n-2)E_2 - \dots - E_{n-1} \quad (2)$$

Витрати гріючої пари

$$D_1 = W_1 + \frac{W}{n} + \frac{n-1}{n} E_1 + \frac{n-2}{n} E_2 + \dots + \frac{1}{n} E_{n-1} \quad (3)$$

Для підвищення економічності випарної установки необхідно відбирати екстра-пару і бажано із останніх корпусів випарної установки. Підставимо (3) в рівняння (2) і для W_n .

$$W_n = \frac{W}{n} - \frac{1}{n} E_1 - \frac{2}{n} E_2 - \dots - \frac{n-2}{n} E_{n-2} - \frac{n-1}{n} E_{n-1} \quad (4)$$

Наближений метод розрахунку обумовлений тим, що не враховуємо тепло самовипарювання розчину, яке являється значним для останнього корпусу вакуум-випарної установки.

Точний метод розрахунку (метод І. А. Тищенка)

Рівняння теплового балансу для n-го корпусу у загальному вигляді можна записати.

$$Q_n = D_n(I_{r,n} - c'_n \Theta_n) = (G_n c_0 - W_1 - W_2 - \dots - W_{n-1})c_n(t_{\text{кн}} - t_{\text{к}(n-1)}) + W_n(I_n - c''_n t_{\text{кн}}). \quad (5)$$

Розв'язуємо рівняння (5) відносно W_n , отримуємо.

$$\begin{aligned} W_n &= D_n \frac{(I_{r,n} - c'_n \Theta_n)}{I_n - c''_n t_{\text{кн}}} + (G_n c_0 - W_1 - \dots - W_{n-1}) \frac{c_n(t_{\text{кн}} - t_{\text{к}(n-1)})}{I_n - c''_n t_{\text{кн}}} = \\ &= D_n \alpha_n + (G_n c_0 - W_1 - \dots - W_{n-1}) \beta, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{I_{r,n} - c'_n \Theta}{I_n - c'' t_{\kappa n}} \quad - \text{коефіцієнт випарювання};$$

$$\beta = \frac{c_n (t_{\kappa,n} - t_{\kappa(n-1)})}{I_n - c'' t_{\kappa,n}} \quad - \text{коефіцієнт самовипарювання}.$$

Для n- корпусу

$$W_n = D_{n+1} + E_n \Rightarrow D_{n+1} = W_n - E_n \quad (7)$$

W_n - беремо із (6)

$$D_{n+1} = D_n \alpha_n + (G_n c_0 - W_1 - \dots - W_{n-1}) \beta - E_n.$$

Для визначення витрат пари, використовуємо рівняння (6)

$$W_1 = D_1 \alpha + G_n c_0 \beta$$

$$W_2 = D_2 \alpha_2 + (G_n c_0 - W_1) \beta_2$$

...

$$W_n = D_n \alpha_n + (G_n c_0 - W_1 - \dots - W_{n-1}) \beta_n \quad (8)$$

Із (7) отримаємо

$$D_2 = W_1 - E_1; \quad D_3 = W_2 - E_2; \quad D_n = W_{n-1} - E_{n-1} \quad (9)$$

Можна прийняти, що $\alpha=1$, а добуток двох, або більшої кількості коефіцієнтів самовипарювання рівні нулю. Формула для витрат греючої пари.

$$D_1 = \frac{W - G_n c_0 y + E_1 k_1 + \dots + E_{n-1} k_{n-1}}{x}$$

$$\text{де } y = n\beta_1 + (n-1)\beta_2 + (n-2)\beta_3 + \dots + \beta_n,$$

$$x = n - (n)\beta_2 - 2(n-2)\beta_3 - 3(n-3)\beta_4 - \dots - (n-1)\beta_n$$

k_1 - коефіцієнт при екстра-пари

Число корпусів

Коефіцієнти при екстра-пари

	2	3	4
k_1	1	$2 - b_3$	$3 - b_3 - b_4$
k_2	-	1	$2 - b_4$
k_3	-	-	1

Схема розрахунку багатокорпусної випарної установки

Тепловий розрахунок багатокорпусної випарної установки проводять в такій послідовності.

1) Обраховується загальна кількість випарюваної води.

$$W = G_n \left(1 - \frac{b_n}{b_\kappa} \right)$$

Розподіляючи попередньо її порівню між корпусами.

2) Обраховують концентрації розчину по корпусам

$$b_1 = \frac{G_n b_n}{G_n - W_1}, \quad b_2 = \frac{G_n b_n}{G_n - W_1 - W_2}, \quad b_3 = \frac{G_n b_n}{G_n - W_1 - W_2 - W_3}$$

3) Перепад тиску ΔP який рівний різниці між тиском гріючої пари та тиском в конденсаторі. ΔP розподіляється порівню між корпусами.

4) По тиску вторинної пари в конденсаторі і прийняв перепад тисків у корпусах знаходимо тиск вторинної пари $P_{вт}$ по корпусах:

$$P_{вт1} = P_1 - \Delta P_{кор}$$

$$P_{вт2} = P_{вт1} - \Delta P_{кор}$$

$$P_{вт3} \approx P_K$$

По таблиці насиченої водяної пари визначаємо температури вторинної пари по корпусах.

5) Знаходимо температурні втрати по корпусах від температурної гідростатичної депресії і гідравлічних втрат в трубопроводах вторинної пари між корпусами.

6) Визначаємо загальну корисну різницю температур

$$\Sigma \Delta t_{кор} = T_1 - T'_{конд} - \Sigma \Delta$$

і розподіляємо її по корпусах. В попередньому розрахунку приймаємо, що теплові навантаження рівні $Q_1 = Q_2 = Q_3$. Задаємося орієнтовними значеннями коефіцієнтами теплопередачі K_1, K_2, K_3 . $\Sigma \Delta t_{кор}$ розподіляємо із рівності поверхні нагріву корпусів.

$$\Delta t_1 = \frac{\frac{Q_1}{K_1} \Sigma \Delta t_{кор}}{\Sigma \frac{Q}{K}}; \quad \Delta t_2 = \frac{\frac{Q_2}{K_2} \Sigma \Delta t_{кор}}{\Sigma \frac{Q}{K}}; \quad \Delta t_3 = \frac{\frac{Q_3}{K_3} \Sigma \Delta t_{кор}}{\Sigma \frac{Q}{K}};$$

7) Після розподілення $\Sigma \Delta t_{кор}$ по корпусах знаходимо: температуру гріючої пари, температуру кипіння розчину і температуру вторинної пари.

Температура
гріючої пари T ,

$$T_1$$

$$T_2 = T'_1 - \Delta'''_{1-2}$$

$$T_3 = T'_1 - \Delta'''_{2-3}$$

розчину t ,

$$t_{к1} = T_1 - \Delta t_{кор1}$$

$$t_{к2} = T_2 - \Delta t_{кор2}$$

$$t_{к3} = T_3 - \Delta t_{кор3}$$

вторинної пари T'

$$T'_1 = t_{к1} - (\Delta'_1 + \Delta''_1)$$

$$T'_2 = t_{к2} - (\Delta'_2 + \Delta''_2)$$

$$T'_3 = t_{к3} - (\Delta'_3 + \Delta''_3)$$

$$\text{Конденсатор } t_{конд} = T_3 - \Delta'''_{конд}$$

8) По температурі парів знаходимо ентальпію парів.

9) Задаючи втрати в навколишнє середовище, складаємо рівняння теплового балансу по корпусам і матеріального балансу по воді.

$$Q_n = (W_{n-1} - E_{n-1})(I_{n-1} - c_n' \Theta_n) =$$
$$= (G_n - W_1 - \dots - W_{n-1})c_{n-1}(t_{кн} - t_{кн-1}) + W_n(I_n - c_n'' t_{кн}) + Q_{вт.п}$$
$$W = W_1 + \dots + W_n$$

Знаходимо W_i, D_1

10) По витратам гріючої пари, визначаємо Q_i і при допомозі

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

знаходимо K_i по корпусам.

11) По рівнянню теплопередачі $Q = KF(t_1 - t_2)$ знаходимо F_i

12) Коли величини, якими задавались не співпадають з розрахунками, то отримані W_i приймаємо за початкові і розрахунки повторюємо.

F_i повинні різнитися на 3...5%. Знайдені поверхні нагрівання корпусів округлюємо до нормалізованих значень.

Тема 10

КОНДЕНСАЦІЯ

Конденсація – процес зрідження пари або газу. Конденсація використовується: для створення вакууму у випарних апаратах, використання теплоти конденсації для нагрівання рідин (в теплообмінниках з паровим нагріванням), для розділення систем, компоненти яких мають різну температуру зрідження, в холодильних, сушильних, паротурбінних установках і ін.

Різняться поверхневі конденсатори і конденсатори змішування. Поверхневі конденсатори використовуються у випадку, коли потрібно зберегти конденсат у чистому вигляді. Ці конденсатори представляють собою поверхневі, трубчаті теплообмінники будова яких обумовлений в основному способом охолодження парів. Холодоагентом звичайно являється вода або повітря. Водяне охолодження буває протічним або випарувальним.

До конденсаторів змішування відносяться прямотічні або протитічні змішувальні конденсатори, а також струменеві, ежекторні конденсатори. У цих конденсаторах паровий потік стикається з охолоджуємою

водою і отримуємо конденсат в суміші з цією водою. Конденсатори змішування бувають «мокрі» і «сухі». Із мокрих конденсаторів охолоджуєма вода, конденсат і незконденсовані гази відсмоктуються сумісно мокроповітряним насосом. Із сухих конденсаторів повітря і гази відсмоктуються окремо вакуум-насосом.

Конструктивні схеми поверхневих конденсаторів

Вертикальний кожухотрубний конденсатор

Будова апарату забезпечує чистоту конденсату. Недолік конденсатора великі габаритні розміри і маса.

Конденсатор холодильної установки

Відмінність конденсаторів холодильної установки полягає в тому, що всередині труби більшого діаметру розміщена не одна труба, а декілька (5-7) труб, які знаходяться у трубній решітці, яка приварена до кінців зовнішньої труби і утворює в кожному елементі один хід.

Холодоагент подається зверху в міжтрубний простір, проходить по-спільно через усі елементи і збігає в ресивер. Конденсатори даного типу важкі і громіздкі, але забезпечують надійну роботу при високих тисках.

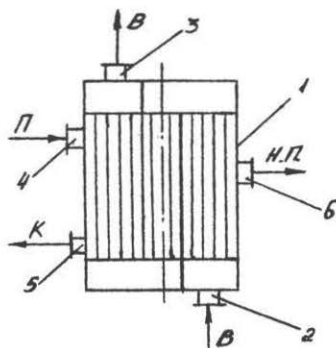


Рис. 55. Схема вертикального кожухотрубного конденсатора

1- корпус; 2,3-патрубки для подачі і відведення охолоджуємої води; 4,5-патрубки для подачі пари і відведення конденсату; 6- патрубок відведення несконденсованих газів

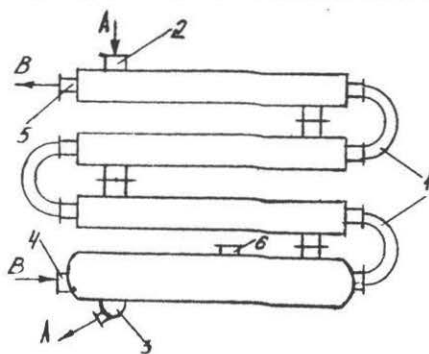


Рис. 56. Схема конденсатора холодильної установки

1- теплообмінник типу труба в трубі; 2- патрубок для подачі парів аміаку; 3- патрубок для відведення зрідженого аміаку; 4,5- патрубки для подачі і відведення води; 6- патрубок відведення несконденсованих парів

Зрошувально-випарювальні конденсатори

Конденсація парів відбувається за рахунок нагрівання та випарювання охолоджуємої води, а також за рахунок нагрівання повітря, що циркулює між трубами. Дані конденсатори мають такі недоліки:

громіздкі, мають багато з'єднань, встановлюються зовні приміщень і їх робота залежить від атмосферних умов.

Конденсація пари в поверхневих конденсаторах – їх розрахунок

Насичені пари сконденсуються при постійній температурі T_k , віддаючи зкриту теплоту випаровування. Конденсат, який виходить із апарата має температуру середню між температурою пари та холодної поверхні T_2 . При проектуванні конденсаторів приймають $T_k = T_2$. Для протитокку (рис. 58. а) умовно розбивають на зону конденсації і зону охолодження. Для кожної зони

$$Q_{\text{конд}} = Dr = Wc(t_2 - t_a) \quad (1)$$

$$Q_{\text{охл}} = Dc_1(T_k - T_2) = Wc(t_a - t_1), \quad (2)$$

де: D – кількість сконденсованих парів, кг/с.

$$\frac{Q_{\text{конд}}}{Q_{\text{охл}}} = \frac{t_2 - t_a}{t_a - t_1} \Rightarrow t_a = \frac{Q_{\text{конд}} t_2 + Q_{\text{охл}} t_1}{Q_{\text{конд}} + Q_{\text{охл}}}, \quad (3)$$

А потім знаходимо:

$$F_{\text{конд}} = \frac{Q_{\text{конд}}}{K_{\text{конд}} \Delta t_{\text{конд}}}, \quad F_{\text{охл}} = \frac{Q_{\text{охл}}}{K_{\text{охл}} \Delta t_{\text{охл}}} \quad (4)$$

Для конденсатора у цілому

$$F = F_{\text{конд}} + F_{\text{охл}} \quad (5)$$

Для перегрітої пари (рис. 58. б) конденсатор поділяється на зони: 1) охолодження перегрітої пари; 2) конденсації; 3) охолодження конденсату.

В зоні охолодження перегрітої пари конденсація пари розпочається коли температура стінки $t_{\text{ст}}$ досягне T_k . При цьому охолоджуєма вода має температуру t_m , а пар T_m .

$$t_{\text{ст}} = T_{\text{конд}} = T_m - \frac{k}{\alpha_{\text{пер}}} (T_m - t_m), \quad (6)$$

де $\alpha_{\text{пер}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від пари до стінки

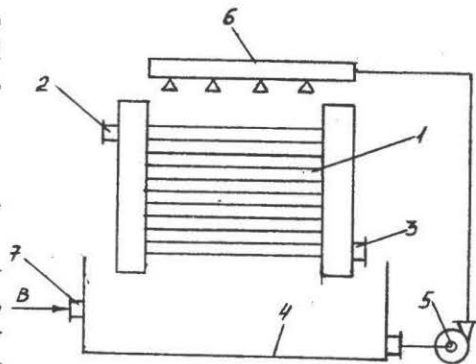
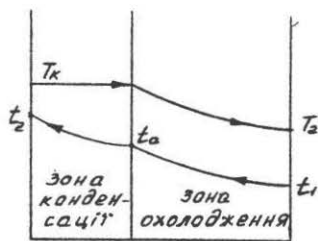
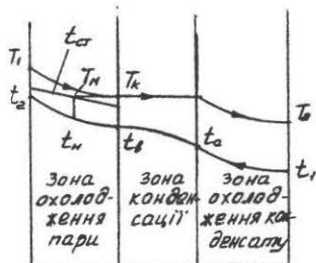


Рис. 57. Схема зрошувально-випарювального конденсатора

1- трубчатий теплообмінник; 2- патрубок для подачі пари; 3-патрубок відведення конденсату; 4- збірник охолоджуємої води; 5- насос; 6- зрошувач; 7- патрубок подачі води



а)



б)

Рис. 58. Графік процесу конденсації пари

а) насиченої пари; б) перегрітої пари

Із теплового балансу

$$\frac{Dc_n(T_1 - T_M)}{Q_{\text{ср}}} = Wc(t_2 - t_m), \quad (7)$$

Для цієї зони

$$F_{\text{пер}} = \frac{Q_{\text{пер}}}{k_{\text{пер}} \Delta t_{\text{пер}}} \quad (8)$$

Для другої зони, у якій пар сконденсується і охолоджується від T_M до T_K

$$Q_{\text{кон}} + Q'_{\text{иср}} = Dr + Dc_n(T_M - T_K) \quad (9)$$

Поверхня нагрівання зони конденсації

$$F_{\text{конд}} = \frac{Q_{\text{кон}} + Q'_{\text{иср}}}{k_{\text{конд}} \Delta t_{\text{конд}}}, \quad (10)$$

Конструктивні схеми конденсаторів змішування

Конденсатори змішування призначені для створення вакууму в установках, які працюють під вакуумом (в вакуум-апаратах, вакуум випарних установках, вакуум-сушарках, вакуум-фільтрах і ін.). Збільшення розрідження досягається за рахунок зниження температури охолодження води і вилучення несконденсованих газів із конденсатора. Загальний тиск в конденсаторі рівний сумі парціального тиску водяної пари і повітря. Повітря відкачується поршневим або водокільцевим насосом із того місця конденсатора, де температура мінімальна, так як при цьому масова продуктивність насоса буде максимальною. Конденсат вилучається із апарату рідинним чи мокроповітряним насосом, а із конденсатора високого рівня (барометричного)-самозаливанням через зливну трубу.

Барометричний конденсатор протитічний

Барометричний конденсатор рекомендовано використовувати для конденсації водяних парів з домішками газу і відсмоктування утворених в випарних установках газів при випарюванні білкових розчинів, органічних кислот (лимонної тощо), амінокислот і ін. Відстань між полицями знизу до верху зменшується, відповідно зменшенню кількості пари. Повітря відсмоктується із верхньої частини апарату через ловушку 2 для відокремлення водяних бризок. Висота барометричної труби залежить від вакууму в апараті, і вона служить гідравлічним затвором.

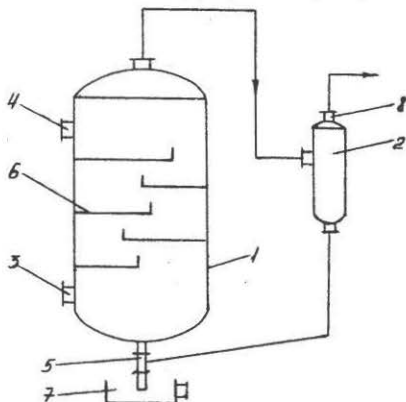


Рис. 59. Барометричний конденсатор протитічний
1- корпус барометричного конденсатора; 2- ловушка; 3- патрубок для подачі пари; 4- патрубок для подачі холодної води; 5- барометрична труба; 6- перфоровані полиці; 7- збірник барометричної води; 8- патрубок відведення несконденсованих газів до вакуум-насоса

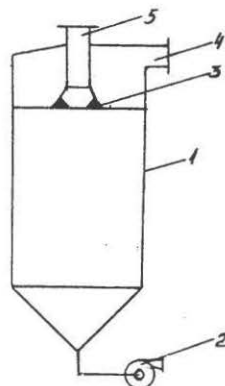


Рис. 60. Мокрий прямиотічний конденсатор змішування
1- корпус конденсатора; 2- водяний насос; 3- розпилювачі води (форсунки); 4- патрубок подачі холодної води; 5- патрубок подачі пари.

Мокрий прямиотічний конденсатор змішування

В змішувальному прямиотічному конденсаторі з паралельним рухом води і пари, вода розбризкується за рахунок вакууму через сопла (форсунки) 3 в паровий потік.

Мокрий протитічний конденсатор змішування

У мокрих конденсаторах змішування водоконденсатна суміш, повітря і несконденсовані гази відводяться при допомозі мокроповітряного насоса 2.

Струменевий прямиотічний конденсатор змішування

Охолоджуєма вода поступає через сопла 4. В дифузорі 6 відбувається конденсація пари і утворюється вакуум, який підсмоктує як воду так і конденсуючий пар.

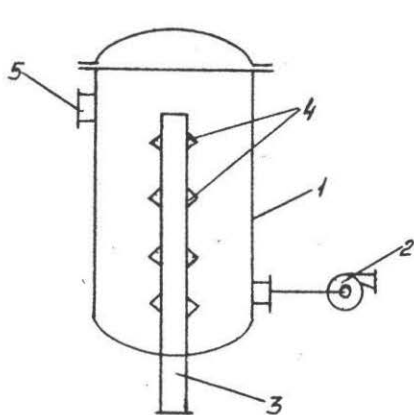


Рис. 61. Мокрий протитічний конденсатор змішування

1- корпус конденсатора; 2- насос; 3- патрубок для подачі холодної води; 4- форсунки (сопла); 5- патрубок подачі пари

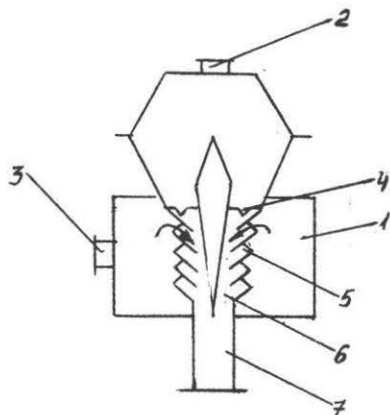


Рис. 62. Струменевий прямиотічний конденсатор змішування

1- корпус конденсатора змішування; 2- патрубок для подачі холодної води; 3- патрубок подачі пари; 4- сопло для води; 5- канали для поступлення пари; 6- дифузор; 7- патрубок для відведення конденсату і холодної води

Робочий процес в каскадних конденсаторах змішування

В конденсаторах змішування відбувається складний процес взаємозв'язаного тепло- і масообміну. Кінцевим результатом якого являється фазове перетворення пара в конденсат і розділення суміші охолоджуємої води та конденсату і неконденсованих газів. Тепло конденсуючого пара передається стікаючій воді частково теплопровідністю, як у твердій стінці, частково конденсацією і частково об'ємно конденсацією у потоці пари, тумана і бризок.

Процес конденсації пара при контакті з холодною водою відбувається дуже інтенсивно, стрибок температур на границі розділення фаз бу-

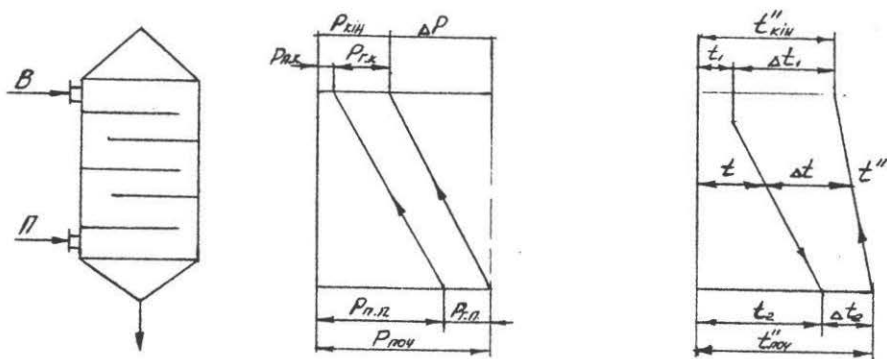


Рис. 63. Схема робочого процесу в каскадних конденсаторах змішування

ває 0,01 °К, а коефіцієнт тепловіддачі від пару до води досягають значень $2 \cdot 10^5$ Вт/м²К, а питомі масові навантажування поверхні конденсації досягає до 1600 кг/м²год.

Методика розрахунку конденсаторів змішування полягає в тому що процес конденсації пара відбувається без домішок газу і зниження тиску по висоті конденсатора при постійному тиску і ізотермічно. Початковий тиск парогазової суміші складає $P_{\text{поч}} = P_{\text{п.н}} + P_{\text{п.г}} + \Delta P$, де $P_{\text{п.н}}$, $P_{\text{п.г}}$ - парціальний тиск початковий пару і газу; ΔP - зменшення тиску за рахунок гідравлічного опору. Загальний тиск по висоті конденсатора зменшується від $P_{\text{поч}}$ до $P_{\text{кін}}$, а парціальні тиски від $P_{\text{п.п}}$ до $P_{\text{п.к}}$ а $P_{\text{г.п}}$ до $P_{\text{г.к}}$.

Відповідно зменшення $P_{\text{п}}$ знижує температуру пара, зменшуючи по висоті конденсатору до верху від $t''_{\text{поч}}$ до $t''_{\text{кін}}$. Температура стічної води і конденсату збільшується від верху, до низу від t_1 до t_2 , при цьому поточне значення дійсного температурного напору $\Delta t = t'' - t$

Основними параметрами, які визначають кінетику теплового процесу в каскадному конденсаторі являються: висота падіння l і товщина струменя δ_0 , температурні напори Δt_1 і Δt_2 , швидкість падіння води ω_0 , швидкість руху пари $\omega_{\text{п}}$ і його густина ρ'' .

Для наближеного розрахунку вважають, що процес являється ізобарним і ізотермічним.

Наближений розрахунок барометричного конденсатора

Тепловий баланс конденсатора

$$D(i - ct_2) = Wc_s(t_2 - t_1), \quad (11)$$

де D - масові витрати пари, кг/с.

Питомі витрати води (кратність охолодження)

$$m = \frac{W}{D} = \frac{i - ct_2}{c_s(t_2 - t_1)}, \quad (12)$$

Величина $m=(15-60)$ кг води/кг пара. Масові витрати води

$$W = mD, \quad (13)$$

Температура барометричної води t_2 повинна бути нижче температури конденсації для протитічних конденсаторів 1-3 °С, а для прямічних 5-6°С.

Об'єм відсмоктуемого повітря із конденсатора визначається

$$V_1 = \beta D \frac{273 - t}{P_1}, \quad (14)$$

де t - температура повітря, яке поступає в насос, $t=25$ °С.

P_1 - тиск відсмоктуемого повітря, Па; β - коефіцієнт, який характеризує вміст газу в парах.

Потужність повітряного насосу при ізотермічному процесі

$$N = \frac{1}{\eta} 2,3P_1V_1 \lg \frac{P_2}{P_1}, \quad (15)$$

де $\eta = 0,4 \dots 0,6$ - ккд насоса. P_1, P_2 - початковий і кінцевий тиск повітря в насосі.

Термін вільного падіння води

$$\tau = \sqrt{\frac{2H}{g}}, \quad (16)$$

де $H=7\text{м}$ - висота конденсатора.

Діаметр конденсатора d_k визначається із швидкості пара $\omega = 35-55\text{м/с}$. $K_{ж.с.} = (30-37)\%$. Число полиць рівня 5-7. Відстань між верхніми полицями $h_{\min} = 0,3d_k$ між нижніми $h_{\max} = 0,6d_k$, в середній частині $h_{\text{ср}} = 0,4d_k$

Патрубки розраховуються в залежності від величини швидкості для пари $\omega = (40-50)\text{м/с}$, для повітря $\omega = 15\text{м/с}$, для холодної води $\omega = 1\text{м/с}$. Швидкість води в барометричній трубі $\omega = 0,3\text{м/с}$. Теоретична висота барометричної труби визначається

$$H_T = 10,33 \frac{P_{A_1} - P_1}{P_A}, \quad (17)$$

де P_A - атмосферний тиск, P_A . P_1 - тиск в конденсаторі, P_A .
Висота барометричної труби рівня $H=11\text{м}$.

Тема 11

МАШИНИ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ВАКУУМУ

Процеси фармацевтичних і мікробіологічних виробництв часто відбуваються не під атмосферним тиском, а при вакуумі. Це диктується в багатьох випадках умовами протікання хімічних реакцій, необхідністю зниження температури кипіння теплообмінних рідин, можливістю використання дешевих низькотемпературних теплоносіїв. Досягаємий вакуум прийнято виражати в процентах від нормального тиску P_a , таким чином

$$\left(\frac{P_a - P_0}{P_a} \right) \cdot 100\%$$

Для створення вакуума використовуються вакуум-насоси. Особливістю вакуум-насосів являється висока ступінь стискання. Так, наприк-

лад, коли вакуум-насос відсмоктує газ (повітря) при тиску 0,005 Мпа (розрідження 95%) і стискає його до 0,11 Мпа на виході із насоса (надлишковий тиск 0,01 Мпа, необхідно для переборення опора нагнітаючого клапану і трубопроводів), то ступінь стискання складає

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{0,11}{0,005} = 22,$$

Для одноступеневих поршневих компресорів ступінь стискання не перевищує 8.

Поршнєві вакуум-насоси поділяються на сухі і мокрі. Сухі вакуум-насоси використовуються для відсмоктування тільки газу, мокрі-для відсмоктування газу і рідини одночасно.

Поршнєві вакуум-насоси поділяються по кількості усмоктуваних нагнітань за один хід поршня на: одинарного і подвійної дії. За один подвійний хід насос простої дії виконує одне усмоктування і одне нагнітання, насос подвійної дії-два усмоктування і два нагнітання.

По числу ступеней вакуум-насоси поділяються на одноступеневі і багатоступеневі, які в свою чергу поділяються на горизонтальні і вертикальні.

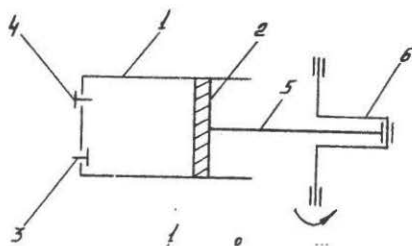


Рис. 64. Одноступенєвий вакуум-насос

1- циліндр; 2- поршень; 3- усмоктувальний клапан; 4- нагнітаючий клапан; 5-шатун; 6- кривошипний механізм

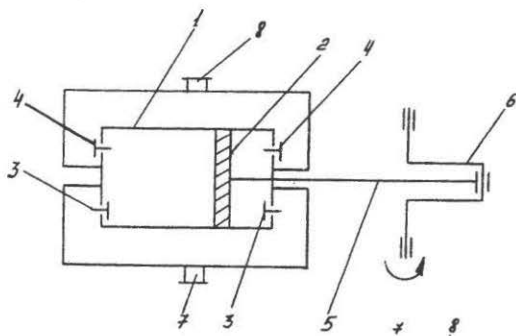


Рис. 65. Одноступенєвий вакуум-насос подвійної дії

1- циліндр; 2- поршень; 3- усмоктувальний клапан; 4- нагнітаючий клапан; 5-шатун; 6- кривошипний механізм; 7, 8- усмоктувальний і нагнітаючий патрубкі

Двоциліндровий вакуум-насос простої дії

Вертикальні одноступеневі вакуум-насоси мають ряд переваг перед горизонтальними. Вертикальні являються більше швидкохідними: для

горизонтальних $n=100-240 \text{ хв}^{-1}$. Поршні і циліндри вертикальних машин змащуються значно легше.

Багатоступеневі поршневі вакуум-насоси

Багатоступеневі поршневі вакуум насоси використовуються для створення низького вакууму при допомозі одного насоса. Кількість ступенів може бути 2-3.

Одноступеневі поршневі вакуум насоси створюють розрідження до 96%. Для створення глибокого розрідження до 99,9% використовуються двоступеневі поршневі вакуум-насоси. Об'ємний коефіцієнт корисної дії поршневих компресорів складає 0,8-0,9.

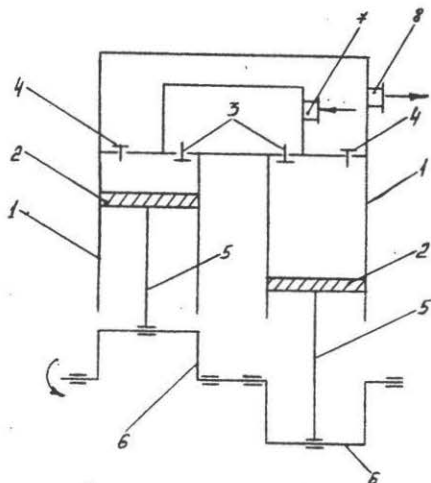


Рис. 66. Двоциліндровий вакуум-насос простої дії

1- циліндр; 2- поршні; 3- усмоктувальні клапани; 4- нагнітаючі клапани; 5- шатун; 6- кривошипний механізм; 7, 8- усмоктувальні і нагнітаючі патрубки

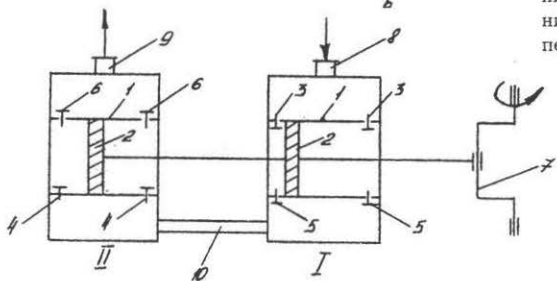


Рис. 67. Багатоступеневі поршневі вакуум-насоси

1- циліндр; 2- поршень; 3, 4- усмоктувальні клапани; 5, 6- нагнітаючі клапани; 7- кривошипний механізм; 8, 9- усмоктувальний і нагнітаючий патрубок; 10- перепускна труба

Ротаційні вакуумні насоси

Використовуються в фармацевтичній та мікробіологічній промисловості. Широке використання знайшли пластинчаті вакуум-насоси ви-

готовлені з двома, чотирма та з більшим числом пластин. По принципу дії вони ідентичні.

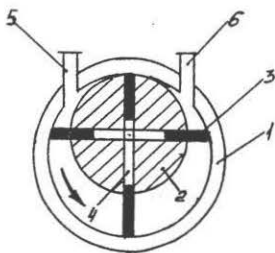


Рис. 68. Пластинчаті вакуум-насоси
1- корпус насоса; 2- ротор; 3- пластина; 4- пази; 5, 6- усмоктувальний та нагнітаючий патрубкі.

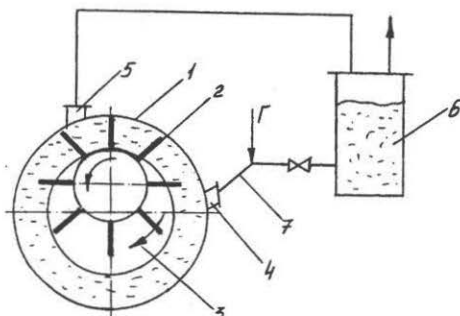


Рис. 69. Водокільцевий вакуум-насос
1- корпус вакуум-насоса; 2- ротор; 3- зона вакууму; 4, 5- усмоктувальний і нагнітаючий патрубкі; 6- ємкість з водою.

Пластинчаті вакуум-насоси

В обертаючому роторі 2, який розташований ексцентрично в корпусі 1, маються пази 4, у яких переміщуються пластини 3. Під дією відцентрової сили пластини притискаються до внутрішньої поверхні корпусу 1. Серповидний робочий простір між ротором і корпусом розділений за допомогою пластин на ряд нерівних по об'єму камер.

Водокільцевий вакуум-насос

У корпусі 1 ексцентрично розташований ротор 2 з плоскими лопатками. Перед запуском вакуум-насоса заповнюється водою, яка при обертанні ротора відкидається до периферії і утворює водяне кільце. Газ засмоктується в комірки об'єм яких збільшується. Патрубкі 4,5 встановлені на бокових поверхнях насоса.

Пластинчаті вакуум-насоси забезпечують досягнення надлишкового тиску 7-13 Па. Головним недоліком пластинчатих вакуум-насосів являється зменшення коефіцієнта корисної дії при незначному змочуванні пластин із-за витікання газу через нещільності з нагнітаючої сторони на усмоктувальну.

Водокільцеві вакуум-насоси забезпечують розрідження до 98%. К.К.дії даних насосів складає 0,4-0,45.

Мокрі поршневі вакуум-насоси створюють розрідження 80-85% від абсолютного. Сухі поршневі вакуум-насоси забезпечують розрідження 99%.

Література

1. Быков В.А. и др. Расчёт процессов микробиологических производств – К.: Техніка, 1985. – 245 с.
2. Бобылёв Р.В. и др. Технология лекарственных форм. – М.: Медицина, 1991. – 544 с.
3. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.; Химия, 1981. – 812 с.
4. Калунянц К.А. и др. Оборудование микробиологических производств. – М.: Агропромиздат, 1987. – 398.
5. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.; Химия, 1973 – 752 с.
6. Новиков Е.Д. и др. Автоматы для изготовления лекарственных форм фасовки. – М.: Медицина, 1980. – 296 с.
7. Стабников В.Н. и др. Процессы и аппараты пищевых производств. – М.: Пищевая пр-ть, 1976 – 662 с.
8. Ярош М. Машины и оборудование для фармацевтического производства. ВЦП. – К. 198. – 216 с.

Навчальне видання

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни
“Процеси та обладнання фармацевтичної
та мікробіологічної промисловості”
для студентів спеціальності 6.090200
“Обладнання фармацевтичної
та мікробіологічної промисловості”
денної форм навчання

Частина II
Теплові процеси та обладнання

Укладачі: Прохоров Олександр Миколайович
Шутюк Віталій Володимирович

Підп. до друку 11.09.2000р. 3,87 обл.-вид. арк. Наклад 70 прим.
Вид. № 143/2000. Зам. № 799

РВЦ УДУХТ, 01033 Київ-33, вул. Володимирська, 68