**Котлові установки**

Комплекс пристроїв, призначенних для одержання водяної пари або гарячої води підвищеного тиску за рахунок теплоти, виділяємої при спалюванні палива або підвідної від сторонніх джерел (звичайно з горючими газами), називають **котлами**. Вони діляться відповідно на котли парові й котли водогрійні. котли, що використають (тобто що утилізують) теплоту газів, що відходять із печей, або інших основних і побічних продуктів різних технологічних процесів, називають **котлами-утилізаторами**.

З метою забезпечення стабільної й безпечної роботи котла його постачають допоміжним устаткуванням, що служить для підготовки й подачі палива, повітря, очищення й подачі води, відводу продуктів згоряння і їхніх очищень від золи й токсичних домішок, видалення золошлакових залишків.

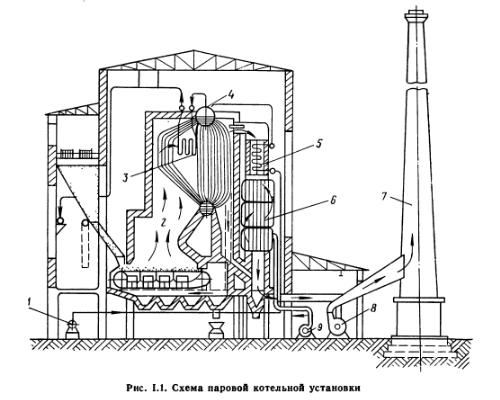
Комплекс пристроїв, що включає в себе котел і допоміжне устаткування, називають **котловою установкою**.

Котлова установка складається з котлоагрегату (котла) та допоміжного обладнання: газо- і повітропроводів, трубопроводів пари і води з арматурою, тягодуттєвих пристроїв та ін..

Головними частинами котлоагрегату є топка і газоходи, в яких розміщені пароперегрівач, водяний економайзер, повітропідігрівник, що сприймають теплоту продуктів згорання палива. Елементи котла спираються на його каркас і захищені від втрат теплоти обмурівкою котла, футеровкою та ізоляцією.

Котли застосовують на ТЕС (енергетичні) для постачання пари для турбін, в промислових та опалювальних котельнях для вироблення пари та гарячої води на технологічні і опалювальні потреби. Паровий котел призначений для вироблення пари, водогрійний - гарячої води [6].

Конструкція котлоагрегату залежить від його призначення, виду і способу спалювання застосовуваного палива (рис. 1.28, 1.29), теплопродуктивності, від тиску і температури пари, що виробляється.



1 – живильний насос; 2 – топка; 3 – екрани з труб; 4 – барабан-сепаратор;

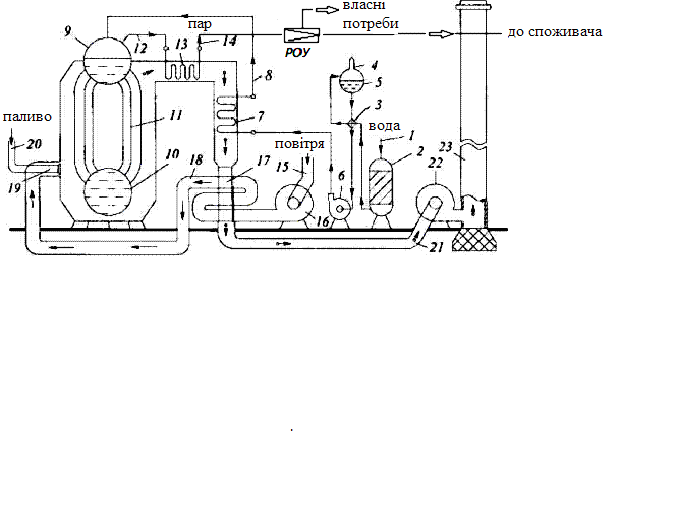
5 – водяний економайзер; 6 – повітропідігрівник; 7 – димова труба;

8 – димосос; 9 – дуттєвий вентилятор для подачі повітря

Рисунок 1.28 – Котельна установка, що працює на твердому паливі

У *топці* котла відбуваються згорання палива і часткове охолодження продуктів згорання в результаті променистого теплообміну між нагрітими газами і трубами, що покривають стіни топки, по яких циркулює пароводяна суміш або нагрівається вода. Система цих труб називається топковим екраном. На виході з топки гази мають температуру близько 1000 °С. [6]

Далі по ходу газів встановлюють пароперегрівачі і конвективні поверхні нагрівання, розміщують водяний економайзер і повітропідігрівник. Гази (залежно від виду палива, що спалюється) охолоджуються до температури 130-170 °С. Після котлоагрегату гази, пройшовши пристрої очищення від золи і в деяких випадках від сірки, викидаються димарем в атмосферу. Тверді продукти згоряння палива видаляються через системи золо- і шлаковидалення. Для підтримки поверхонь нагріву в чистоті передбачають комплекс обмивальних і обдувочних апаратів котлів, що періодично включаються, дробоочищувальній установки і пристроїв для вібраційного очищення котла.



1 – подача живильної води; 2 – фільтр; 3 –зворотний клапан; 4 – деаератор для видалення розчиненого у воді повітря; 5 – вода у деаераторі; 6 – живильний насос; 7 - водяний економайзер; 8 – подача підігрітої води до барабану; 9 – верхній барабан; 10 – нижній барабан; 11 – топічні екрани; 12 – подача пари до пароперегрівачу; 13 – пароперегрівач; 14 – подача перегрітої пари; 15 – подача повітря; 16 – вентилятор; 17 – повітропідігрівник; 18 – подача підігрітого повітря; 19 – пальник або форсунка; 20 – подача палива; 21 – газохід димових газів;

22 – димосос; 23 – димова труба.

РОУ – редукційна установка для зниження параметрів пари до необхідних.

Рисунок 1.29 – Котельна установка, що працює на рідкому або газовому паливі

За характером руху робочого середовища котельні агрегати бувають з багаторазовою природною або примусовою (за допомогою насосів) циркуляцією і прямоточні.

**Тепловий баланс парового котла. Коефіцієнт корисної дії. *Тепловий баланс*** котельного агрегату встановлює рівність між кількістю теплоти, що поступає до агрегату і її витратами. Тепловий баланс складається на 1 кг твердого або рідкого палива або на 1 м3 газоподібного.

Рівняння теплового балансу для сталого теплового стану агрегату записують так:

*Qpp = Q1 +* Σ*Qn,* (1.202)

де *Qpp* - теплота, яку маємо, кДж/кг (кДж/м3);

*Q*1 - корисно використана теплота, кДж/кг (кДж/м3);

Σ*Qn* - втрати теплоти, кДж/кг (кДж/м3).

Ліва частина рівняння (1.137) показує приход тепла, вона є сумою таких частин:

*Qpp = Qнp + QТ + QВ+ Qnар*, (1.203)

де *Q*т - фізична теплота 1 кг або 1 м3палива, кДж/кг (кДж/м3);

*Q*в - фізична теплота повітря, що вноситься на 1 кг (м3) палива, кДж/кг (кДж/м3);

*Qnар* - теплота, що вноситься в топку з дуттєвою (форсунковою) парою на одиницю палива, кДж/кг (кДж/м3).

Теплота *Q*в враховується, коли повітря нагрівається поза котельного агрегату, або не нагрівається зовсім. Коли повітря нагрівається тільки у повітропідігрівнику, ця теплота не враховується, тому що вона повертається до топки. Теплота *Qnар* враховується, коли застосовується водяна пара для розпилення, наприклад, мазуту.

Теплота , сприйнята водою й парою в казані, може бути визначена з рівняння

 (1.204)

де  й - ентальпії перегрітої пари й живильної води, кДж/кг.

 - витрата палива, кг;

D – паропродуктивність, кг/с.

Величина  взята у частках одиниці.

Втрати теплоти є сумою таких складових:

Σ*Qn = Q2 + Q3 + Q4 + Q5 + Q6 ,* (1.205)

де *Q*2 - втрати теплоти з газами, що відходять (димовими), кДж/кг (кДж/м3);

*Q*3 - втрати від хімічного недопалу, кДж/кг (кДж/м3);

*Q*4 - втрати від механічного недопалу, кДж/кг (кДж/м3);

*Q*5 - втрати теплоти в навколишнє середовище через огороджувальні конструкції котла, кДж/кг (кДж/м3);

*Q*6 - втрати з фізичної теплотою шлаку, кДж/кг (кДж/м3).

Втрати тепла *Q*3 мають місце при неповному згорання палива. Наприклад, якщо частина вуглецю палива згорає не до СО2, а до СО, тепла при цьому утвориться декілька менше. Втрати *Q*4 характерні для твердого палива, коли не всі його куски згорають повністю.

Прирівнюючи прибуткову і витратну частини, одержуємо:

*Qнp + QТ + QВ+ Qnар* = *Q1 +* *Q2 + Q3 + Q4 + Q5 + Q6*. (1.206)

Якщо праву частину рівняння розділити на *Qpp* і помножити на 100%, отримаємо інший вид рівняння теплового балансу:

*q1 + q2 + q3 + q4 + q5 + q6  =* 100%, (1.207)

де *q1* - к.к.д. установки «брутто», який не враховує витрати енергії на обслуговування самої котельної установки, %. Враховує ці витрати к. к. д. «нетто».Для сучасних котлів к. к. д. «брутто» становить 80…96%. Чим більше потужність котла, тим більше значення *q1*. Для котлів. що працюють на природному газі, к. к. д. «брутто» більше, ніж у котлів, що працюють на твердому паливі [6];

*q2 -* найбільші теплові втрати котельної установки, вони лежать у межах 4…12% [6]. Значення *q2* залежать від потужності котла (чим потужніший котел, тим менше *q2* ), палива і ефективності утилізації тепла і можуть бути розраховані за рівнянням:

, (1.208)

де *І*в – ентальпія газів, що відходять, Дж/кг;

*І*хп - ентальпія холодного повітря на вході в котлоагрегат, Дж/кг.

*q3* - теплові втрати котельної установки, що залежать від способу спалювання палива; *q3 =* 0…1% - при спалюванні твердого палива; *q3=*0,15% - при спалюванні газу чи мазуту з малим надлишком повітря (α≤ 1,05); якщо α>1,05, *q3 =* 0%; при спалюванні суміші газів з різною теплотою згорання *q3 =* 0,5% [6];

*q4* - втрати від механічного недопалу, які характерні для твердого палива. Можуть досягати при спалюванні пиловидного палива: 5% - для антрациту, для кам’яного вугілля – 1…2%, для торфу – 0,5%. При спалюванні кускового палива ці втрати складають 1…10%. При спалюванні газу або мазуту *q4 ≈* 0% [6];

*q5* - втрати тепла , які зменшуються з ростом потужності котла; *q5=*0,4…4%. Для котлів малої паропродуктивності до 2,9 кг/с - *q5=*2…4%, до 16,7 кг/с - *q5=*1…2%, при більшої паропродуктивності *q5=*0,4…1% [6];

*q6* - втрати, які мають місце тільки при спалювання твердого палива; *q6=*0…0,5%. При застосуванні рідкого шлаковидалення вони більше, ніж при твердому [6].

**1.3.4 Парові турбіни**

***Парова турбіна*** - тепловий двигун, в якому енергія пари перетворюється в механічну роботу.Парова турбіна складається з двох основних частин. Ротор з лопатками - рухома частина турбіни. Статор з соплами - нерухома частина.

У лопатковому апараті парової турбіни потенційна енергія стисненої і нагрітої водяної пари перетворюється в кінетичну, яка в свою чергу перетворюється в механічну роботу - обертання валу турбіни.

Пар від парового котельного агрегату надходить через направляючі апарати на криволінійні лопатки, закріплені по колу ротора, і діючи на них, призводить ротор в обертання.

Парова турбіна є одним з елементів паротурбінної установки (ПТУ).Парова турбіна і електрогенератор складають турбоагрегат.

По напрямку руху потоку пари розрізняють аксіальні парові турбіни, у яких потік пари рухається уздовж осі турбіни, і радіальні, напрямок потоку пари в яких перпендикулярний, а робочі лопатки розташовані паралельно осі обертання.

За кількістю циліндрів турбіни підрозділяють на одноциліндрові, двох-трьох-, чотирьох- та п'ятициліндрові. Багатоциліндрові турбіна дозволяє використовувати великі теплові перепади ентальпії, розмістивши велике число ступенів тиску, застосувати високоякісні матеріали у частинах високого тиску і роздвоєння потоку пари в частинах середнього та низького тиску. Така турбіна виходить більш дорогою, важкою і складною. Тому багатокорпусні турбіни використовуються в потужних паротурбінних установках.

За кількістю валів розрізняють одновальні, двохвальні, рідше трьохвальні, пов'язаних спільністю теплового процесу або загальною зубчастою передачею (редуктором). Розташування валів може бути як коаксіальним, так і паралельним з незалежним розташуванням осей валів.

Нерухому частину - корпус (статор) - виконують рознімної в горизонтальній площині для можливості виїмки або монтажу ротора. У корпусі є виточки для установки діафрагм, роз’їм яких збігається з площиною роз'їму корпусу турбіни. По периферії діафрагм розміщені соплові канали (решітки), утворені криволінійними лопатками, залитими в тіло діафрагм або привареними до нього.

У місцях проходу вала крізь стінки корпусу встановлені кінцеві ущільнення для попередження витоків пари назовні (з боку високого тиску) і засмоктування повітря в корпус (з боку низького тиску). Ущільнення встановлюють в місцях проходу ротора крізь діафрагми щоб уникнути перетоків пари з рівня в рівень в обхід соплів.

На передньому кінці вала встановлюється граничний регулятор (регулятор безпеки), що автоматично зупиняє турбіну при збільшенні частоти обертання на 10-12% понад номінальну [7].

Залежно від характеру теплового процесу парові турбіни поділяються на 3 основні групи:

• конденсаційні - без регульованих (з підтриманням тиску) відборів пари;

• теплофікаційні - з регульованими відборами;

• турбіни спеціального призначення.

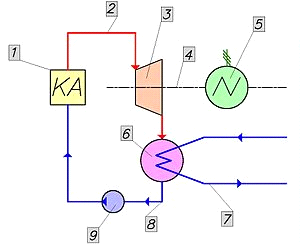
***Конденсаційні парові турбіни.*** Конденсаційні парові турбіни служать для перетворення максимально можливої частини теплоти пари в механічну роботу. Вони працюють з випуском (вихлопом) відпрацьованої пари в конденсатор (звідси виникло найменування), в якому підтримується вакуум. Конденсаційні турбіни бувають стаціонарними і транспортними.

Стаціонарні турбіни виготовляються на одному валу з генераторами змінного струму. Такі агрегати називають турбогенераторами. Теплові електростанції, на яких встановлені конденсаційні турбіни, називаються конденсаційними електричними станціями (КЕС). Основний кінцевий продукт таких електростанцій - електроенергія. Лише невелика частина теплової енергії використовується на власні потреби електростанції і, іноді, для постачання теплом довколишнього населеного пункту. Зазвичай це селище енергетиків. Доведено, що чим більше потужність турбогенератора, тим він економічніше, і тим нижче вартість 1 кВт встановленої потужності. Тому на конденсаційних електростанціях встановлюються турбогенератори підвищеної потужності [7].

В залежності від призначення парові турбіни електростанцій можуть бути базовими, що несуть постійне основне навантаження; піковими, короткочасно працюючими для покриття піків навантаження; турбінами власних потреб, що забезпечують потребу електростанції в електроенергії. Від базових потрібна висока економічність на навантаженнях, близьких до повного (близько 80%), від пікових - можливість швидкого пуску і включення в роботу, від турбін власних потреб - особлива надійність в роботі. Парові турбіни для електростанцій мають парковий ресурс в 270 тис. год. З міжремонтним періодом 4-5 років.

Транспортні парові турбіни використовуються як головні і допоміжні двигуни на судах. Неодноразово робилися спроби застосувати парові турбіни на локомотивах, проте паротурбовози поширення не отримали. Для з'єднання швидкохідних турбін з гребними гвинтами, які вимагають невеликої (від 100 до 500 об. / хв.) частоти обертання, застосовують зубчасті редуктори. На відміну від стаціонарних турбін (крім турбоповітродувок), суднові працюють зі змінною частотою обертання, що визначається необхідною швидкістю ходу судна [7].

Розглянемо роботу конденсаційної турбіни (рис. 1.30): перегріта (гостра) пара з котельного агрегату (1) по паропроводу (2) потрапляє на робочі лопатки парової турбіни (3). При розширенні кінетична енергія пари перетворюється на механічну енергію обертання ротора турбіни, який розташований на одному валу (4) з електричним генератором (5). Відпрацьована (м'ята) пара з турбіни направляється в конденсатор (6), в якому конденсується шляхом теплообміну з циркуляційної водою (7) ставка-охолоджувача, градирні або водосховища. По трубопроводу (8) конденсат направляється назад в котельний агрегат за допомогою насоса (9). Більша частина отриманої енергії використовується для генерації електричного струму.



1 – котельний агрегат; 2 – перегріта пара; 3 – парова конденсаційна турбіна;

4 – вал; 5 – електрогенератор; 6 – конденсатор; 7 – охолоджувальна вода;

8 – конденсат; 9 – насос.

Рисунок 1.30 – Схема роботи паротурбінної установки з конденсаційною турбіною [6]

***Теплофікаційні парові турбіни.*** Теплофікаційні парові турбіни служать для одночасного отримання електричної та теплової енергії. Теплові електростанції, на яких встановлені теплофікаційні парові турбіни, називаються теплоелектроцентралями (ТЕЦ). До теплофікаційних парових турбін відносяться турбіни з:

• протитиском;

• регульованим відбором пари;

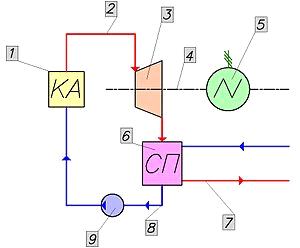
• відбором і протитиском.

У турбін з протитиском весь відпрацьований пар використовується для технологічних цілей (варіння, сушіння, опалення). Електрична потужність, що розвивається турбоагрегатом з такою паровою турбіною, залежить від потреби виробництва або опалювальної системи в гріючій пари і змінюється разом з нею. Тому турбоагрегат з протитиском зазвичай працює паралельно з конденсаційної турбіною або електромережею, які покривають виникаючий дефіцит в електроенергії.

У турбінах з регульованим відбором частина пари відводиться з однієї або двох проміжних ступенів, а решта пари йде в конденсатор. Тиск відібраної пари підтримується в заданих межах системою регулювання (наприклад,може використовуватися регулююча діафрагма за камерою відбору - ряд напрямних лопаток, розрізаних по перпендикулярній осі турбіни площині; одна половина лопаток повертається щодо іншої, змінюючи площу сопел). Місце відбору (щабель турбіни) вибирають залежно від потрібних параметрів пари.

У турбін з відбором і протитиском частина пара відводиться з однієї або двох проміжних ступенів, а вся відпрацьована пара прямує з випускного патрубка в опалювальну систему або до мережевих підігрівників.

Схема роботи теплофікаційної турбіни (рис. 1.31): перегріта (гостра) пара з котельного агрегату (1) по паропроводу (2) направляється на робочі лопатки циліндра високого тиску (ЦВТ) парової турбіни (3).



1 – котельний агрегат; 2 – перегріта пара; 3 – теплофікаційнатурбіна; 4 – вал; 5 – електрогенератор; 6 – підігрівач мережної води; 7 – мережна вода;

8 – конденсат; 9 – насос.

Рисунок 1.31 – Схема роботи паротурбінної установки з теплофікаційною турбіною [6]

При розширенні, кінетична енергія пари перетворюється на механічну енергію обертання ротора турбіни, який з'єднаний з валом (4) електричного генератора (5). У процесі розширення пари з циліндрів середнього тиску здійснюються теплофікаційні відбори і з них пара направляється в підігрівачі (6) мережної води (7). Відпрацьований пар з останнього ступеню потрапляє в конденсатор, де і відбувається його конденсація, а потім по трубопроводу (8) направляється назад в котельний агрегат за допомогою насоса (9). Значна частина тепла, отриманого в котлі використовується для підігріву мережної води.

***Парові турбіни спеціального призначення.*** Парові турбіни спеціального призначення зазвичай працюють на відхідному теплі металургійних, машинобудівних, і хімічних підприємств. До них відносяться турбіни м'ятої (дроселюваної) пари, турбіни двох тисків і передувімкнуті (форшальт).

Турбіни м'ятої пари використовують відпрацьовану пару поршневих машин, парових молотів і пресів, що мають тиск трохи вище атмосферного.

Турбіни двох тисків працюють як на свіжій, так і на відпрацьованій парі парових механізмів, що підводиться в одну з проміжних ступенів.

Передувімкнуті турбіни являють собою агрегати з високим початковим тиском і високим протитиском; вся відпрацьована пара цих турбін направляється в інші турбіни з більш низьким початковим тиском пари. Необхідність в передувімкнутих турбінах виникає при модернізації електростанцій, пов'язаної з установкою парових котлів більш високого тиску, на який не розраховані раніше встановлені на електростанції турбоагрегати.

Також до турбін спеціального призначення відносяться і приводні турбіни різних агрегатів, що вимагають високої потужності приводу. Наприклад живильні насоси потужних енергоблоків електростанцій, нагнітачі і компресори газокомпресорних станцій тощо.

Часто стаціонарні парові турбіни мають регульовані або нерегульовані відбори пари із ступенів тиску для регенеративного підігріву живильної води.

Парові турбіни спеціального призначення не будують серіями, як конденсаційні і теплофікаційні, а в більшості випадків виготовляють за окремими замовленнями.

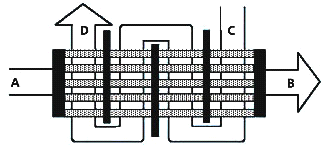
**1.3.5 Рекуператори та регенератори**

**Рекуператор** (від лат. Recuperator - той, що повертає) - теплообмінник поверхневого типу для використання теплоти відхідних газів, в якому теплообмін між теплоносіями здійснюється безперервно через їх стінку, що їхрозділяє. На відміну від регенератора траси потоків теплоносіїв в рекуператорі не змінюються. Рекуператори розрізняють за схемою відносного руху теплоносіїв - протиточні, перехресні, прямоточні та інші; по конструкції - трубчасті, пластинчасті, ребристі, оребрені пластинчасті тощо; за матеріалом виготовлення - металеві, керамічні, пластикові та інші; за призначенням - підігрівачі повітря, газу, рідин, випарники, конденсатори і т. д. [6].

***Кожухотрубні*** рекуператори (рис. 1.32, 1.33). До корпусу, кожуха по торцях приварені трубні решітки, в яких закріплені пучки труб.



Рисунок 1.32 – Кожухотрубний рекуператор [6]



А – вхід гарячого теплоносія; В – вихід гарячого теплоносія; С - вхід холодного теплоносія; D - вихід холодного теплоносія

Рисунок 1.33 – Кожухотрубний рекуператор у розрізі [6]

В основному труби в решітках кріпляться з ущільненням розвальцьовуванням або якимось іншим способом залежно від матеріалу труб і тиску в апараті. Трубні решітки закриваються кришками на прокладках і болтах або шпильках. На корпусі є патрубки (штуцери), через які один теплоносій проходить через міжтрубний простір. Другий теплоносій через патрубки (штуцери) на кришках проходить по трубах. У багатоходовому теплообміннику в корпусі і кришках встановлені перегородки для підвищення швидкості теплоносіїв.

Для збільшення тепловіддачі застосовують оребрення теплообмінних труб, яке виконується або накаткою, або навиванням стрічки. У разі необхідності, конструкція апарату повинна передбачати його очищення.

***Елементні*** рекуператори. Кожен елемент такого апарату являє собою найпростіший кожухотрубний теплообмінник без перегородок. Такі апарати допускають при цьому більш високий тиск. Однак така конструкція виходить більш громіздкою і важкою, ніж кожухотрубний апарат.

***Занурювальні*** рекуператори. У заглибному змійовиковому теплообміннику один теплоносій рухається по змійовику, зануреному в бак з іншим рідким теплоносієм. Швидкість рідини в міжтрубному просторі незначна і, отже, тепловіддача від рідини порівняно невелика. Такі теплообмінники знаходять застосування завдяки своїй простоті і дешевизні в невеликих установках.

Рекуператори типу «***труба в трубі***» (рис. 1.34). Теплообмінний елемент такого апарату складається з циліндричного корпусу, через який проходить труба.

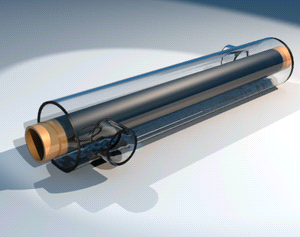
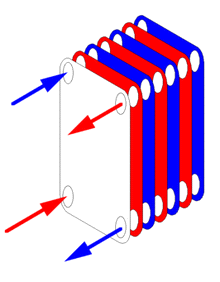
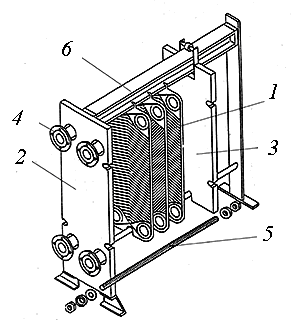


Рисунок 1.34– Рекуператор «труба в трубі» [6]

Корпус обладнаний двома патрубками через котрі підводиться та відводиться один з теплоносіїв. Інший теплоносій проходить через трубу. Ці теплообмінники знаходять собі застосування при невеликих витратах теплоносіїв та при високому тиску.

***Зрошувальні*** рекуператори. Такий тип теплообмінників застосовується головним чином в якості конденсаторів в холодильних установках. Зрошувальний рекуператор являє собою змійовик з горизонтальних труб, розміщених у вертикальній площині у вигляді ряду паралельних секцій. Над кожним поруч знаходиться жолоб, з якого цівками стікає охолоджуюча вода на теплообмінні туби, омиваючи їх зовнішню поверхню. При цьому частина охолоджуючої води випаровується. Вода, що залишилася повертається насосом, а втрати компенсуються з водопроводу. Ці теплообмінники встановлюються на відкритому повітрі і захищаються дерев'яними ґратами, щоб зменшити винесення води.

***Пластинчасті*** рекуператори (рис. 1.35). Такі теплообмінники складаються з набору пластинізштампованими хвилястими поверхнями і каналами для протоку рідини. Пластини ущільнюються між собою гумовими прокладками і стяжками.

1 – пластина; 2 – нерухома плита; 3 – притискна плита; 4 – патрубки для підвода і відводу теплоносіїв; 5 – стяжний болт; 6 - рама

Рисунок 1.35 –Пластинчастий рекуператор [6]

Такий рекуператор простий у виготовленні, легко модифікується (додаються або забираються пластини), його легко чистити, у нього високий коефіцієнт теплопередачі, але його не можна застосовувати при високому тиску.

***Пластинчато-ребристі*** рекуператори (рис. 1.36). Теплообмінник такого типу на відміну від пластинчастого теплообмінника складається з системи розділових пластин, між якими знаходяться ребристі поверхні - насадки, приєднані до пластин методом пайки у вакуумі.

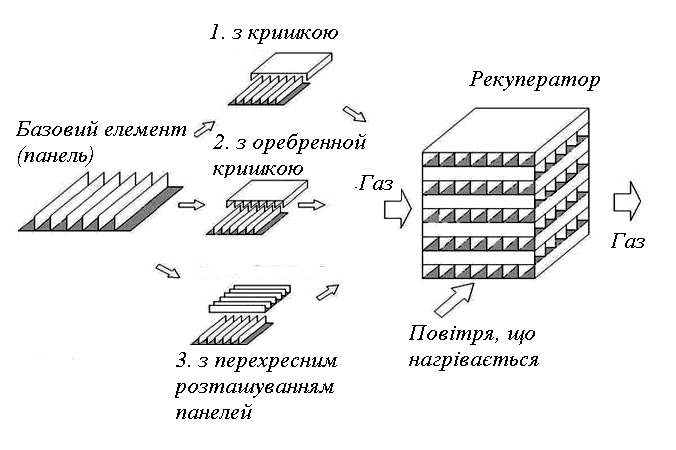
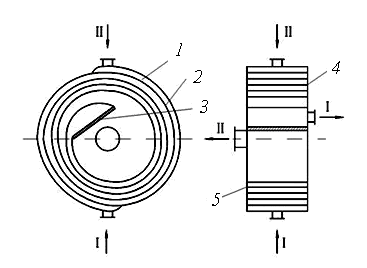


Рисунок 1.36 - Пластинчато-ребристий рекуператор [6]

З боків канали обмежуються брусками, що підтримують пластини і утворюють закриті канали. Таким чином, в основу ребристого пластинчастого теплообмінника покладена жорстка і міцна цільнопаяна теплообмінна матриця, працездатна (навіть у виконанні з алюмінієвих сплавів) до тиску 10 МПа і вище. У пластинчато-ребристих теплообмінниках існує велика кількість насадок, що дозволяє підбирати геометрію каналів з боку кожного з потоків, реалізовуючи оптимальну конструкцію.

Основні переваги даного типу рекуператорів - компактність (до 4000 м²/м³) і легкість. Останнє забезпечується за рахунок застосування при виготовленні теплообмінної матриці пакета з тонколистових деталей з легких алюмінієвих сплавів [6].

***Спіральні*** рекуператори (рис. 1.37). Теплообмінник являє собою два спіральних каналів, навитих з рулонного матеріалу навколо центральної розділювальної перегородки - керна, середовища рухаються по каналах. Одне з призначень спіральних теплообмінників нагрів та охолодження високов'язких рідин.



І – підвід і відвід гарячого теплоносія; ІІ - підвід і відвід холодного теплоносія; 1 – спіральний канал; 2 – металева розподільна спіралеподібна стінка;

3 – керн; 4, 5 – торцеві кришки.

Рисунок 1.37 – Спіральний рекуператор [6]

При виборі між пластинчастими і кожухотрубними рекуператорами кращими є пластинчасті, коефіцієнт теплопередачі яких більш ніж в три рази вищий, ніж у традиційних кожухотрубних. Крім того, у пластинчастих теплообмінників займана площа в 3-4 рази менше, ніж у кожухотрубних. У той же час іноземні пластинчасті теплообмінники, оснащені засобами автоматики, регулювання та надійної арматурою, дозволяють знизити кількість теплоносія, що йде на нагрів води. А значить, можна зменшити і діаметри трубопроводів, запірно-регулюючої арматури, знизити навантаження на мережеві насоси і, відповідно, зменшити споживання електроенергії.

Останнім часом стали з'являтися сучасні вітчизняні кожухотрубні теплообмінники, оснащені трубками, профільованими таким чином, щоб зростання гідравлічного опору ненабагато перевищувало зростання тепловіддачі внаслідок застосування турбулізаторів потоку. Це досягається накаткою на зовнішній поверхні труби кільцевих або гвинтових канавок, внаслідок утворення яких на внутрішній поверхні труби утворюються плавно окреслені виступи невеликої висоти, що інтенсифікують тепловіддачу в трубах. Дана технологія, на додаток до таких важливих показників як висока надійність (також при гідравлічному ударі) і менша вартість, дає такому обладнанню деякі переваги в порівнянні з іноземними пластинчастими аналогами. Недоліком є важкість очищення внутрішніх поверхонь трубок з гвинтоподібними канавками.

Серйозною проблемою є корозія теплообмінників. Для захисту від корозії застосовується газотермічне напилення трубних дощок, труб пароперегрівачів. Це відноситься не тільки до кожухотрубних теплообмінників, виготовлених з вуглецевої сталі. Пластини пластинчастих теплообмінників в переважній більшості виготовляються з корозійностійкої жароміцної сталі, але незважаючи на цей факт також схильні до виразкової корозії при використанні неінгібірованих теплоносіїв.

Залежно від напрямку руху теплоносіїв рекуперативні теплообмінники можуть бути прямоточними при паралельному русі в одному напрямку, протиточними при паралельному зустрічному русі, перехресноточнимипри взаємно перпендикулярному русі двох середовищ а також комбінованими.

У залежності від числа ходів рекуператори бувають одноходові, двоходові, багатоходові по одному чи по обом теплоносіям. На рис. 1.33 зображений перехресноточний рекуператор, чотирьохходовий за холодним теплоносієм і одноходовий за гарячим.

За переважаючим видом теплообміну розрізняють рекуператори конвективні (до 900°С), радіаційні та радіаційно-конвективні, коли частина теплообмінника працює у радіаційному режимі, частина – у конвективному [6].

Максимальна робоча температура визначається матеріалом, з котрого виготовлений рекуператор. На вибір матеріалу також впливають хімічні властивості теплоносіїв. Застосовуються сталь, чавун, вогнетривка кераміка, графіт, пластик, скло.

Теплообмінники для хімічно агресивних середовищ виготовляють з блоків графіту, який просочують спеціальними смолами для усунення пористості. Графіт відрізняється хорошою теплопровідністю. У блоках просвердлюють канали для теплоносіїв. Блоки ущільнюються між собою прокладками з гуми або тефлону і стягуються кришками зі стяжками. Допустима температура 150…180°С. Графітопластові рекуператори працюють з температурою до 130ºС. Скляні апарати застосовуються, як правило, у лабораторних умовах [7].

У металургії широко використовуються сталеві та чавунні теплообмінники. Допустима температура визначається маркою сталі чи чавуну. Для рекуператорів з вуглецевої сталі вона становить 500ºС. Для апаратів з жаростійкого чавуну вона визначається вмістом у чавуні кремнію і складає: при вмісті кремнію 2,3% - 650ºС; 14% - 750ºС; 30% - 900ºС. Легована хромиста сталь може застосовуватися до температури 1200ºС [7].

Рекуператори з вогнетривкої кераміки ставлять після потужних плавильних і нагрівальних печей. Матеріал – шамот (найдешевший), карборунд, шамото-карборунд, магнезит, хромомагнезит. Робоча температура – 1000…1300ºС. Частіше застосовують 2 конструкції керамічних рекуператорів – з круглими або 8-гранними трубами і з фасонних керамічних блоків.

Інтенсифікація тепловіддачі у рекуператорах здійснюється збільшенням швидкості руху теплоносіїв (за рахунок зменшення діаметрів труб або еквівалентного діаметр каналу), вибором схеми руху теплоносіїв (найефективнішій – протиток), збільшенням площі теплообміну шляхом використання розвинутих поверхонь (оребрення, вставки, голчасті труби).

Якщо переважає радіаційний теплообмін, підвищують ступінь чорноти поверхонь.

Як приклад можна навести рекуператор після металургійної печі (мартенівської чи іншої), що застосовуєтьсядля нагріву повітря газами, що відходять. Це металевий, двоходовий по димовим газам, перехресноточний рекуператор. Повітря рухається усередині труб, гази – у міжтрубному просторі, тому щ так легше очищати поверхню від забруднень. Перша частина рекуператору походу газів – радіаційна, друга – конветивна.

Для збільшення швидкості повітря без зменшення діаметру труб (за умов міцності при високих температурах) роблять вставки в труби у вигляді стрижню (рис. 1.38, а) або застосовують подвійні труби (рис. 1.38, б).

а) б)

а - вставки у вигляді стрижню; б - подвійні труби

Рисунок 1.38 – Вставки у труби рекуператора

Повітря спочатку йде по внутрішній трубі, потім – по кільцевому каналу. До переваг рекуператорів належать безперервність дії, постійність температури нагріву, компактність. Недоліки: можливість перетоків, особливо в керамічних рекуператорах, обмеження температури нагріву.

Є два основних типу розрахунку рекуператорів: *конструктивний і перевірочний*. При конструктивному розрахунку визначаються площа та розміри поверхонь теплопередачі (кількість, діаметр та довжина труб) при заданих температурах теплоносіїв. При перевірочному розрахунку розміри поверхонь та початкова температура теплоносіїв задані, треба знайти їх кінцеву температуру.

Розрахунок зводиться до розв´язання двох рівнянь: теплового балансу і теплопередачі.

***Рівняння теплового балансу***:

*Q = G1 (i'1 – i"1) = G2 (i"2 – i'2),* (1.208)

де *Q* - теплота, що передається, Вт;

*G1,* *G2* - витрати відповідно гарячого і холодного теплоносіїв, м3/с (кг/с);

*і* – ентальпія теплоносіїв, Дж/кг (Дж/м3); нижній індекс 1 відноситься до гарячого теплоносія, 2 – до холодного, верхній індекс ´ відноситься до входу, ´´ - до виходу.

Якщо взяти середню теплоємність теплоносіїв *С1,2*, рівняння (1.143) буде мати вигляд:

*Q = G1С1 (t'1 – t"1) = G2C2 (t"2 – t'2)* (1.209)

Тепловий потік *Q*1, відбитий у теплообміннику гарячим теплоносієм при його охолодженні від температури t1' до t1" дорівнює:

*Q*1 = *m*1⋅(*C*p1'⋅*t*1' - *C*p1"⋅*t*1"), кДж (1.210)

де індекс 1 ставиться до гарячого теплоносія;

*m* - масова витрата теплоносія, кг/с;

*Cp'* й *Cp*" - теплоємності відповідно на вході й виході ТОА , кДж/(кг⋅ град);

*t*' й *t*" - температура теплоносія відповідно на вході й виході ТОА, °C.

Через втрати (до 10 %) другому теплоносієві передається не вся теплота *Q*1, а частина її *Q*2 = η⋅*Q*1 (η - ККД теплообмінника).

Тоді рівняння теплового балансу буде мати вигляд:

*Q*2 = η⋅*Q*1  (1.211)

або

 , (1.212)

***Рівняння теплопередачі***. У найпростіших випадках, коли поверхню теплообміну можна вважати плоскою (тонкі стінки трубок рекуперативних ТОА практично завжди вважають плоскими) , можна записати рівняння теплопередачі:

, (1.213)

де *k* – коефіцієнт теплопередачі, Вт/м2·К,

*F* – площа поверхні теплообміну, м2,

*Δt* – температурний напір, К (°С).

Змінювання температурного напору показані на рис. 1.39.

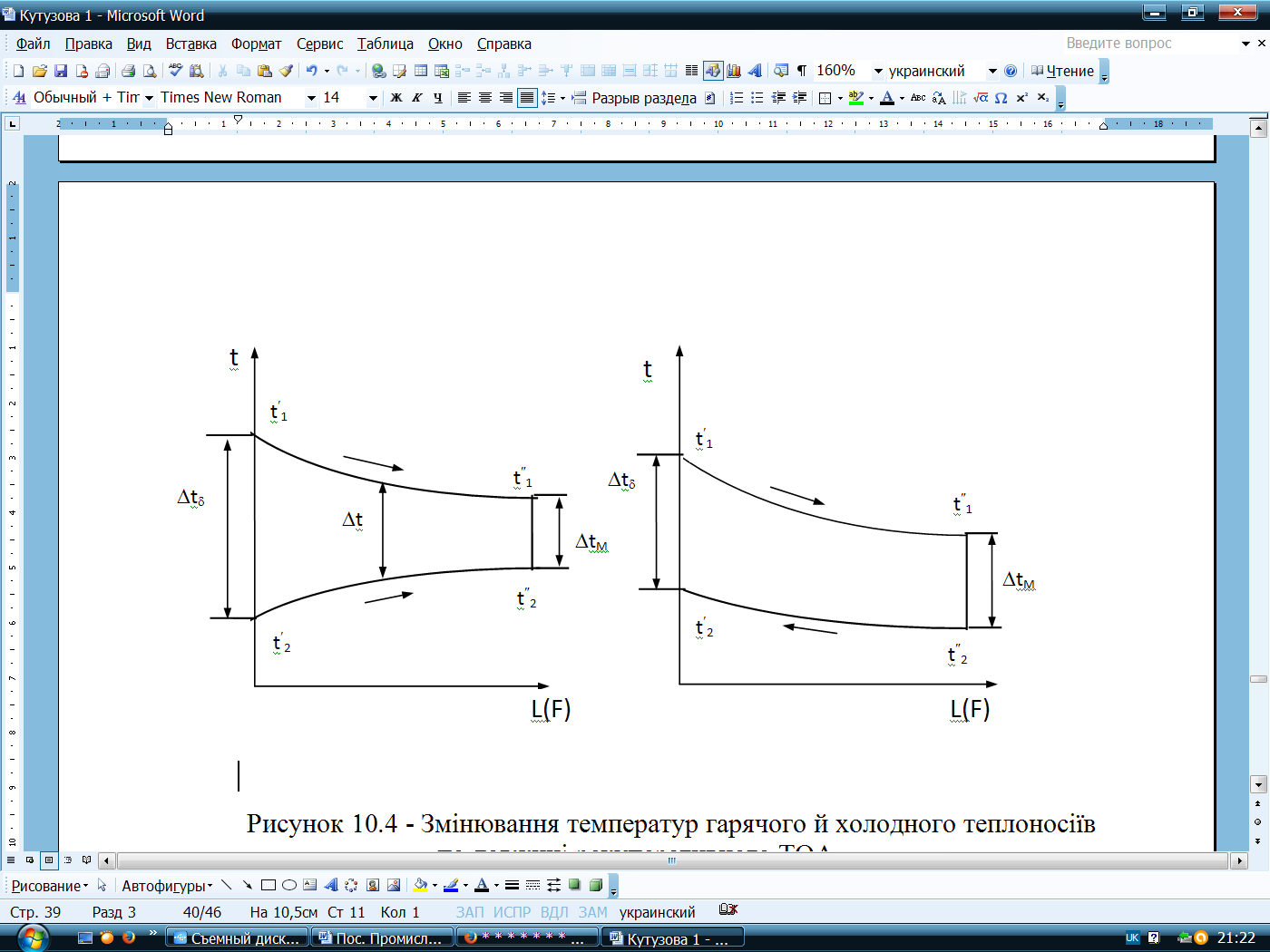


Рисунок 1.39 - Змінювання температур гарячого й холодного теплоносіїв по довжині рекуперативного ТОА

Температурний напір для протитоку визначається за залежністю:

, (1.214)

де  і  – відповідно більша та менша різниця температур теплоносіїв на вході та на виході рекуператору.

Користуватися середньоарифметичним значенням Δ*tcp*= 0,5⋅(Δ*tб*+ Δ*tм*) можна тільки при Δ*tб*/Δ*tм* <= 1,4, коли помилка становить не більше 4 %; що припустимо для технічних розрахунків.

Для інших схем руху:

, (1.215)

де *φ* – коефіцієнт, що залежить від схеми руху теплоносіїв, кількості ходів і відношення різностей температур; φ = 0,5…1 [6].

Варто помітити, що середньологарифмічний напір завжди менше середньологарифмічного: Δ*t* < Δtcp.

Коефіцієнт теплопередачі для плоских поверхонь і тонкостінних труб:

 (1.216)

де  – коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія стінці, Вт/м2·К;

δ – товщина стінки, м;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/м·К;

 - коефіцієнт тепловіддачі від стінки холодному теплоносію, Вт/м2·К.

Коефіцієнт теплопередачі для товстостінних труб, віднесений до зовнішньої поверхні:

 (1.217)

де  та - внутрішній та зовнішній діаметри труб, м.

Коефіцієнт тепловіддачі в загальному випадку можна представити як суму коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією ти випромінюванням:

*α = αк + αв* . (1.218)

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією з досить великою точністю розраховується за критеріальними рівняннями. Якщо великої точності не потрібно, розрахунок можна спростити, використовуючи емпіричну залежність:

*αк = а + b(tп – t0) + c (tп – t0)2 + d (tп – t0)3*, (1.219)

де *a, b, c, d* – емпіричні коефіцієнті; Наприклад, для вертикальної стінки (пластини) *a*= 9,5*, b*= 0,0982*, c*= - 4,74·10-4*, d =* 1,74·10-6 [6];

*tп -* температура поверхні тепловіддачі, К;

*t0* – температура теплоносія, К.

Рівняння (1.155) вірно при тепловіддачі від поверхні до холодного теплоносія, тобто за умови *t↓п* (*t↓0*). При тепловіддачі від гарячого теплоносія до поверхні труби або пластини, вживається різниця *(t0 – tп)*.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням розраховується так:

, (1.220)

де *с*1-2 – приведений коефіцієнт випромінювання, Вт/м2К4:

, (1.221)

де – приведений ступінь чорноти системи;

 - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, =5,67 Вт/м2К4 [7].

Для теплообміну між двома паралельними пластинами з достатньою точністю можна прийняти:

 (1.222)

де  і  – ступені чорноти пластин. Якщо  =  = , маємо:

 (1.223)

Значення ступенів чорноти можна брати: для окисленої сталі 0,8…0,95; для не окисленої сталі 0,56; для вогнетривкої кераміки 0,8…0,9; для чавуна 0,81 [7].

У випадку теплообміну між іншими поверхнями, розрахунок ускладнюється. Якщо відстань між поверхнями значна, треба враховувати ступінь чорноти газів. При теплообміні в пучках труб з малими відстанями між ними, можна, для приблизного розрахунку, користуватися формулою (1.159). При теплообміні між рідинами випромінювання відсутнє, *α=αк.*

**Регенератори*.*** Регенератор (від лат. Regenerare – відроджувати) - теплообмінник, в якому передача теплоти здійснюється почерговим контактом гарячого і холодного теплоносіїв з одними і тими ж поверхнями апарату (насадкою).

Більшість регенераторів – апарати періодичної дії. У першому циклі гарячий теплоносій нагріває насадку, у другому – гаряча насадка нагріває холодний теплоносій. Регенератори служать для нагріву повітря, а іноді – газу. Нагрів повітря може здійснюватися до температури 1300…1400°С, температура гарячого теплоносія (димових газів) – до 1600°С [7]. Матеріали насадок – шамот, шамото-карборунд, динас, магнезит, хромомагнезит та ін.

Регенератори застосовуються у доменному виробництві для нагріву дуття (рис. 1.40), у мартенівському для нагріву повітря, що йде на горіння палива (рис. 1.41), у нагрівальних колодязях (рис. 1.42), у варінні скла тощо.

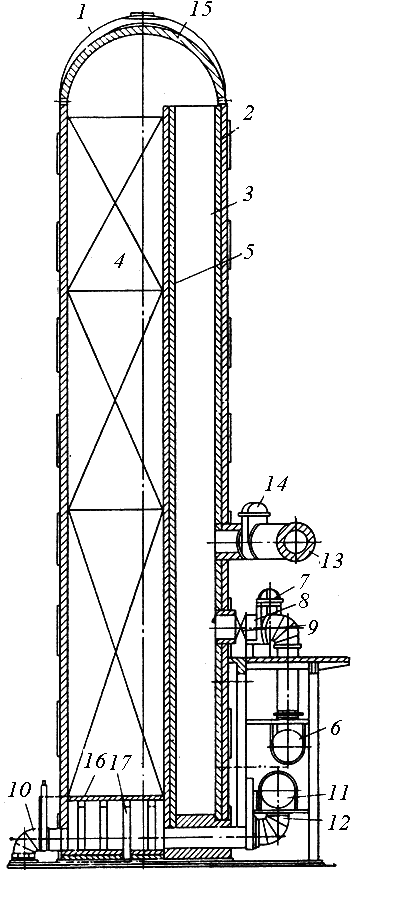
Теплообмін у регенераторах протікає у нестаціонарних умовах, температури теплоносіїв та насадки змінюються у часі. Для забезпечення безперервності процесу треба мінімум дві камери з насадками. Якщо періоди нагріву і охолодження не однакові, встановлюють 3 камери і більше. Наприклад, у доменному процесі два повітронагрівача нагріваються, один – охолоджується.

Застосування регенераторів зв’язано з реверсуванням руху газів, для чого використовуються спеціальні клапани. Приклад укладки насадок регенератора наданий на рис. 1.43. Однією з важливих характеристик насадки є питома поверхня *f*, що показує, яка площа контакту міститься у одиниці об’єму насадки. Для насадки Каупера *f* = 15 м2/м3, для насадки Сименса *f* = 15…19 м2/м3 [7].

Переваги регенераторів: можливість досягнення високої температури нагріву, відсутність перетоків. Недоліки: періодичність дії, непостійність температур теплоносіїв, громіздкість.

Цих недоліків позбавлені регенератори з насадкою, що обертається (рис. 1.44). Вони застосовуються для нагріву повітря у котельних установках. Насадкою служать хвилясті листи, що дозволяють нагрівати повітря до 450°С, або керамічні кульки діаметром 3…5 мм, що працюють при температурі 600°С.

Питома поверхня насадок, що обертається - *f* = 150…200 м2/м3. Регенератори такого типу мають невеликі габарити та масу. З іншого боку для них характерні великі перетоки (навіть більші, ніж в рекуператорах), і невелика робоча температура [7].

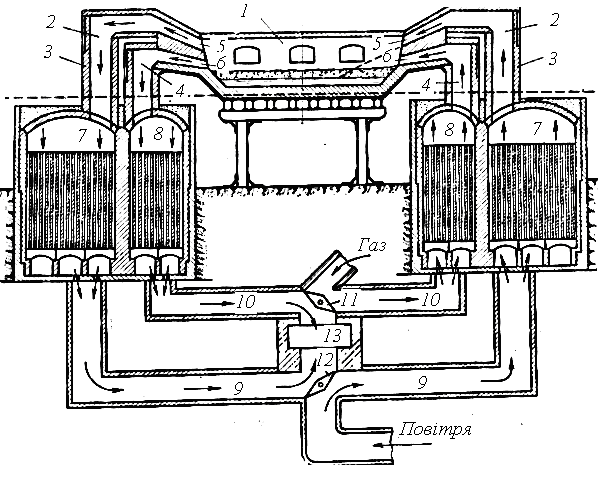


1 - кожух; 2 - кладка; 3 - камера горіння; 4 - насадка; 5 - розділова стіна;

6 - газовий клапан; 7 - відділювальний клапан; 8 - підведення до пальника;

9 - пальник; 10 - димовий клапан; 11 - клапан холодного дуття; 12 - патрубок трубопроводу холодного дуття; 13 - трубопровід гарячого дуття; 14 - клапан гарячого дуття; 15 - футеровка куполу; 16 - литі металеві решітки; 17 - литі металеві колони під насадкою

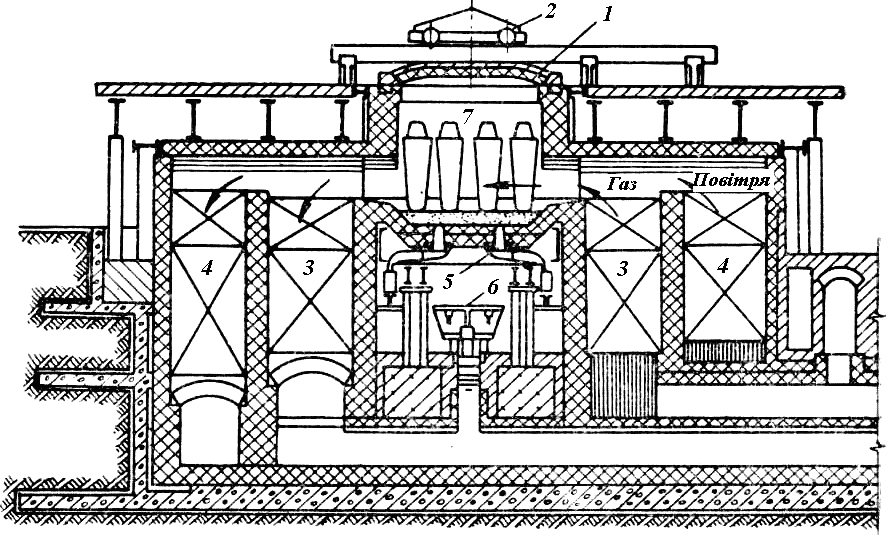
Рисунок 1.40 – Доменний повітронагрівач [7]



1 – робочий простір печі; 2 – газоходи повітряного регенератора; 3 – футерована стінка газоходу; 4 – газоходи газового регенератору; 5 – кесон для подачі повітря; 6 – кесон для подачі газу; 7 – повітряний регенератор; 8 – газовий регенератор;

9 – повітряні лежаки; 10 – газові лежаки; 11 – газовий клапан; 12 – повітряний елапан; 13 – газохід димових газів на трубу

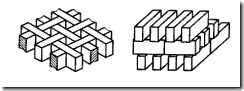
Рисунок 1.41 – Мартенівська піч з регенераторами [7]



1 – кришка; 2 – механізм для пересування кришки; 3 – газовий регенератор;

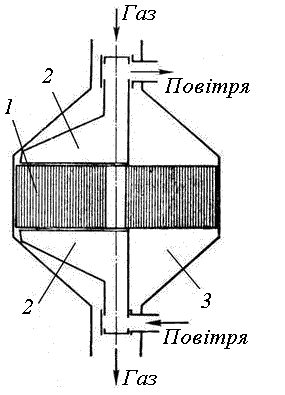
4 – повітряний регенератор; 5 – лючки; 6 – ємність для шлаку; 7 – робочий простір

Рисунок 1.42 – Регенеративний нагрівальний колодязь [7]



а) насадка Каупера б) насадка Сименса

Рисунок 1.43 – Насадки з вогнетривкої цегли [7]



1 – насадка, що обертається; 2 – камера для повітря; 3 – камера для газу

Рисунок 1.44 -Регенератор з насадкою, що обертається [7]