

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ  
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Є. В. ХРИСТЯН, І. В. ТИТАРЕНКО

# Теплотехнологічні процеси та установки на залізничному транспорті

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

ДНІПРОПЕТРОВСЬК  
2015

УДК 66.045:629.488.25(075.8)  
ББК 35.112/.113:39.22я73  
Х 93

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *В. Ф. Іродов* (ПДАБА),  
д-р техн. наук, проф. *Г. Т. Циганков* (УХТУ),  
канд. техн. наук, доц. *О. Г. Дуганов* (ДПТ).

Рекомендовано

Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України  
як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів,  
які навчаються за напрямом підготовки «Теплоенергетика»  
(лист № 1/11-9530 від 13.10.11)

**Христян, Є. В.**

Х 93 Теплотехнологічні процеси та установки на залізничному  
транспорті [Текст]: навчальний посібник / Є. В. Христян,  
І. В. Титаренко; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад.  
В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2015. – 269 с.  
ISBN"; 9: /; 88/: 693/; 2/4

У посібнику наведено відомості про конструктивні схеми й методики теплового та конструктивного розрахунків рекуперативних, регенеративних і змішувальних теплообмінних апаратів. Викладено основи роботи й розрахунку теплотехнологічного устаткування підприємств залізничного транспорту (мийних машин, сушильних установок та ін.), загальні відомості про його допоміжне обладнання.

Для студентів вищих навчальних закладів залізничного транспорту спеціальностей «Локомотивне господарство», «Вагонне господарство», «Теплоенергетика залізничного транспорту». Може бути корисним студентам інших ВНЗ спеціальності «Теплоенергетика», а також спеціалістам-теплотехнікам, що працюють як на залізничному транспорті, так і в інших галузях промисловості та транспорту.

Іл. 68. Табл. 7. Бібліогр.: 12 назв.

УДК 66.045:629.488.25(075.8)  
ББК 35.112/.113:39.22я73

© Є. В. Христян, І. В. Титаренко, 2015

© Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп.  
ім. акад. В. Лазаряна, редагування,  
оригінал-макет, 2015

ISBN ; 9: /; 88/: 693/; 2/4

## ВСТУП

Енергетичне та енерготехнологічне господарство сучасного промислового або транспортного підприємства є важливим комплексом, який складається з технічного устаткування для вироблення, перетворення, переміщення та споживання різноманітних видів енергії (найчастіше – теплової та електричної). Рациональне використання паливно-енергетичних та сировинних ресурсів на сучасних підприємствах повинно забезпечуватися застосуванням енергозберігаючих, мало- та безвідходних технологій і принципів енерготехнологічного комбінування.

На залізничному транспорті є велика кількість дуже специфічних виробничо-технологічних споживачів теплової енергії, серед яких пристрої для підготовки рухомого складу до перевезень (зовнішнє й внутрішнє очищення локомотивів і вагонів, дезінфекція вагонів, сушіння піску, приготування охолоджувальної води для тепловозних дизелів і дистилату для акумуляторних батарей локомотивів і пасажирських вагонів), обігрівання в холодну пору року тепловозів, що перебувають у гарячому резерві депо, і вагонів пасажирських поїздів під час їх відстою на станціях відправлення й прибуття та ін.

Суттєвою особливістю комунально-побутового споживання теплоти на залізничному транспорті є необхідність створення для великої кількості людей комфортних умов під час перевезення у вагонах поїздів і перебування на залізничних вокзалах.

Без вирішення багатьох теплотехнічних питань не може бути й мови про підвищення ефективності й економічності тепло- та паливоспоживних установок залізничного транспорту шляхом їх модернізації й використання вторинних енергоресурсів, своєчасного оснащення депо й локомотиво- та вагоноремонтних заводів більш сучасним теплотехнічним обладнанням, що забезпечує охорону

навколишнього середовища. Значна увага в цій справі повинна приділятися нормуванню витрат теплоти та палива, складанню енергетичних паспортів енергоємного обладнання та підприємств.

Усі теплотехнологічні процеси (та установки, що їх реалізують) умовно поділяють:

- на високотемпературні (вогнетехнічні), що відбуваються при температурах 400...2 000 °С; до них належать насамперед промислові печі. Ці процеси та установки є предметом вивчення в курсі «Високотемпературні процеси та установки»;

- середньотемпературні установки (100...700 °С), наприклад значна кількість тепло- та тепломасообмінних апаратів і установок, опалювальні, сушильні, дистиляційні, випарні та ін. Вони є предметом вивчення в цьому курсі;

- низькотемпературні (кондиціонери, теплові насоси та холодильні установки з температурним рівнем –150...150 °С). Ці процеси й установки вивчаються в курсі «Трансформатори теплоти»;

- кріогенні процеси та установки з температурним рівнем нижче –150 °С (установки для розділення повітря, одержання рідких кисню, азоту та інших речовин), які також є предметом вивчення курсу «Трансформатори теплоти».

За фізичною природою теплотехнологічні процеси дуже різноманітні: нагрівання та охолодження, випарювання та конденсація, сушіння, дистиляція, ректифікація, плавлення, кристалізація, твердіння та ін. Деякі з них часто супроводжуються не тільки тепло-, але й масообміном (сорбція, дифузія і т. ін.).

Значним внеском у справу створення сучасних теплотехнологічних процесів та установок стали наукові праці І. А. Тищенко, А. Г. Касаткіна, А. В. Ликова та багатьох інших вчених. Провідним в Україні науковим закладом, дослідження якого спрямовані на розробку й упровадження сучасних теплотехнологічних процесів та високопродуктивного устаткування, що їх реалізує, є Інститут технічної теплофізики НАН України. Велику роботу щодо розвитку теорії та практики теплотехнічного устаткування виконують вчені та співробітники Національного технічного університету «КПІ» та ін.

Науково-технічний прогрес потребує подальшого удосконалення промислових тепло- і тепломасообмінних установок. Для здійснення нових теплотехнологічних процесів слід забезпечити одержання та підтримання необхідних температурних рівнів, високого тиску або

глибокого вакууму; використання комбінованих засобів підведення теплоти із застосуванням струму високої та промислової частоти, ультразвуку або вібраційних процесів; застосування магнітного та електричного полів та т. ін. Усе це необхідно для забезпечення високої якості кінцевого продукту та найкращих техніко-економічних показників виробництва за якомога менших питомих витрат теплової та електричної енергії. Успішне розв'язання цих завдань, створення високопродуктивних та економічних установок, що використовують теплоту, можливе тільки за умов комплексної творчої роботи інженерів-теплоенергетиків з інженерами-технологами промисловості та транспорту.

Курс «Теплотехнологічні процеси та установки на залізничному транспорті» базується на попередніх курсах «Теплотехніка», «Технічна термодинаміка», «Гідрогазодинаміка» та «Теплопередача». У свою чергу, він є базою для вивчення таких спецкурсів, як «Основи конструювання», «Теплоенергетичне господарство на залізничному транспорті», «Теплові мережі», «Опалення, вентиляція та кондиціювання повітря».

## Теплообмінні апарати та теплоносії

### 1.1. Класифікація теплообмінних апаратів

Теплообмінні апарати призначені для передачі теплоти від середовища, що нагріває, до іншого для його нагріву або ж відведення теплоти від охолоджуваного середовища та її передачі, наприклад, у навколишнє середовище. Середовища, що беруть участь у теплообміні, називаються теплоносіями. У першому випадку теплообмінний апарат називається підігрівачем, а в другому – охолоджувачем, хоча принципової різниці між такими теплообмінними апаратами немає. Різниця тут тільки в їх призначенні.

Проте теплообмінні апарати (теплообмінники) значно відрізняються між собою за принципом дії та конструктивно. Насамперед, за способом передачі теплоти від одного середовища до іншого (від одного теплоносія до іншого) теплообмінники поділяються на рекуперативні, регенеративні, змішувальні та з електричним нагріванням.

У *рекуперативних* теплообмінниках передача теплоти від одного теплоносія до іншого здійснюється крізь стінку, що їх розділяє. В апаратах цього типу в кожній точці стінки, що розділяє теплоносії, тепловий потік зберігає незмінний напрямок.

Якщо ж два або більше теплоносії поперемінно стикаються з однією й тією ж поверхнею теплообміну, то такий теплообмінний апарат називається *регенеративним*. У період стикання з одним з теплоносіїв стінки теплообмінного апарата одержують теплоту та акумулюють її. У наступний період з тією ж поверхнею стикається інший теплоносіє, який убирає в себе акумульовану від попереднього теплоносія теплоту та нагрівається. Напрямок теплового потоку в цьому виді апаратів періодично змінюється.

Рекуперативні та регенеративні теплообмінні апарати утворюють групу поверхневих апаратів. У них теплоносії стикаються з поверх-

нею твердої стінки (безперервно чи періодично), яка і є поверхнею теплообміну.

У більшості рекуперативних апаратів відбувається безперервна передача теплоти крізь стінку від одного теплоносія до іншого. Вони мають назву апарати безперервної дії. Апарати, у яких здійснюють періодичне нагрівання або охолодження якогось середовища, називаються апаратами періодичної дії. Регенеративні теплообмінники здебільшого є апаратами періодичної дії. Але відомі регенеративні апарати безперервної дії. Це апарати, які мають рухомі стінки або насадки. У них теплоносії, що безперервно рухаються, стикаються з тією самою частиною стінки або насадкою в різний час за рахунок їх поперечного переміщення відносно напрямку руху теплоносіїв.

У *змішувальних* теплообмінних апаратах тепло- та масообмін здійснюється при безпосередньому контакті (змішуванні) рідких та газоподібних теплоносіїв. Змішувальні теплообмінники можуть бути порожнистими та з насадкою. Поверхня насадки в цьому випадку не є поверхнею теплообміну, а призначена лише для організації руху півки рідкої фази.

В апаратах з *електричним нагріванням* джерелом теплоти є електрична енергія. Умови передачі теплоти від джерела до середовища або тіла, що нагріваються в цих апаратах, відрізняються від умов теплопередачі в теплообмінниках з двома чи більше теплоносіями. Електрична енергія може бути перетворена в теплову в елементах опору, в електродугових установках прямого та непрямого нагрівання, в установках індукційного та діелектричного нагрівання.

Кожна з груп теплообмінників, крім апаратів з електричним нагріванням, ділиться на підгрупи *за видом теплоносіїв*: парорідинні, рідинно-рідинні, газорідинні, газо-газові, парогазові та з дисперсними теплоносіями.

Поверхня теплообміну може бути виконана з гладких або ребристих труб; з гладких або профільних, хвилястих та ребристих пластин; у вигляді різноманітної за формою фасонної та блочної цегляної насадки тощо.

За компоновкою поверхні теплообміну та з'єднанням її з корпусом гладкотрубні апарати поділяють на такі групи: занурені з прямими трубами та змішувальні, зрошувальні з водяним та повітряним охолодженням, секційні та кожухотрубні. Секційні та кожухотрубні апарати можуть бути виготовлені з ребристих труб. Деякі можливі варіан-

ти конструкцій труб, які застосовуються в трубчастих теплообмінниках, показані на рис. 1.1.

Апарати з пластин поділяються на оболонкові, спіральні, гладко-пластинчасті різного профілю, пластинчасті ребристі та стільникові. Вони можуть бути розбірними, напіврозбірними, зварними та прокатно-зварними. Поверхня теплообміну пластинчастих апаратів компонується з різноманітних за формою поверхні металевих листів. Конструкції пластин, які застосовуються в таких теплообмінниках, показані на рис. 1.2.

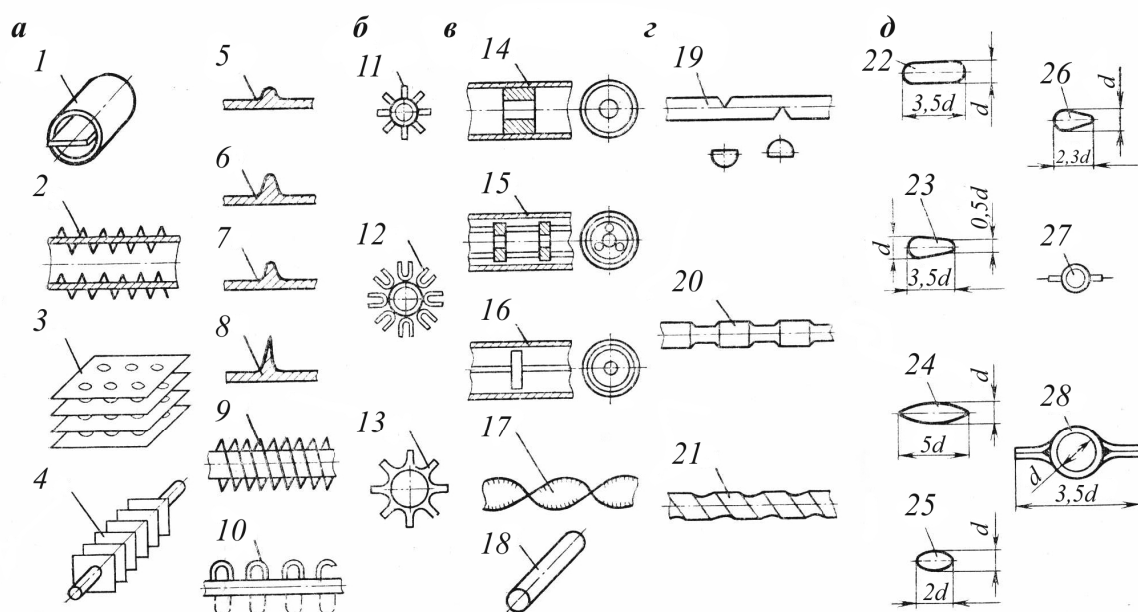


Рис. 1.1. Труби для теплообмінників:

**а** – з поперечними ребрами: 1 – детандер; 2 – голчасті; 3 – плоскосувільні; 4 – прямокутні; 5 – з накатаними ребрами; 6 – круглі; 7, 8 – трикутні; 9 – спіральні; 10 – дротяні; **б** – з по-  
вздовжніми ребрами: 11 – прямокутні; 12 – V-подібні; 13 – витиснуті; **в** – циліндричні  
з вставками: 14 – з діафрагмою; 15 – кільцеві; 16 – дискові; 17 – спіральні; 18 – гладкотруб-  
часті циліндричні; **з** – перетиснуті: 19 – напівкільцевими ум’ятинами; 20 – кільцевими  
ум’ятинами; 21 – спіральними ум’ятинами; **д** – нециліндричні: 22 – валоподібні; 23 – крап-  
леподібні; 24 – двокутні; 25 – овальні; 26 – обтіканні; 27, 28 – плавникові

Теплообмінні апарати виготовляють також з вогнетривких мате-  
ріалів, графіту, скла, пластичних мас. За конструктивними показни-  
ками вони можуть бути найрізноманітнішими залежно від технологі-  
чних умов нагріву (охолодження), а також фізико-хімічних властиво-  
стей та рівня робочих температур теплоносіїв.



Залежно від призначення виділяють такі тепло- та масообмінні апарати: випарники, конденсатори, котли, скрубери, градирні, зрошувальні камери, змішувальні підігрівачі та ін.

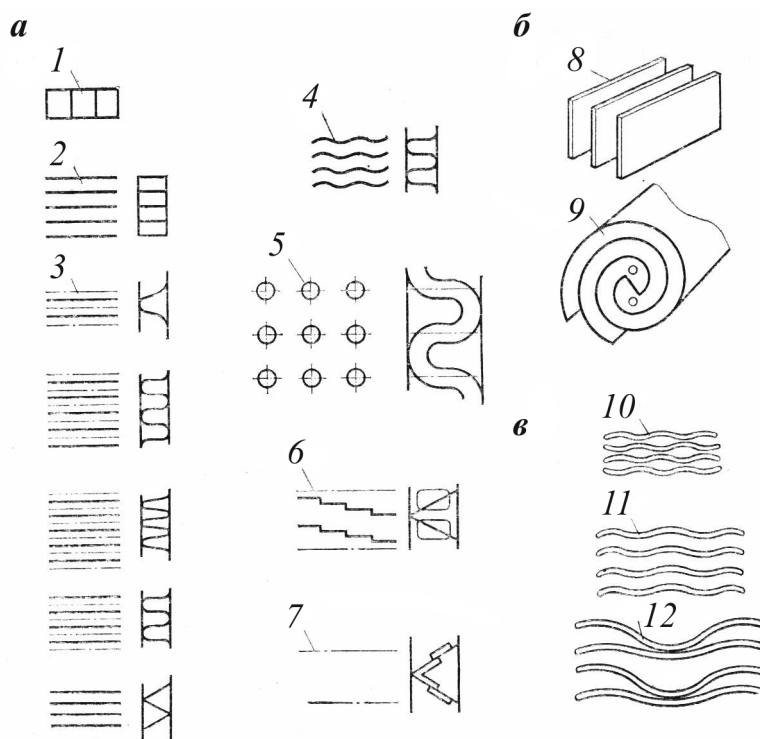


Рис. 1.2. Пластини для теплообмінників:

*а* – з ребрами: 1 – гладкими квадратними; 2 – гладкими прямокутними; 3 – з іншими формами гладких ребер; 4 – хвилястими; 5 – стрижневими; 6 – розрізними жалюзійними; 7 – розрізними пластинчастими; *б* – пластинчасті: 8 – плоскі; 9 – спіральні; *в* – з підвищеною турбулентністю: 10 – зі сфероїдальними зигзагоподібними каналами; 11, 12 – зі хвиляподібними та серпоподібними каналами

З розвитком техніки та технології створено теплообмінники, у яких теплота передається від теплоносія, що гріє, до того, що нагрівається, за допомогою проміжного теплоносія. До таких теплообмінників належать, зокрема, трубчасті теплообмінники (теплові труби), у яких теплота від нагрітого середовища передається більш холодному за рахунок циркуляції проміжного теплоносія, який, рухаючись усередині труби (каналу) і випаровуючись у зоні нагріву, конденсується в зоні охолодження. Таким чином цей теплоносій переміщує теплоту практично без зміни температури теплоносія і відповідно зовнішньої поверхні теплообміну каналу.

Умови роботи проміжного теплоносія багато в чому збігаються з умовами роботи регенеративних теплообмінників безперервної дії.

Якщо середовища, що беруть участь у теплообміні, рухаються в теплообміннику вздовж поверхні теплообміну в одному й тому ж напрямку, такий теплообмінник називається прямоточним. У тому ж випадку, коли в теплообміннику наявний зустрічний рух теплоносіїв, тоді такий теплообмінник має назву протиточний. У тих випадках, коли теплоносії в теплообміннику спрямовані в перекресних напрямках, теплообмінники називаються перекресноточними. Це так звані прості схеми руху теплоносіїв у апаратах. Якщо напрямок руху одного з теплоносіїв стосовно іншого змінюється, тоді говорять про складні схеми руху.

Шлях, пройдений теплоносієм у теплообміннику без зміни напрямку руху, називається ходом. Залежно від кількості ходів розрізняють одно-, дво-, чотири- і т. д. ходові апарати (як правило, обирають парну кількість ходів).

## 1.2. Теплоносії

Робочі середовища, що беруть участь у теплообміні між собою, називаються теплоносіями. Теплоносії класифікують за призначенням, агрегатним станом, а також за діапазоном робочих температур та тисків.

*За призначенням* теплоносії поділяють на ті, що гріють, та ті, що охолоджують, холодоносії, проміжні тепло- та холодоносії, холодоагенти (робочі тіла в холодильних циклах), сушильні агенти й т. д.

*За агрегатним станом* розрізняють однофазні та багатофазні (частіше двофазні) теплоносії. До однофазних теплоносіїв належать низькотемпературна плазма (полум'я); гази, пари, що не конденсуються; суміші газів та парів, що не конденсуються; некиплячі та непаркі при робочому тиску рідини, їх суміші та розчини; тверді матеріали (частіше сипкі). Двофазними та багатофазними теплоносіями є киплячі, паркі рідини та рідини, що розпилюються газом; пари, що конденсуються; парогазові суміші при конденсації пари, яка в них міститься; тверді речовини, що плавляться чи твердіють, сублімують, або пари, що десублімують, піни, суспензії, аерозолі та інші запоро-

шені газові потоки, емульсії, шлами, пасти та інші реологічно складні системи.

За діапазоном робочих температур теплоносії поділяють на високотемпературні, середньотемпературні, низькотемпературні та кріогенні. Але слід зауважити, що такий розподіл є дещо умовним, бо поняття про температурний рівень пов'язується з робочим тиском. Так, до високотемпературних відносять теплоносії у вигляді краплинних речовин, температура яких при атмосферному тиску не перевищує 200 °С. У той же час водяна пара та повітря вважаються середньотемпературними теплоносіями, при тому що водяну пару використовують при температурі до 650 °С, воду – до 375 °С, а повітря – до 100 °С.

Низькотемпературними теплоносіями прийнято вважати такі, температура кипіння яких при атмосферному тиску (0,1 МПа) не перевищує 0 °С. До них насамперед належать холодильні агенти. Кріогенними теплоносіями є зріджені гази (кисень, водень, азот, повітря та ін.) та їх пари. Область їх застосування лежить нижче –150 °С.

Найбільш важливими умовами, від яких залежить вибір теплоносія, є такі: допустима температура нагрівання або охолодження теплоносія та можливість її регулювання, пружність пари при прийнятій температурі та термічна стійкість, фізичні властивості, що впливають на теплообмін, токсичність та хімічна активність, доступність та вартість, безпека при нагріванні.

Найпоширенішими теплоносіями є насичена водяна пара, вода, продукти спалювання палива, повітря, дисперсне середовище, високотемпературні рідини та їх пари, рідкі метали.

Насичена водяна пара часто застосовується як гріюче середовище в стаціонарно встановлених апаратах різного призначення. Її можна транспортувати трубами на відстань до кількох сотень метрів. При нагріванні парою в достатньо широких межах та з достатньою точністю можна регулювати температурний режим шляхом зміни тиску пари методом дроселювання без зволоження або із зволоженням. Пара доступна, нетоксична, відносно дешева, особливо якщо в теплообмінних апаратах використовується пара вже частково відпрацьована в будь-яких енергетичних установках (у парових турбінах, молотах, пресах, поршневих двигунах і т. д.).

У більшості випадків конденсація пари в теплообміннику відбувається при постійному тиску, постійній температурі та високому

коефіцієнті теплообміну, що часто є вирішальним фактором у виборі теплоносія. У той же час з підвищенням температури нагріву необхідно підвищувати тиск пари як гріючого середовища. Наприклад, при тем-пературі пари 200 °С тиск її повинен бути 1,56 МПа, а при 300 °С – вже 8,6 МПа. З підвищенням тиску зростає металомісткість та вартість теплообмінників та теплових мереж, тому в промисловості та на підприємствах залізничного транспорту водяна пара як теплоносії застосовується для нагрівання інших середовищ до помірних температур 60...150 °С і дуже рідко – до 180...200 °С.

Гаряча вода як гріючий теплоносії набула великого поширення в системах теплопостачання, а також для технологічних споживачів підприємств залізничного транспорту та промисловості. Попередньо вода нагрівається у водогрійних котлах, у теплофікаційних ТЕЦ, у парових котельнях, у центральних теплових пунктах або в теплообмінних апаратах безпосередньо у споживача. У першому випадку для нагрівання води використовується природне паливо, у другому – пара з відборів парових турбін та безпосередньо від парогенераторів. Останнім часом широко впроваджуються методи нагрівання води при прямому або непрямому використанні вторинних енергоресурсів, наприклад відхідних газів промислових печей, парогенераторів, відпрацьованої пари молотів, пресів, води із систем охолодження металевих конструкцій печей, двигунів, компресорів і т. д.

Вода доступна, дешева, не токсична, може транспортуватися на велику відстань. У добре ізольованих і належним чином прокладених трубопроводах температура води знижується приблизно на 1 °С на одному кілометрі траси. До достоїнств води можна віднести досить високі коефіцієнти теплообміну.

Недоліками води, порівняно з парою, є необхідність встановлення в теплових мережах насосів для перекачування теплоносіїв. Ускладнюються також регулювання температурного режиму теплообмінного апарата та вибір схеми руху теплоносіїв. Встановлюються більш жорсткі обмеження до її початкової та кінцевої температури.

Для надійної роботи теплообмінного апарата та всього контуру, у який він включений, необхідно, щоб на будь-якій ділянці системи температура води була нижчою температури кипіння при місцевому тиску. Ця умова обмежує можливість застосування води як теплоносія тільки до температури 150 °С (у перспективі – до 200 °С).

Вода як рідке середовище використовується для охолодження та конденсації інших теплоносіїв, сушіння, зволоження й очищення газів або повітря, охолодження технологічних продуктів, машин, двигунів і т. ін.

Продукти спалювання палива використовуються як первинний теплоносіїв у парогенераторах, водогрійних котлах, сушильних установках, промислових печах різного призначення. У багатьох галузях промисловості та стаціонарній транспортній енергетиці теплоносієм можуть служити відхідні гази високотемпературних технологічних процесів, наприклад промислових печей, газотурбінних та поршне-вих двигунів.

Використання продуктів спалювання палива як середовища для нагрівання дає змогу гріти інший теплоносіїв до високої температури або створити великий температурний напір між теплоносієм, що нагріває, та тим, що нагрівається. Але продукти спалювання мають суттєві недоліки. У процесі нагрівання другого теплоносія беруть участь великі об'єми газів, транспортування яких навіть на відстань декількох десятків метрів пов'язане з великими витратами енергії. Тому, як правило, теплообмінники встановлюють поблизу джерела одержання продуктів спалювання (топки високотемпературних теплотехнологічних агрегатів). Загальний коефіцієнт тепловіддачі (конвекцією та випромінюванням) від газів до поверхні теплообміну значно менший, ніж у інших теплоносіїв, особливо при температурі, меншій за 500 °С. Теплообмінники виходять громіздкими.

Повітря як теплоносіїв має більшість недоліків, властивих продуктам спалювання палива. Але у зв'язку з широким використанням атмосферного повітря в теплотехнологічних процесах (воно містить кисень, який є компонентом горіння в топках парогенераторів, газотурбінних установок і т. д.; воно використовується в системах опалення, вентиляції та кондиціонування, у транспортних та стаціонарних холодильних установках), його властивості треба просто враховувати, а для зменшення габаритів та маси відповідного обладнання необхідно розробляти методи інтенсифікації теплообміну. Повітря доступне, нетоксичне, вибухобезпечне, не горить, і це робить його привабливим у багатьох випадках. Тому розробці методів інтенсифікації теплообміну в разі використання повітря та інших газів завжди приділяється велика увага.

Дисперсні теплоносії – це проточні заповнені газові теплоносії, які сприяють інтенсифікації тепло- та масообмінних процесів. Заповнення газового потоку дозволяє прозорі для променів теплоносії перетворити у середовища, що поглинають та випромінюють теплоту. Дисперсні потоки класифікують за об'ємною концентрацією в них зернистої речовини. Кількісно об'ємною концентрацією прийнято вважати відношення об'єму твердих частинок до загального об'єму всієї системи. Для теплообмінних апаратів найбільш важливими є потоки з концентрацією твердої речовини від 0,004 до 0,03 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> (суспензія) та ті, що мають концентрацію від 0,03 до 0,35 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> (псевдо-зріджений шар).

Високотемпературні теплоносії можуть застосовуватись у рідкому та пароподібному стані при температурі від 200 до 500 °С при помірному тиску (0,1...0,6 МПа). Високотемпературні теплоносії діляться на три основні групи: теплоносії з металевим зв'язком, або рідкометалеві; теплоносії з іонним зв'язком, або іонні; теплоносії із залишковим зв'язком, або органічні. Серед цієї групи теплоносіїв найбільшого поширення набули металеві теплоносії в рідкому та пароподібному стані: літій, калій, натрій та їх евтектичні суміші, а також велика група кремнійорганічних теплоносіїв; органічні теплоносії (ВОТ) – у рідкому та пароподібному стані: гліцерин, етиленгліколь, нафталін, дифеніл, мінеральні мастила.

Електрична енергія як теплоносієвикористовується в різноманітних промислових та побутових нагрівальних установках. Цей спосіб нагрівання має багато переваг: швидке включення в роботу та доведення режиму нагріву до необхідного температурного рівня; простота регулювання температурного режиму та рівномірність нагрівання, можливість герметизації робочої зони, кращі умови праці обслуговуючого персоналу, компактність електричних нагрівачів.

За економічними показниками апарати з електричним нагріванням значно поступаються теплообмінникам, які працюють на органічних теплоносіях. У той же час відносно малі капітальні витрати на створення електричних нагрівачів та підведення до них енергії є вирішальною умовою при прийнятті технічних рішень на їх користь. Тому, мабуть, електричне нагрівання в майбутньому набуде більшого поширення для застосування в стаціонарних умовах і особливо на підприємствах транспорту.

Найбільш поширеними теплоносіями, що використовуються в промисловості й на транспорті, є водяна пара, гаряча та холодна вода, топкові гази, повітря. Значною мірою це пояснюється їх доступністю та нетоксичністю. Витрата енергії на транспортування газоподібних теплоносіїв через їх малу густину, низькі коефіцієнти тепловіддачі, великі масові й особливо об'ємні витрати значно вищі, ніж на транспортування крапельних рідин. Тому димові гази, наприклад, транспортують не більше ніж на декілька десятків метрів, водяну пару під тиском – на відстань до декількох кілометрів, а воду – на десять і більше кілометрів.

Температура крапельних теплоносіїв змінюється в теплообмінниках менше, ніж газоподібних середовищ. Це пояснюється вищою питомою теплоємністю рідини. Під час кипіння й конденсації чистих парів їх температура не змінюється. Ця обставина суттєво полегшує регулювання теплових процесів. Крім того, ці процеси характеризуються високою інтенсивністю теплообміну.

За необхідності забезпечення більш високої щільності теплових потоків, ніж при фазових перетвореннях, використовують хімічно реагуючі речовини. Це пов'язано з тим, що теплові ефекти реакцій можуть бути на порядок вищі прихованої теплоти пароутворення. У певних випадках можна використовувати також теплові ефекти розчинення або плавлення. Так, у разі змішування снігу (льоду) із сіллю ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  та ін.) сніг плавиться, хоча через поглинання теплоти під час плавлення температура суміші знижується.

Однак використання води як теплоносія значною мірою обмежується її дефіцитом у певних регіонах, де економному використанню водних ресурсів необхідно приділяти серйозну увагу. Для зниження витрат води на охолодження теплотехнологічного обладнання створюють замкнені (оборотні) системи або системи з багаторазовим використанням води. Там, де це можливо, необхідно використовувати повітряне охолодження або застосовувати високотемпературні органічні теплоносії. Їх температура кипіння при атмосферному тиску вища, ніж у води, що забезпечує роботу установок при зниженому порівняно з водяними системами охолодження тиску. Їхнім недоліком є висока вартість.

## Контрольні завдання та запитання

1. Призначення теплообмінних, масообмінних і тепломасообмінних апаратів.
2. На які групи умовно поділяються теплотехнологічні процеси і установки за рівнем температурних режимів роботи?
3. Види теплообмінних апаратів залежно від способу передачі теплоти.
4. Які теплообмінні апарати утворюють групу апаратів поверхневого типу?
5. Як поділяються теплообмінники залежно від змінності режиму роботи в часі?
6. Що є поверхнею теплообміну в теплообмінниках змішувального (контактного) типу?
7. Чи є поверхнею теплообміну поверхня насадки в змішувальних апаратах насадкового виду?
8. З якою метою використовують різного роду насадки в змішувальних теплообмінниках?
9. Що таке хід у теплообмінному апараті? Як поділяються теплообмінники за кількістю ходів?
10. Що являють собою прямоточні, протиточні, перехресноточні теплообмінники?
11. Що таке теплоносій? Які з теплоносіїв прийнято відносити до високо-, середньо- і низькотемпературних?
12. За яких з названих процесів (кипіння, нагрівання, конденсація, охолодження) температура теплоносія в теплообміннику не змінюється?
13. Перелічіть переваги й недоліки водяної пари як теплоносія; води як теплоносія; димових газів як теплоносіїв.
14. Перелічіть переваги й недоліки ВОТ порівняно з водою.
15. Для якого з названих процесів (конденсація чистої пари, охолодження рідиною, нагрівання газів) коефіцієнт тепловіддачі має найбільше значення і для якого найменше?
16. Назвіть способи зниження витрат води в промисловості й на транспорті.



## **Рекуперативні теплообмінні апарати безперервної дії**

### **2.1. Конструкції трубчастих, пластинчастих та спіральних апаратів поверхневого типу**

Переважну більшість рекуперативних теплообмінників складають ті, що працюють у сталому тепловому режимі. Конструктивно вони можуть бути виконані змійовиковими, кожухотрубними, секційними, ребристими, пластинчастими, прокатно-зварними, стільниковими.

**Змійовикові теплообмінники.** Це прості апарати невеликої продуктивності. Вони можуть виконуватись із зануреними та зрошувальними трубами; із зігнутих труб із розташуванням їх по гвинтовій лінії або із прямих труб, з'єднаних колінами з поворотом.

Схема теплообмінника із зануреним змійовиком наведена на рис. 2.1, *а*. Корпус такого теплообмінника найчастіше виконують циліндричним, особливо це стосується апаратів, які працюють під тиском або під вакуумом. У корпусі можуть бути розташовані один або декілька змійовиків з труб з внутрішнім діаметром до 25 мм, які жорстко закріплені у фланцевих з'єднаннях між корпусом та кришками. Один з теплоносіїв проходить по трубах, другий – у міжтрубному просторі. Для підвищення швидкості потоку в міжтрубному просторі, особливо теплоносія, що не змінює фазовий стан, передбачають пристрої у вигляді циліндра або яких-небудь перегородок, що зменшують переріз.

Краї труб завальцьовують у верхню та нижню трубні решітки. У тих випадках, коли розрахункову поверхню не можливо зробити з одним змійовиком, паралельно включають декілька секцій змійовиків. Якщо середовищем, що гріє, є водяна пара, то її подають у змійо-

вик зверху (конденсат відводиться знизу), якщо ж рідина – то напрям її руху вибирають згідно з умовами роботи апарата.

Поверхня теплообміну апаратів із зануреними змійовиками виготовляється зі сталевих, мідних, латунних, алюмінієвих або свинцевих труб, а також із кислотостійких матеріалів – скла, кераміки або пластмас. До недоліків теплообмінників із зануреними змійовиками слід віднести їх великий об'єм, а тому велику витрату металу на одиницю поверхні теплообміну. Крім того, дуже складно очистити теплообмінну поверхню, особливо внутрішню. Занурені змійовики застосовують як підігрівачі, холодильники, конденсатори тощо при тиску в трубах до 4 МПа та в міжтрубному просторі до 1,6 МПа.

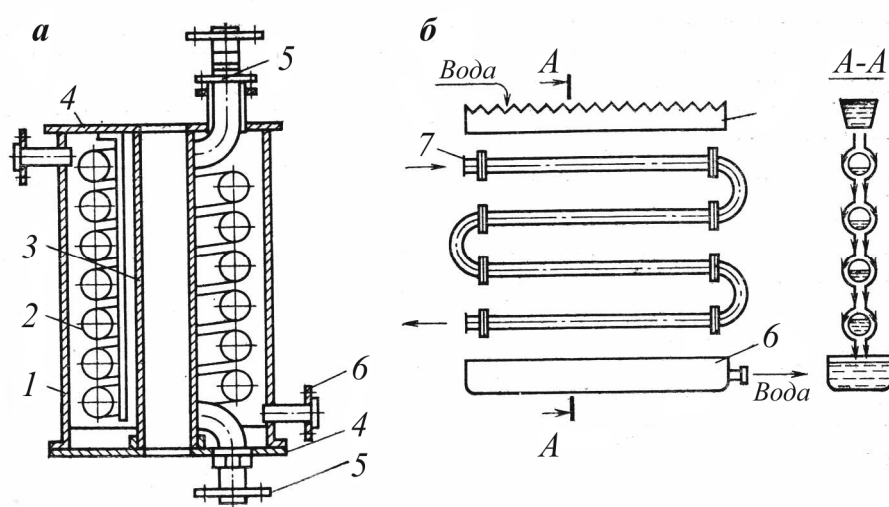


Рис. 2.1. Схеми змійовикових теплообмінників:

*а* – зануреного; *б* – зрошувального; 1 – корпус; 2, 7 – змійовики; 3 – внутрішня труба; 4 – кришка; 5, 6 – патрубки; 8 – розподільний жолоб; 9 – збиральний жолоб

Теплообмінники зі зрошенням поверхні теплообміну призначаються для охолодження рідких середовищ та конденсації пари. Їх збирають з прямих горизонтальних труб, з'єднаних так званими калачами (рис. 2.1, б). Пакети таких вузлів встановлюють та скріплюють на каркасі. По трубах такого теплообмінника проходить теплоносіє, що охолоджується, а ззовні поверхня труб зрошується теплоносієм, що охолоджує. Над верхнім рядом труб розміщують жолоб з перфорованим дном, який розподіляє зрошувальну рідину. Під нижнім рядом труб розташовують піддон для збирання цієї рідини та відведення її у збиральний резервуар. У деяких випадках доцільно

охолоджувати змійовики з частковим випарюванням зрошувального середовища. При випарному охолодженні витрату рідини слід регулювати так, щоб нижні труби не були сухими.

Простота будови, доступність для огляду, ремонту та очищення труб, дещо менша витрата води на охолодження порівняно з теплообмінниками із зануреними змійовиками сприяють доволі значному поширенню зрошувальних теплообмінників у промисловості та на транспорті. У той же час, необхідно зауважити, що частина води при такому способі охолодження губиться; такі теплообмінники чутливі до коливань подачі води у зрошувальний жолоб; вони потребують багато місця.

**Кожухотрубні теплообмінники.** Теплообмінники цього типу є найбільш поширеними, їх застосовують у промисловості та на транспорті як підігрівачі, конденсатори, охолоджувачі для різних рідких та газоподібних середовищ. Основними елементами такого теплообмінника є: кожух (корпус), трубний пучок, камери-кришки, патрубки, запірні та регульовальні арматури, контрольна апаратура, опорні конструкції, каркас. Трубний та міжтрубний простори в апараті відокремлені, і кожний з них може бути розділений за допомогою перегородок на декілька ходів. Перегородки ставлять з метою підвищення швидкості теплоносія і тим самим інтенсифікації теплообміну. Їх використовують тоді, коли виникає потреба у великій поверхні теплообміну. Кожух апарата зварюють у вигляді циліндра зі сталевих листів. Товщина стінки кожуха визначається найбільшим тиском робочого середовища в міжтрубному просторі та діаметром апарата.

Днища камер можуть бути сферичними зварними, еліптичними штампованими й рідше плоскими. Товщина днищ не повинна бути меншою за товщину стінок корпусу.

Залежно від розташування апарата відносно підлоги приміщення (вертикальне, горизонтальне) до корпусу повинні бути приварені відповідні опори. У разі вертикального розташування теплообмінника площа, яку він займає в приміщенні, є найменшою та забезпечується найбільш зручне його обслуговування. Трубний пучок теплообмінника може бути виготовлений із гладких сталевих, латунних або мідних прямих, *U*- та *W*-подібних труб діаметром від декількох міліметрів до 57 мм та довжиною від декількох сантиметрів до 9 м.

Впроваджуються, особливо у холодильній техніці та на транспорті, зразки кожухотрубних та секційних теплообмінників з низькими накатаними поздовжніми, радіальними та спіральними ребрами. Висота поздовжнього ребра не перевищує 25 мм, а висота виступу катаних труб – 3 мм. Деякі варіанти компоновання трубних пучків у корпусі кожухотрубних теплообмінників наведені на рис. 2.2.

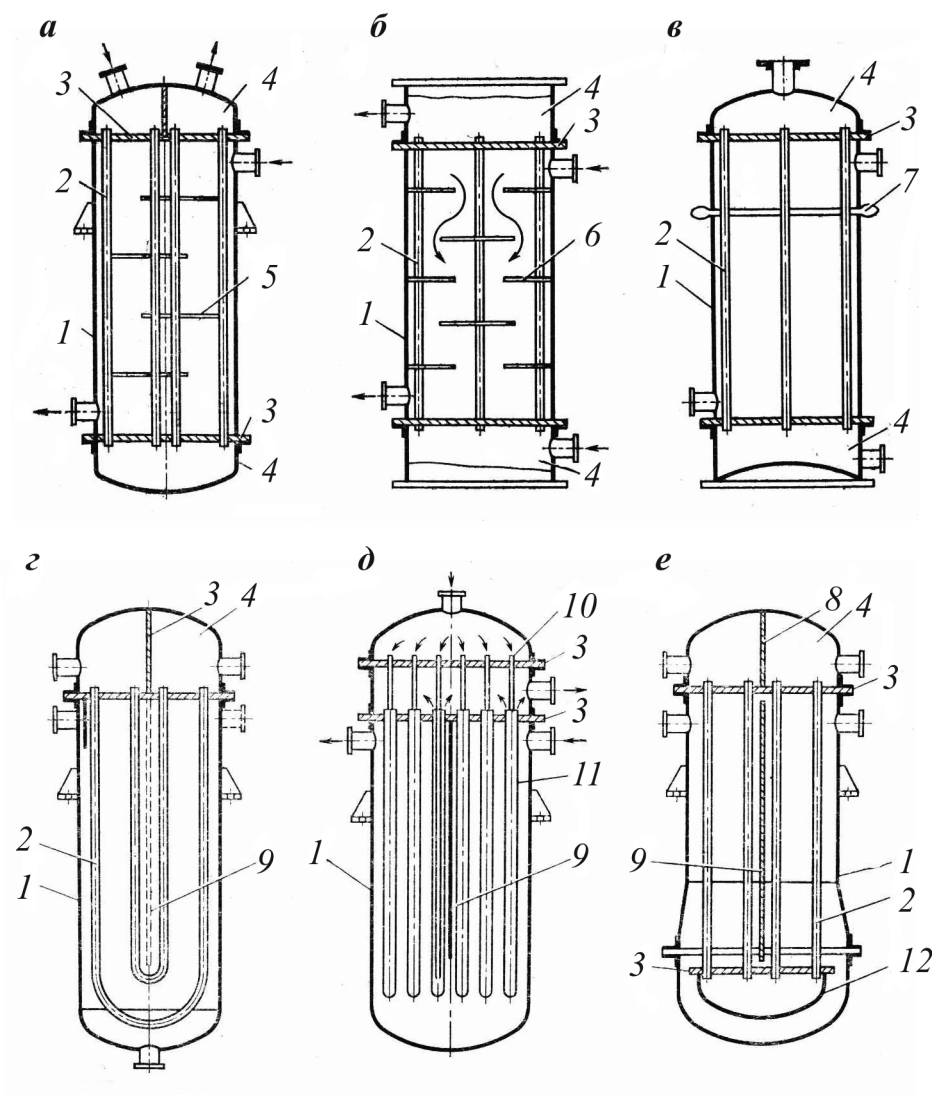


Рис. 2.2. Схеми кожухотрубних теплообмінників:

*а* – із жорстким закріпленням трубних решіток; *б* – із жорстким закріпленням трубних решіток з кільцевими перегородками; *в* – з лінзовими компенсаторами на корпусі; *г* – з *U*-подібними трубами; *д* – з подвійними трубами («труба в трубі»); *е* – з плаваючою камерою закритого типу; 1 – циліндричний корпус; 2 – труби; 3 – трубна решітка; 4 – верхня та нижня камери; 5, 6, 9 – відповідно сегментна, кільцева та поздовжня перегородки в міжтрубному просторі; 7 – лінзовий компенсатор; 8 – перегородка в камері; 10 – внутрішня труба; 11 – зовнішня труба; 12 – плаваюча камера

Кожухотрубні теплообмінники поділяються на три види залежно від способу компенсації температурних подовжень елементів: без компенсації (жорстка конструкція); з компенсацією пружним елементом (напівжорстка конструкція); з компенсацією за рахунок вільного температурного подовження. Апарати жорсткої конструкції (рис. 2.2, а, б) застосовують, якщо різниця температури між корпусом та трубками невелика (приблизно 25...30 °С). Проектуючи такі апарати необхідно розраховувати напругу, яка виникає внаслідок теплових подовжень труб у трубній решітці, особливо в місцях з'єднання труб з решіткою.

В апаратах з лінзовим компенсатором на корпусі (рис. 2.2, в) теплові подовження компенсуються осьовим стиском або розтягненням цього компенсатора. Такі апарати можна застосовувати при збитковому тиску в міжтрубному просторі не вище 0,25 МПа та деформації компенсатора не більше ніж на 10...15 мм.

У теплообмінниках з *U*-подібними (рис. 2.2, г), а також з *W*-подібними трубами обидва кінці труб закріплюються в одній (частіше у верхній) трубній решітці. Кожна з труб пучка може вільно подовжуватися незалежно від подовження інших труб та елементів апарата. Ці теплообмінники придатні для роботи при високому тиску теплоносіїв. Однак апарати з гнутими трубами мають недоліки, пов'язані з труднощами виготовлення труб з різними радіусами згину, а також складнощами заміни та незручностями очищення гнутих труб.

У кожухотрубних теплообмінниках з подвійними трубами (рис. 2.2, д) кожний елемент складається з двох труб: зовнішньої – із закритим нижнім кінцем та внутрішньої – з відкритим кінцем. Верхній кінець внутрішньої труби меншого діаметра закріплюють у верхній трубній решітці, а трубу більшого діаметра – у нижній трубній решітці. За таких умов монтажу кожний елемент, який складається з двох труб, може вільно подовжуватися без виникнення теплових напружень. Середовище, що нагрівається, рухається по внутрішній трубі, потім по кільцевому каналу між зовнішньою та внутрішньою трубами.

В апараті з плаваючою камерою закритого типу (рис. 2.2, е) трубний пучок складається з прямих труб, поєднаних двома трубними решітками. Верхню решітку затискують між верхнім фланцем корпусу та фланцем верхньої камери. Нижня трубна решітка не з'єднується з корпусом; вона разом з нижньою камерою трубного простору може

вільно переміщуватися вздовж осі теплообмінника. Ці теплообмінники найбільш досконалі порівняно з іншими апаратами нежорсткої конструкції.

Закріплення кінців труб у трубних решітках (рис. 2.3, *a–e*) часто виконують за допомогою вальцювання. Це з'єднання забезпечує необхідні міцність та щільність за рахунок деформації труби в радіальному напрямку під дією сили, яка створюється вальцювальним інструментом. Для забезпечення осової міцності пучка в отворах трубних решіток виконують не менше двох кільцевих канавок шириною 2,0...3,5 мм та глибиною 0,4...1,0 мм.

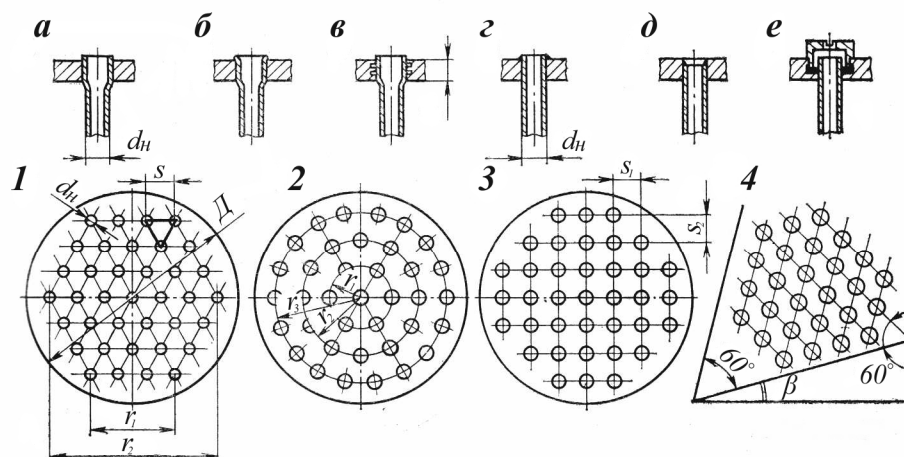


Рис. 2.3. Способи закріплення та розміщення труб у трубних решітках:

*a* – розвальцюванням; *б* – розвальцюванням з відборткуванням; *в* – розвальцюванням з канавками; *г*, *д* – зварюванням; *е* – за допомогою щільника; *1* – по вершинах правильних трикутників; *2* – по концентричних колах; *3* – по вершинах квадратів; *4* – по сторонах та вершинах шестикутників із зміщеною на кут  $\beta$  діагоналлю

Швидкість потоку теплоносія в міжтрубному просторі визначається умовами розміщення труб у трубній решітці. Звичайно живий переріз для проходу теплоносія в міжтрубному просторі у 2,5...3 рази перевищує сумарну величину перерізу труб, тому при рівних об'ємних витратах обох теплоносіїв швидкість потоку в міжтрубному просторі у 2,5...3 рази менша, ніж у трубах. У разі потреби в міжтрубному просторі можуть бути встановлені сегментні або кільцеві перегородки, що зменшують живий переріз та надають додаткову жорсткість трубному пучку. Природно, що при цьому в міжтрубному

просторі буде зростати швидкість потоку, виникає поздовжньо-поперечне омивання пучка труб, покращаються умови теплообміну.

Передовою технологією закріплення труб є їх вальцювання вибухом. При цьому вибуховий заряд розташовують усередині труби в товщі трубної решітки. За допомогою детонатора заряд підривають. Якість такого з'єднання перевищує ту, що може бути одержана звичайним вальцюванням.

Зварювання труб з трубною решіткою може виконуватися швом «валиком» та «валиком з канавкою». Тонкостінні труби приварюють до трубної решітки зубчатим швом. У рідинно-рідинних теплообмінниках, і водо-водяних зокрема, робоче середовище з меншою витратою за одиницю часу (або з більшою в'язкістю) доцільно спрямовувати у внутрішній контур, хоча в деяких випадках можуть бути відхилення від цього правила, наприклад у апаратах для охолодження мастил.

У парорідинних теплообмінниках, особливо при підвищених параметрах пари, спостерігається велика різниця між температурами стінок та корпусу. Тому для таких випадків нагрівання рідини найчастіше використовують апарати нежорсткої конструкції, за винятком конденсаторів пари, які працюють під вакуумом. Пара, як правило, подається в міжтрубний простір зверху, а рідина – у труби знизу вгору. Конденсат відводиться з нижньої частини корпусу через пристрій відводу конденсату. Обов'язковою умовою, яка забезпечує нормальну роботу паро-рідинного теплообмінника, є відведення газів, що не конденсуються, з верхньої частини міжтрубного простору та нижнього об'єму над поверхнею конденсату. Якщо цього не робити, значно погіршаться умови теплообміну на поверхні труб, суттєво зменшиться продуктивність апарата.

Велика кількість видів кожухотрубних теплообмінних апаратів виготовляється серійно спеціалізованими заводами, тому в багатьох випадках є можливість вибрати теплообмінник, що відповідає розрахунковим характеристикам, за каталогами.

**Секційні теплообмінники.** Складаються з послідовно з'єднаних секцій, кожна з яких являє собою невеликий кожухотрубний теплообмінник з однією або декількома трубами, розміщеними в циліндричному корпусі невеликого діаметра (рис. 2.4, *а, б*). У секційних апаратах, порівняно простих конструктивно, навіть без внутрішніх

перегородок, створюються сприятливі умови теплообміну. Корпус, камери та з'єднувальні патрубки (так звані «калачі»), як правило, виконують із суцільнотягнутих сталевих труб нормального сортаменту. Корпус виготовляють з труб довжиною 4...5 м діаметром від 50 до 350 мм. Трубний пучок збирають з 4...150 латунних або мідних труб діаметром 16×2 мм з поверхнею теплообміну в одній секції від 0,75 до 30 м<sup>2</sup>.

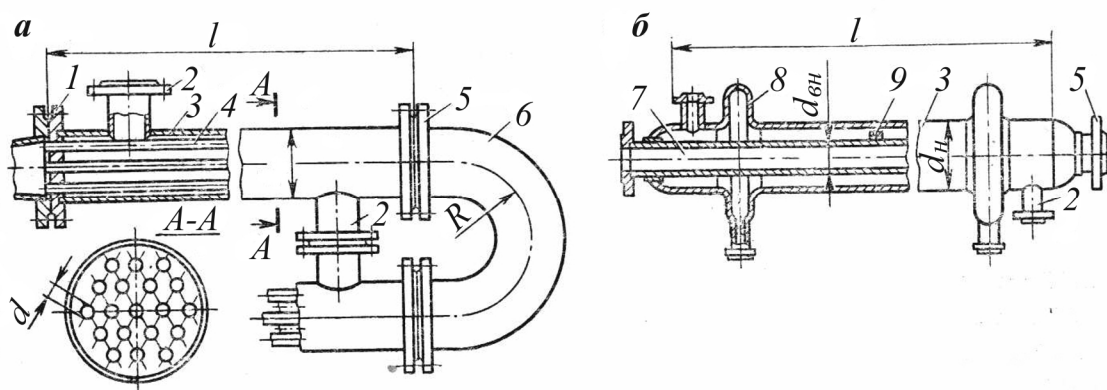


Рис. 2.4. Секційні теплообмінники:

- a* – багатотрубний; *б* – двотрубний типу «труба в трубі»; 1 – трубна решітка;  
 2 – з'єднувальний патрубок; 3 – зовнішня труба; 4 – внутрішні труби; 5 – фланець;  
 6 – з'єднувальний патрубок («калач»); 7 – внутрішня труба; 8 – компенсатор;  
 9 – центрувальні елементи

Для невеликої теплової продуктивності, невеликого об'єму теплоносіїв та високого тиску доцільно застосовувати двотрубні теплообмінники (типу «труба в трубі»). Це розширює можливості підбору максимально допустимих швидкостей потоку теплоносіїв як у внутрішній трубі, так і в кільцевому каналі. У секційних апаратах, особливо типу «труба в трубі», можуть нагріватися або охолоджуватися практично будь-які теплоносії, у тому числі високотемпературні, а також водяна пара, газ чи повітря. Якщо теплоносієм, що нагріває, є водяна пара, вона подається в міжтрубний простір верхньої секції, а конденсат відводиться з нижньої секції.

Незважаючи на велику кількість переваг, у теплообмінників цієї групи є і досить вагомні недоліки, насамперед громіздкість та висока вартість поверхні теплообміну через велику кількість корпусів, камер, трубних решіток, фланців, «калачів» та інших деталей. Крім того, велика довжина шляху теплоносіїв з багатьма переходами та



## ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

Цей покажчик має суто предметний характер і відбиває весь текст підручника, крім вступу, передмови й бібліографічного списку. Посилання подаються на сторінки видання, де вводяться терміни й розкриваються істотні сторони їх змісту.

Алфавітне розташування – «слово за словом».

### Апарати:

- безперервної дії 7, 17
- варильні 105
- періодичної дії 7, 103
- реакційні 104
- з виносним підігрівом 104
- теплообмінні:
  - газо-газові 7
  - газорідинні 7
  - гладкопластинчасті 9
  - гладкотрубчасті занурені 18
  - зрошувальні 17
  - секційні 23
  - змійовикові 17
  - кожухотрубчасті 19
  - перехресноточні 10, 47
  - пластинчасті реберні 32
  - протиточні 10, 47
  - прямоточні 10, 47
  - регенеративні, тепловий розрахунок 117
  - змішувальні 142
  - безнасадкові 147
  - з насадкою 145
- порожнисті 149
- класифікація 6

- матеріали конструктивні 161
- обладнання допоміжне 232
- рекуперативні 17
- безперервної дії 17
- зрошувальні 17
- з несталим тепловим режимом 103
- з усталеним тепловим режимом 17
- періодичної дії 103
- розрахунок:
  - гідравлічний 162
  - елементів на міцність 167
  - конструктивний 50, 61
  - перевірний 89
  - тепловий 43
- стільникові 11
- спіральні 29
- струминні 144
- Юнгстрема 128

### Баланс сушильної установки 191

- – – матеріальний 192
- – – тепловий 193
- Баки для збирання конденсату 232
- Бризковіддільники 243

**Вода** гаряча як теплоносій 12

Волога вільна 181

– гігроскопічна 186

– зв'язана 181

– – фізико-механічно 181

– – фізико-хімічно 181

Вологовміст матеріалу 185

**Градирня** 142

**Денце** плоске 173

Димові гази як теплоносії 13

Діаметр еквівалентний 31

Діаметр корпусу теплообмінника 50

Днище еліптичне опукле 172

**Електрична енергія** як теплоносій 15

**Залежність температури та інтенсивності сушки** від виходу вологи з матеріалу 186

– вологовмісту і швидкості сушки в часі 186

Заглушки 173

**Інтенсивність випарювання** при сушінні 182

**Камера** для сушіння піску у псевдозрідженому шарі 224

Кінетика сушіння 181

Коефіцієнт:

аккумуляції 131

дифузії водяної пари в повітрі 184

корисної дії теплообмінного апарата 41

масообміну при сушінні 182

місцевих опорів 165

міцності 169

опору тертя 163

ребріння 25

тепловіддачі конвективний 49

теплопередачі теплообмінника 45

Конденсатовідвідники 232

Конденсатори струминні змішувальні 143

Концентрація леткого компонента 255

Крива швидкості сушіння 186

**Механічне зневоднювання** 177

Мийна машина 122

**Нагрівачі-акумулятори** 104

Напір температурний середньологарифмічний 46

Насадки:

змішувальних теплообмінників 147

регенераторів 128

**Опір:**

гідравлічний (аеродинамічний) 129

місцевий 163

прискорення 163

пучків труб 93

самотечі 163

тертя 163

**Пара** водяна насичена як теплоносій 11

Перегонка 255

Пилоуловлювачі 239

Пластини теплообмінників 9

Поверхня теплообміну 8

Повітря як теплоносій 13

Порозність 137

Продукти згорання як теплоносії 13

Псевдозріджений шар 136

**Реактори з кожухом** 107

Регенератори:

з нерухомою насадкою 127

з рухомою насадкою 129

Ректифікація 254

Розміщення труб у пучках 57, 67, 165

Розрахунок теплообмінників (метод):

гідравлічний 162

графоаналітичний 83

механічний 167

тепловий 43

конструктивний 50, 61

перевірний 89

**С**крубери:

безнасадкові 149

з насадкою 155

Суміші:

багатокомпонентні 257

бінарні 256

взаємонерозчинні 257

розчинні 257

Схеми руху теплоносіїв:

перехресноточні 47

протиточні 47

прямоточні 47

складні 47

**Т**емпературний напір 45

Теплова труба 260

Теплоємність повна (водяний еквівалент) 44

Теплоносії:

високотемпературні 14

вода 11

водяна пара 12

димові гази 13

повітря 13

суспензії 13

сушильні агенти 177

Термосифон 263

Трубна дошка 20

**У**становки сушильні атмосферні:

барабанні 221

для сушіння в електричних полях 229

з псевдозрідженим шаром 222, 224

камерні 219

конвеєрні 218

коридорні (тунельні) 219

конвективні безперервної дії 215

– періодичної дії 217

**Ф**орми зв'язку вологи з матеріалом 181

Фазовий стан речовини 10

**Х**арактеристики гідравлічні (аеродинамічні) теплообмінників 163

Хід теплоносія у теплообміннику 9

**Ш**туцер 241

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
ТЕПЛОМАСООБМІННІ АПАРАТИ ТА ТЕПЛОНОСІЇ .....	6
1.1. Класифікація теплообмінних апаратів .....	6
1.2. Теплоносії.....	10
РЕКУПЕРАТИВНІ ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ .....	17
2.1. Конструкції трубчастих, пластинчастих та спіральних апаратів поверхневого типу .....	17
2.2. Особливості роботи теплообмінників на локомотивах .....	34
2.3. Фактори, що визначають вибір теплообмінників.....	37
2.4. Тепловий розрахунок рекуперативних апаратів при незмінному фазовому стані теплоносіїв .....	43
2.4.1. Загальні положення.....	43
2.4.2. Середній температурний напір .....	46
2.4.3. Коефіцієнт теплопередачі.....	49
2.4.4. Визначення конструктивних розмірів теплообмінників .....	50
2.4.5. Вибір розрахункових формул для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі .....	55
2.4.6. Розрахунок міжтрубного простору за наявності перегородок .....	60
2.5. Особливості теплового розрахунку рекуперативних апаратів при зміні фазового стану теплоносіїв.....	76
2.6. Перевірний розрахунок теплообмінних апаратів .....	89
2.7. Компактні апарати з ребристими поверхнями нагріву .....	88
ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ З НЕСТАЛИМ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ .....	103
3.1. Рекуперативні апарати періодичної дії .....	103
3.2. Тепловий розрахунок рекуперативного теплообмінного апарата з несталим режимом .....	108
3.2.1. Розрахунок апарата, що працює без зміни фазового стану гріючого теплоносія .....	108
3.2.2. Розрахунок апарату, що працює зі зміною фазового стану гріючого середовища .....	111
3.2.3. Визначення коефіцієнта теплопередачі для водонагрівачів-акумуляторів .....	113

3.3. Приклади теплотехнічного устаткування підприємств залізничного транспорту. Мийні машини .....	122
3.4. Регенеративні теплообмінники .....	126
3.5. Теплові розрахунки регенераторів .....	130
3.6. Апарати з киплячим шаром .....	136
АПАРАТИ ЗІ ЗМІШУВАННЯМ ТЕПЛОНОСІЇВ .....	142
4.1. Змішувальні апарати безперервної дії .....	142
4.2. Тепловий розрахунок порожнистого безнасадкового скрубера .....	149
4.3. Тепловий розрахунок скрубера з насадкою .....	155
КОНСТРУКТИВНІ МАТЕРІАЛИ. ГІДРАВЛІЧНІ ТА МЕХАНІЧНІ РОЗРАХУНКИ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ .....	161
5.1. Матеріали для теплообмінних апаратів .....	161
5.2. Гідравлічні розрахунки теплообмінників .....	162
5.3. Розрахунок на міцність елементів теплообмінних апаратів .....	167
ФІЗИЧНІ ОСНОВИ СУШІННЯ МАТЕРІАЛІВ .....	177
6.1. Загальні відомості .....	177
6.2. Кінетика та динаміка сушіння .....	181
6.3. Розрахунки конвективних сушарок з одноразовим використанням гарячого повітря .....	191
6.4. Деякі варіанти сушіння матеріалів нагрітим повітрям .....	199
6.5. Сушіння матеріалу продуктами згорання палива .....	206
6.6. Деякі типи та конструкції сушарок .....	215
ДОПОМІЖНЕ ОБЛАДНАННЯ ТЕПЛООБМІННИХ ТА СУШИЛЬНИХ УСТАНОВОК .....	232
7.1. Пристрої для відведення конденсату, баки .....	232
7.2. Брудоочисні пристрої, насоси .....	234
7.3. Пилоочисні пристрої .....	239
7.4. Обладнання для переміщення рідин .....	241
7.5. Бризковіддільники .....	243
ВИПАРНІ ТА ПЕРЕГІННІ УСТАНОВКИ .....	246
8.1. Основні відомості про випарні установки .....	246
8.2. Загальні відомості про перегонку рідин .....	253
ТЕРМОСИФОНІ ТА ТЕПЛОВІ ТРУБИ .....	259
9.1. Теплові труби .....	259
9.2. Термосифони .....	262
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	265
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК .....	266

Навчальне видання

**Христян Євген Васильович**  
**Титаренко Ігор Валерійович**

**Теплотехнологічні процеси  
та установки  
на залізничному транспорті**  
Навчальний посібник

Редактор *О. О. Котова*  
Комп'ютерна верстка *О. М. Гончаренко*

Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Ум. друк. арк. 15,69. Обл.-вид. арк. 15,74.  
Тираж 300 пр. Зам. №

Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 р.

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:  
Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,  
вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, 49010