

ВАНЧО АРСОВ
ДОНЧО ПЕТКОВ

ТОПЛОТНА ТЕХНИКА

II година

**РУДАРСКО-ГЕОЛОШКА И
МЕТАЛУРШКА СТРУКА**

Металуришки техничар

Скопје, 2013

Автори:

Ванчо Арсов
Дончо Петков

Рецензии:

Проф. д-р Ташевски Доне - претседател
Дипл. геол. инж. Алексов Данчо - член
Дипл. геол. инж. Гаврилов Блажо - член

Лектура:

Бранка Арсовска

Илустрации:

Ванчо Арсов
Дончо Петков

Корица:

Ванчо Арсов
Дончо Петков

Издавач:

Министерство за образование и наука за Република Македонија

Печайи:

Графички центар довел, Скопје

Тираж: 37

Со одлука бр.22-401/1 од 08.04.2013 на Националната комисија за учебници, се одобрува употреба на учебникот

CIP- Каталогизација во публикација

Национална и универзитетска библиотека „Св. Климент Охридски“, Скопје

669: 622. 6/ .9 (075.3)

ARCOB, Ванчо

Топлотна техника за II година рударско-геолошка и металуршка струка:
металуршки техничар / Ванчо Арсов, Дончо Петков . -Скопје: Министерство за
образование и наука на Република Македонија, 2013. - 124 стр. : илустр. ; 26 см

ISBN 978-608-226-371-7

1. Петков, Дончо [автор]

COBISS.MK-ID 94278410

ПРЕДГОВОР

Учебникот „Топлотна техника“ е наменет за учениците од II година рударско-геолошка и металуршка струка, профил металуршки техничар кои според наставниот план го изучуваат овој наставен предмет како редовен.

Учебникот е работен според програмските содржини дадени во Наставниот план и програма за овој предмет изработен од Бирото за развој на образованието при Министерството за образование и наука на Република Македонија.

Во учебникот се обработени области од Топлотната техника како што се топлина, гасови и пареи, основни термодинамички појави, мерење и регулација, горива и согорување, пренос на топлина и огноотпорни материјали, поради што обемот на содржините е сведен на неопходниот минимум за да учениците од оваа возраст ги стекнат основните знаења од овие сфери, а кои им се неопходни за понатамошно проучување на други предмети од оваа струка.

Во учебникот покрај текстуални содржини дадени се и голем број на слики, задачи и прашања кои учениците при читањето на содржините ќе ги поттикнуваат на активно учење како самостојно така и во групи. При изготвувањето на учебникот се трудеме да ги сочуваме основните критериуми и правила за изготвување на современ учебник за средно училиште.

Голема благодарност и на рецензентите за укажаните забелешки за подобрување на квалитетот на овој учебник.

Авторите

Преглед на ознаките

A - површина, m^2

c - специфичен топлински капацитет, kJ/kgK

c_n - политропски топлински капацитет, kJ/kgK

$c_{p,m}$ - моларен топлински капацитет при $p=const$, $kJ/kmolK$

$c_{v,m}$ - моларен топлински капацитет при $V=const$, $kJ/kmolK$

C_T - топлински капацитет, kJ/K

F - сила, N

G - тежина, N

m - маса на телото, kg

M - моларна маса, $kg/kmol$

n - експонент на политропата

p - притисок, Pa , bar

p_a - апсолутни притисок, Pa , bar

p_b - барометарски притисок, Pa , bar

P_e - моќност, W

q - количина топлина по маса од $1\ kg$, kJ/kg

Q - количина топлина, kJ

R - гасна константа, kJ/kgK

s - специфична ентропија, kJ/kgK

S - ентропија, kJ/K

t - температура, $^{\circ}C$

T - апсолутна температура, K

u - внатрешна енергија по маса од $1\ kg$, kJ/kg

U - внатрешна енергија, kJ

v - специфичен волумен, kg/m^3

V - волумен, m^3

w - работа по маса од $1\ kg$, kJ/kg

W - вкупна работа, kJ

W - енергија, kJ

α - коефициент на пренос на топлина, W/m^2K

K - коефициентот на премин на топлина, W/m^2K

δ - дебелина на сид, m

η_t - термодинамичен коефициент на корисно дејство

λ - коефициент на топлотна спроводливост, W/mK

κ - адијабатски експонент

ρ - густина, kg/m^3

Φ - топлотен проток, kW

1. ТОПЛИНА

1.1 ТЕМПЕРАТУРА, ТОПЛИНА И СПЕЦИФИЧНА ТОПЛИНА

Температурата ја карактеризира топлинската состојба на телата, степенот на нивната загреаност и е една од најважните термодинамички големини. Кога две тела, од кои едното е потопло, се допрат едно до друго веднаш едното почнува да се лади, а поладното да се затоплува. Ова промена ќе постои сè додека нивната температура не се изедначи. Врз основа на ова можеме да речеме дека и двете тела ќе имаат иста топлинска рамнотежа, односно ќе имаат иста температура.

За да имаат две тела иста температура не значи дека тие треба да бидат од иста материја, со ист притисок или со ист волумен. Според тоа, температурата не зависи од составот на телото, туку е параметар кој ја определува топлинската состојба на телото. Се бележи со t [$^{\circ}\text{C}$], а како единица мерка се користи и келвинот кога се работи за апсолутна температура (T) при што $1 [\text{K}] = 1 [^{\circ}\text{C}] + 273,15$.

Кога се менува температурата на телата, кај нив се предизвикува најразлични промени, како: промена на димензиите, промена на агрегатната состојба, промена на електричниот отпор и др. Според толкувањето на молекуларно кинетичката теорија за топлината се заклучува дека, сите наведени промени се резултат на промената на кинетичката енергија на молекулите, односно нивните брзини. Оттука се наметнува толкувањето дека, температурата е споредбена големина на состојбата чија големина е пропорционална со големината на брзината на молекулите.

За разлика од температурата **топлината** претставува енергија која преоѓа од едно тело во друго, таа е дел од внатрешната енергија на телата која преоѓа од телото со поголема на телото со пониска температура. Кога температурите ќе се изедначат, топлината е еднаква на нула.

Распростирањето на топлината се врши со спроведување на топлината (кондукција), струење (конвекција) и зрачење (радијација).

Топлината се бележи со Q , а единица мерка е џул [J].

Може да се пресмета со помош на:

$$Q = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) = m \cdot c \cdot \Delta T$$

m - масата на телата, течнота или гасот [kg];

ΔT - разлика на температурите [K] и

c - специфичен топлински капацитет [J/kgK] или

Равенката може да се искаже и како: топлината е производ на масата, со промената на температурата и специфичниот топлински капацитет на телата.

Ако се разгледува некој одреден состав, неговата топлотна моќ може да биде позитивна, еднаква на нула и негативна:

$Q > 0$ ако енергијата е предадена на системот,

$Q = 0$ ако нема измена на енергија,

$Q < 0$ ако системот предава енергија на околината.

Специфичната топлина е количина на топлина која треба да се доведе на единица количина на некое тело за да температурата на телото порасне за некоја единица температура. Обично се изразува за килограм маса на некое тело и за пораст на температурата од 1 К (келвин), односно за 1 °С, но понекогаш е практично да се изрази за мол на масата.

Различните околности можат да влијаат на промената на специфичната топлина на телата, типична е промената на агрегатната состојба. Исто така, промената на притисокот или волуменот на телата за време на греење (што посебно се гледа кај телата) влијаат на мерењето на специфичната топлина, иако не влијаат нужно или изразено на самиот износ на специфичната топлина. На пример, можеме да ја разгледуваме водата и износот на нејзината специфична топлина во три различни околности:

- ❖ при температура од 100 °С (пара): 2,08 [kJ/kgK];
- ❖ при температура од 25 °С (течност): 4,1813 [kJ/kgK];
- ❖ при температура од -10 °С (мраз): 2,05 [kJ/kgK].

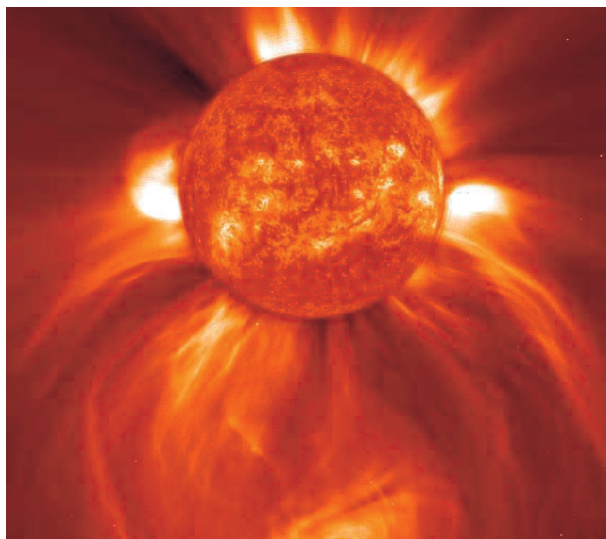
Топлината која е потребна да се доведе за да се промени агрегатната состојба на телата не се вбројува во специфичната топлина, бидејќи температурата на телото за тоа време не расте. Таа топлина се нарекува латентна топлина.

1.2 СОНЦЕ, ВЕТЕР И ВОДА КАКО ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА ШТО СЕ ОБНОВУВААТ

Сите неисцрпни и исцрпни извори на енергија на Земјата ги сочинуваат **енергетските ресурси**. Значењето на една енергетска суровина се одредува по обемот (големината) и по брзината со која може да се стави во експлоатација. На пример, природните фосилни горива се со ограничен обем и со ограничена сила (ограничена брзина на експлоатација), додека пак сончевата енергија е неисцрплива по обем, и во принцип, скоро со неограничена сила. Од друга страна, хидромеханичката енергија е неисцрпен извор, но силата е ограничена од количината на вода и конфигурацијата на земјината површина.

Енергијата на **Сонцето** е најобилен, неисцрпен, бесплатен и обновлив извор на енергија која не ја загадува околната средина, но има два основни недостатоци и тоа: мала густина на енергетскиот флукс и е непостојана. Поради тоа нејзиното користење е поврзано со решавање на

проблемот на концентрација на протокот на сончевото зрачење и акумулацијата на сончевата енергија.



Слика 1.1 Сонцето како извор на енергија

Сонцето е основен извор на енергија. Поради својата огромна површина, која е загреана на висока температура, Сонцето зрачи енергија. Од површината на сонцето за време од 1 min. на секој cm^2 доаѓа топлотна енергија од 4,183 [J]. Протокот на сончевото зрачење даден со вкупниот спектар на електромагнетни бранови изнесува $3,8 \cdot 10^{26}$ [W].

Основата на неговото зрачење се базира на ултравиолетовиот, видливиот и инфрацрвениот дел од спектарот. Вкупната енергија која доаѓа кон Земјата изнесува $1,73 \cdot 10^{17}$ [W]. Од вкупната енергија што ја зрачи Сонцето што доаѓа кон Земјата околу 30% се рефлектира од облаците и честичките во атмосферата и повторно се враќа во вселената, 46,8% се претвора во топлина, 23% се троши за испарување на водата и за создавање врнежи, само 0,2% се троши за создавање на ветровите, морските бранови и морските струи, а само 0,02% од вкупната енергија со процесот на фотосинтеза се троши за создавање на органски материи.

Само од многу мал дел од органските материи, произведени со процесот на фотосинтеза во услови на недостаток на кислород покриени со големи количества песок и варовник, во текот на илјадници години настанале фосилните горива. Процесот на фотосинтеза на Земјата започнал уште пред 3 милијарди години и од него настанал кислород што постои во земјината атмосфера.

Енергијата на движење на воздушните маси се вика **енергија на ветерот**. Вкупната енергија на ветерот се проценува на 10^{21} [J], меѓутоа, заради триењето првенствено во атмосферата, а исто така и со земјината и водената површина, голем дел од оваа енергија неповратно се растура.

Енергијата која може да се добие од ветерот зависи од неговата брзина и од големината на површината на која тој дејствува. Така на пример: расположливата енергија што се добива при дејствување на ветер со брзина од 10 [m/s] на површина од 1 [m^2] изнесува 600 [W], а вистинската

енергија што може да се добие изнесува максимално 60% од расположливата, или 360 [W].



Слика 1.2 Ветероџи како извор на енергија

Едрата и ветерниците претставуваат најстар начин за искористување на енергијата на ветерот. Се смета дека ветерниците настанале во Персија, а дури во текот на 11 век се појавиле во Европа. Ветерниците до неодамна се користеле за пумпање на вода и локално производство на електрична енергија. Пред 25-30 години оваа технологија била практично напуштена, но во последно време интересирањето за искористувањето на енергијата на ветерот почнува да расте. Во изминатите 60 години имало неуспешни обиди за изградба на циновски ветерници (Велика Британија, Русија, САД), но по избувнувањето на енергетската криза во 1974, големите земји, научните, војните и индустриските институции повторно преземаат иницијатива, но до денес сè уште никаде не се забележани значајни резултати, освен за специфична и локална примена.



Слика 1.3 Водаџи како извор на енергија

Хидроенергија ја содржат речните текови, брзите сливови и крајбрежната промена на нивото на морето како што се плимата и осеката и морските бранови. На тековите на големите реки, со релативното мали сезонски промени на протокот, се градат таканаречени проточни централи. Малите реки и поголеми брзи сливови се регулираат така што се собираат во акумалациони езера, од каде што дел од водата се спроведува до пониско геодетско ниво во турбо-агрегати. Опишаните начини претставуваат најраспространет вид на експлатација на хидромеханичката енергија. Неспоредливо помало значење имаат енергијата на плимата и енергијата на морските бранови.

Вкупниот потенцијал на водените текови во светот се оценуваат на 4,5 TW (терават). Само четвртина од овој потенцијал, 1,1 TW може да се искористи за производство на електрична енергија. Во 1975 година 15% од овој потенцијал бил искористен за производство на електрична енергија.

Тричетвртини од искористливиот хидромеханички потенцијал се наоѓа во неразвиените земји или земјите во развој (Африка и Латинска Америка), каде што е искористен само 6%. Другата четвртина од хидропотенцијалот се наоѓа во развиените земји каде што 35% е искористен. Во тек е забрзано приспособување на преостанатиот потенцијал за експлатација, особено во развиените земји.

Енергијата на плимата денес практично се користи само на неколку места во светот при што ќе ја споменеме електраната La Rance од 240 MW (мегават) во каналот Ламанж во Франција. Вистинска реткост се локациите на кои брановите од плимата предизвикуваат бранови со голема амплитуда, и доколку не е така тешко може да се најде економското оправдување за изградба на такви постројки. Принципот на работа е следниот. Во фаза на плима водата ја движи турбината полнежки го акумалациониот базен. Во фаза на осека водата од базенот протекува низ истата турбина (која е реверзибилна), која е така конструирана и во двата случаи да го врти генераторот. Моќноста на турбината е пропорционална на квадратот на амплитудата на брановите на плимата (т.е. квадрат од висината на базенот), површината на базенот и зачестеноста на плимата и осеката. Следи дека специфичните инвестиции на дадена локација (т.е. за дадена амплитуда и период на брановите на плимата) се помали, доколку базенот е поголем, па најчесто се применуваат само инсталации со многу голема моќ, но ваквите локации се ретки.

Морските бранови од морската шир до бреговите ја носат енергијата што ја добиле од ветрот. Силата што доаѓа на брегот е мала, од редот 10 KW (киловат) на метар должина на брегот (за амплитуда на бранот од 1 m и период од 10 секунди). Силата се менува со текот на времето. За да се зафати значаен дел од силата на брановите, потребно е голема должина од брегот да се снабди со опрема, која би требало да се заштити од невреме. На пример, студијата која е работена за брегот во Казабланка (1944-1948) покажува дека инвестиционите трошоци за една електрана со снага од 250 MW се десеткратни поголеми од традиционалните хидроцентрали, а би зафатила околу сто километри од брегот. Идејата за електрана која ќе работи на морските бранови сè уште не е напуштена. Примената на енергијата на бранот е сосема специфична и локална.

1.3 ТВРДИ, ТЕЧНИ И ГАСНИ ГОРИВА КАКО ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА

Во фосилни енергетски суровини се вбројуваат: јагленот, суровата нафта и природниот гас. Фосилните горива имаат органско потекло и настанале како резултат на топлинското, механичкото и биолошкото влијание во долг временски период на растителниот и животинскиот свет, наталожени во различни геолошки формации.

Јагленот е најраспространето фосилно гориво. Потекнува од палеозоитскиот период кога диновските карбонски шуми биле потопени од големите мориња. Се наоѓа во слоевите на Земјината кора.

Основни видови на јаглен според геолошката класификација се: антрацитот, камениот јаглен, кафеавиот јаглен, лигнитот и тресетот. Процентуалната содржина на јаглерод се зголемува со староста на јагленот и се движи од 50% во дрвото, 60% во тресетот, 85% во камен јагленот и до 95% во антрацитот. Со зголемување на процентуалната содржина на јаглеродот се зголемува и топлинската моќ на јагленот. Времето на користење на јагленот изнесува повеќе од 1000 години, но периодот на негово интензивно користење во големи размери изнесува околу 200 години.

Суровата нафта претставува смеса на поголем број јаглеводороди со различна молекулска маса и начин на нивно врзување со присуство на сулфур, кислород и азот во примесите. Суровата нафта се добива од земјата преку дупнатини кои специјално за тоа се дупчат на местата каде има наоѓалишта на нафта, а кои се наоѓаат на длабочина во земјата од 5000 метри па и повеќе. Нафтата во сурова состојба како природно гориво не нашла широка примена, но со нејзина преработка можат да се добијат исклучително вредни производи т.н. нафтени деривати кои ги задоволуваат современите технички потреби. Нафтени деривати во најголем број случаи се користат како горива, но и како мазива за подмачкување и суровини во хемиската индустрија. Најголеми наоѓалишта на нафта се наоѓаат на: Блискиот Исток, Русија, Северна Африка, Венецуела, Мексико и САД.

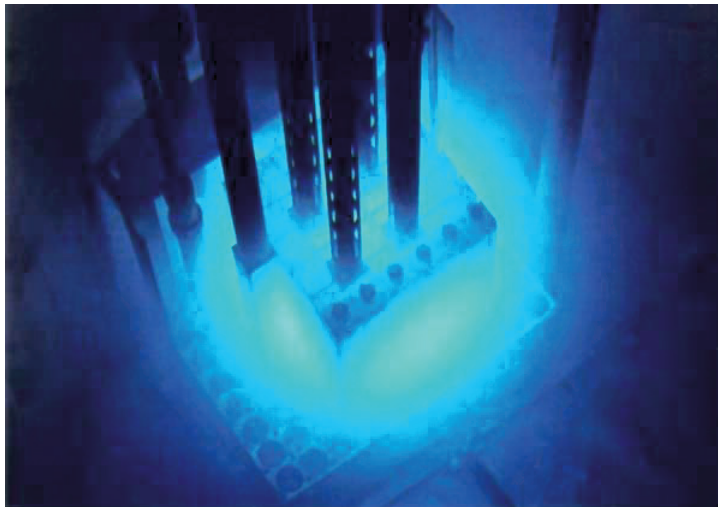
Природниот гас се јавува обично на местата каде што има наоѓалишта на нафта или самостојно. Настанал по истиот процес на трансформација од истите параметри како и нафтата. Природниот гас се наоѓа како слободен над нафтата или како врзан, растворен во нафтата. Во составот на природниот гас се наоѓаат гасни јаглеводороди, од кои најмногу метан со примеси на водород и негоривни гасови.

Природниот земен гас има широка примена. Покрај неговото користење како гориво се користи и како суровина во хемиската индустрија.

Најголеми природни наоѓалишта на природен гас се наоѓаат во Русија, САД, Блискиот Исток, Алжир, Венецуела и др.

1.4 АТОМСКАТА И ГЕОТЕРМАЛНАТА ЕНЕРГИЈА КАКО ИЗВОРИ НА ЕНЕРГИЈА

Атомската (нуклеарната) енергија е енергија која се добива со постапките на **нуклеарна фузија и нуклеарна фисија**. Нуклеарната **фузија претставува спојување на два или повеќе лесни атоми во еден потежок** со ослободување на одредена количина на енергија во облик на разни зрачења. Нуклеарна **фисија** исто така е ослободување на одредена количина на енергија во облик на разни зрачења, но се добива со **цепење на тешки атоми на два или повеќе помали атома**. При двете постапки масата пред реакцијата секогаш е поголема од масата по реакцијата, а разликата во масите е претворена во енергија по Ајнштајновата формула $W = m \cdot c^2$. Енергијата на Сонцето е последица на непрекинати нуклеарни фузии кои се одвиваат во јадрото на ѕвездата и во облик на зрачење доаѓаат до површината и зрачи во Вселената. Истражувањето за можното искористување на нуклеарната фузија на Земјата сè уште се во почетна фаза, но засега нема знаци дека нуклеарната фузија би можела во блиска иднина да се користи на Земјата. Но, затоа пак нуклеарната фисија е доволно едноставен процес кој широко се искористува во нуклеарните реактори за производство на електрична енергија.



Слика 1.4 Атомската енергија како извор на енергија

Топлината која е содржана во внатрешноста на Земјата се нарекува **геотермална енергија**. Зголемувањето на температурата на Земјата се зголемува со зголемување на длабочината. Според досегашните сознанија внатрешната топлина на Земјата потекнува од радиоактивното распаѓање на тешките елементи во Земјината кора, а еден дел доаѓа од нејзината внатрешност т.е. од центарот, каде се смета дека температурта достигнува до 6000 (°C). Освен со радиоактивно распаѓање топлината во Земјината кора се создава и на други начини и тоа со: егзоенергетски хемиски реакции,

кристализација и вцврстување на растопените карпи, триење на површинските маси при тектонски поместувања и др.



Слика 1.5 Геотермална енергија како извор на енергија

Изворите на геотермална енергија може да се групираат во две групи и тоа:

- ❖ геотермална енергија на подземни флуиди,
- ❖ геотермална енергија на сувите карпи.

Користењето на енергијата на подземните флуиди сè до почетокот на 20 век било ограничено исклучиво на топла вода за капење и терапевско лекување, а од 1904 година и за производство на електрична енергија кога на изворите со водена пара на местото Лардерело во Италија е изградена првата експериментална геотермална централа.

Изворите што ја користат енергијата на сувите карпи се најголем потенцијален извор на геотермална енергија, меѓутоа за да може да се користи топлината на сувите карпи мора во нив да се внесе вода како средство за ладење. Водата ја одзема топлината на сувите карпи, се загрева и како топла вода или водена пара се враќа на површината на земјата. Поради зголемувањето на допирната површина помеѓу водата и сувите карпи потребно е да се изврши раздробување на карпите. Раздробувањето може да се изврши со: хидростатички притисок, конвекционални или нуклеарни експлозии.

Според температурниот градиент сувите карпи можат да се поделат на:

- ❖ хипертермални подрачја;
- ❖ термални подрачја;
- ❖ нормални подрачја.

Било која проценка да се направи на резервите на геотермална енергија нема да биде точна. Вкупните светски резерви на геотермална енергија на длабочина од 19 километри се проценува на $4 \cdot 10^{22}$ [J]. Ако само 1% од оваа енергија се трансформира во електрична при коефициент на трансформација од 25% вкупното производство би изнесувало 10^{20} [J], што дава можност да се изградат геотермални центри со моќност од 60 [GW].

Денес во светот работат повеќе централи за производство на електрична енергија од геотермална енергија и тоа во: Италија, САД, Нов Зеланд, Мексико, Јапонија, Русија и др.

1.5 ПРЕТВОРАЊЕ НА ЕНЕРГИЈАТА ОД РАЗНИ ЕНЕРГЕТСКИ ИЗВОРИ ВО ТОПЛОТНА

Овде ќе бидат разгледани претворувачите на хемиската и на нуклеарната енергија на горивата во тоplotна енергија, како и користење на сончевата енергија за добивање на тоplotна енергија.

Во првата група спаѓаат разни типови ложишта, печки и комори за согорување на горива (фосилни и синтетички) со најширока примена. Гледано од енергетиката значајно е дека овие уреди делумно го искористуваат горивото. Еден дел од енергијата на горивото е изгубен со продуктите на согорување кои одат во атмосферата. Другиот дел се губи со несогореното гориво во пепел, а трет во вид топлински загуби со конвенција и зрачење преку топлиите површини на самиот уред. Вкупниот неискористен дел на енергијата на горивото изнесува 5-30% во индустријата и 30-70% во домашните печки, во зависност од типот на печката и горивото.

Продуктите на согорување, во зависност од применетото гориво, можат да содржат и штетни гасови. Со закон е пропишана границата на загадување на воздухот со продуктите од согорување на фосилните горива.

Нуклеарните реактори се уреди за претворање на нуклеарната енергија во топлина. Во нуклеарниот реактор се обезбедени услови на постепена реакција на фисија на атомското јадро од нуклеарно гориво и за излез на ослободената топлина. Топлината се носи во уред во кој се претвора во механичка работа. Реакторот со мал или голем степен се врши конверзија на нуклеарното гориво во чисто гориво. Секој нуклеарен реактор е безбеден во нормална работа, а обезбеден е и против сите несреќи при кои може да дојде до прекумерно озрачување на работниците или до расипување на радиоактивниот материјал во околината, кои би можело да го загорзат здравјето или животот на луѓето.

Нуклеарниот реактор и неговата работа се поврзани со производство, искористување и складирање на искористеното нуклеарно гориво со еден систем на технолошка операција која се нарекува горивен циклус.

Нуклеарните реактори се делат во три основни групи: конвертори, напредни конвертори и оплодни реактори, во зависност од тоа колку во поедини тип на реактор атомот од оплоденото гориво се конвергира во чисто гориво по еден потрошен атом од чистото гориво.

Ако овој однос е помал од единица, станува збор за конвертори. Денес такви се сите нуклеарни реактори во комерцијалните нуклеарни централи во погон.

Ако овој однос е блиску до единица, станува збор за напредни конвертори. Овие реактори не се наоѓаат во комерцијална употреба, а заедничко им е тоа што користат ториум како оплоден материјал.

Ако горниот однос е поголем од единица, т.е. ако реакторот врз основа на потрошениот оплоден материјал произведува повеќе од чистото гориво отколку што троши за сопствениот погон тогаш станува збор за оплоден реактор.

Како неисцрпен извор на топлотна енергија Сонцето има важна улога во животите на луѓето. Па затоа тие постепено учат сè повеќе да ја користат. Па така со употреба на панелите за собирање на сончева енергија, кои се поставуваат на покривите на објектите, директно ја загреваат водата која има ограничена употреба како во индустријата така и домаќинствата. Поголема употреба има во домаќинствата и тоа првенствено за загревање на вода која се користи за одржување на лична хигиена, миење на садови и сл.

1.6 ЗНАЧЕЊЕ НА ТОПЛИНСКАТА И ЕЛЕКТРИЧНАТА ЕНЕРГИЈА ВО МЕТАЛУРГИЈАТА

Топлотна енергија за корисна примена се добива непосредно од Сонцето или од природните извори на топла вода или пара, иако многу често со согорување на горива или преку електрична енергија.

Топлината служи за греење на простории, за загревање на санитарна и техничка вода, за припрема на храна и произведување на водена пара, топлење, сушење и слични постапки (т.н. технолошки термички процеси). Топлината има големо значење поради способноста да се трансформира во механичка енергија. Меѓутоа, ова може да се оствари само под услов ако само дел од употребената топлина преминува во механичка работа, додека остатокот мора да се предаде на околината. Но, тоа не важи во обратна насока: механичката работа може без остаток да се претвори во топлина. За металургија не може да се објасни со зборови значењето на топлината. Без неа металуршките агрегати нема да функционираат, бидејќи за топење на металите потребна е топлина добиена од одреден тип на горива. За печењето на тулите (огноотпорните материјали) во печките исто така потребна е топлина. За функционирање на парните котли кои произведуваат сувозаситена пара која се користи во процесот на металуршките капацитети исто така потребна е топлина. Како што претходно е кажано топлината е цврсто поврзана со металургијата.

Со откривањето на динамомашината (генератор) започната е ерата на најважниот технички развој, т.е. електричната енергија почнала да се користи во индустриски капацитети. Денес, наместо гориво, електричната енергија се повеќе и повеќе се користи за добивање на топлина во сите подрачја, па и во металургијата. Причината за тоа е што електричната струја може идеално да се регулира, а со тоа и доводот на топлина во некој систем, покрај тоа и инсталациите се едноставни, ракувањето е лесно и чисто.

Електричната струја може да се претвори во топлина на различни начини:

- ❖ со зрачење, со посредување на електричниот лак кој се образува помеѓу јаглородните или графитните електроди (лачни електродни печки);

- ❖ поради отпорот на материјалот низ кој струјата поминува и поради поедините образувани електрични лакови помеѓу поедините парчиња;
- ❖ поради отпорот при проаѓање на струјата низ некој материјал (загревање и индукциони печки).

Топлината при користењето на електричната струја може да се образува или во самиот материјал или надвор од него. Во металургијата се користат печки во кои топлината се образува во самата шаржа.

Топлината која се образува на сметка на електричната енергија, таканеречена електротоплина, значајно се разликува од топлината која се добива со согорување на некое гориво, таа е поквалитетна. Всушност, за разлика од горивата со електричната струја не се внесува нечистотии во шаржата ниту при образувањето на топлината се ствараат гасни производи, па може да се постигне поголема концентрација на топлина во шаржата, односно и многу висока температура.

Бидејќи доводот на струја може лесно да се регулира, доводот на топлината во шаржата може лесно да се одмери, а со тоа да се постигне многу добра работа од технолошко и економско гледиште. Бидејќи во тој случај, воздухот не е потребен, тој не влијае на атмосферата, на смесата и на растопот во печката, па електричната енергија може подеднакво добро да се користи во најразлични услови на работа.

При **електротермичкото топење** топлината се добива при преминување на електричната струја од едната електрода на другата; односно, електричната моќност (KW) од електродите се пренесува на околната смеса и се преобразува во топлина, дел со отпорот кој се јавува при преминување на струјата низ смесата, а дел со образување на електрични лакови помеѓу поедини парчиња од смесата. Електричниот биланс, на пример, на една затворена печка со ниско тело, со капацитет од 15000 kVA би бил следниов:

Внесена електрична енергија	100%
Поделба на оваа енергија:	
реакциска топлина	47,06%
топлина на железото	17,7%
топлина на троската	10,48%
топлина на гасот	4,54%
топлина на испарената вода	3,22%
губитоци на топлина	9,0%
електрични губитоци	8,0%

Според тоа електричниот степен на искористување изнесува $\eta_e=92\%$, додека електротермичкиот учинок изнесува $\eta_{et}=83\%$. Ако се земат во обзир разните предности на електроредуктивните печки, да речеме предноста на електротоплината, потоа помали инвестициски трошоци во споредба со постројки со високи печки, па и да во овие печки може да се користи помалку квалитетно гориво, тогаш користењето на овие печки е се поконкурентно и покрај високата цена на електричната енергија.

Но, за да се намали потрошувачката на енергија, т.е за да може поевтино да се произведува железо во електроредуктивните печки, електропечките користат предгреана смеса, со што се намалува потрошувачката на електрична енергија на сметка на некое евтино гориво.

Контролни прашања:

1. Која е основната разлика помеѓу топлината и температурата?
2. Што претставува специфична топлина?
3. Колкава е вкупната енергија од Сонцето која доаѓа кон Земјата?
4. Што е енергија на ветро?
5. Колкава е вкупната потенцијал на водните текнови во светот?
6. Од што настанале фосилните горива?
7. Со кои постапки се добива атомската енергија?
8. Како се групира геотермалната енергија?
9. Зошто служат нуклеарните реактори?
10. Дали знаеш каде се користат топлината во металуршкиот капацитет?

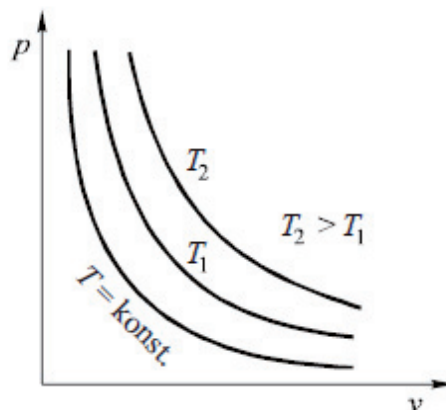
2. ГАСОВИ И ПАРЕИ

2.1 БОЈЛ-МАРИОТОВ ЗАКОН

Ако разгледаме апаратура која се состои од калибриран одмерен сад во кој е затворена некоја количина на воздух, потоа цевен манометар и ниво на садот со жива со која може да се воспостави одреден притисок во садот, (калибрираниот одмерен сад се наоѓа во термостат, а температурата се одржува константна, а се менува притисокот), ќе се менува и волуменот при што ќе се добие дека:

$$(p \cdot v)_T = \text{const.}$$

Тоа претставува Бојл-Мариотовиот закон кој може да се прикаже со истострана хипербола во p, v дијаграмот, прикажан на слика 2.1.



Слика 2.1 Приказ на резултатите за Бојл-Мариотовиот закон

Значи дека, помеѓу притисокот и волуменот при $T = \text{const.}$ постои обратнапропорционалност, т.е. ако притисокот двојно се зголеми, волуменот ќе добие двојно помала вредност. Според тоа:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1} \text{ или } p_1 v_1 = p_2 v_2 = \text{const.}$$

Само идеалните гасови го запазуваат овој закон и само на нив може овој закон да биде изведен од молекуларната кинетичка теорија на гасови.

Практично дојдовме до равенката на состојба на идеалните гасови. Бојл-Мариотовиот закон:

$$(pv)_T = const.$$

$$p \cdot v = f_1(T).$$

Од Геј-Лисаковиот закон, специфичниот волумен даден во m^3/kg е:

$$v = k \cdot T,$$

а бидејќи v_0 кај 273,15 K е зависен од притисокот може да се напише дека:

$$v = f(p) \cdot T.$$

Ако наведениот израз го помножиме со притисокот p , ќе добиеме:

$$p \cdot v = p \cdot f(p) \cdot T = \varphi(p) \cdot T.$$

Ако оваа равенка ја споредиме со равенката која ја добивме од Бојл-Мариотовиот закон, следува:

$$f_1(T) = \varphi(p)T$$

Бидејќи $f_1(T)$ исклучиво е функција на температурата, тогаш $\varphi(p)T$ може да биде само константа и ја бележиме со R :

$$\varphi(p)T = R$$

Ја добивме гасната константа на гасот чија вредност е карактеристична за секој гас. Според тоа можеме да ја напишеме равенката на состојбата:

$$p \cdot v = R \cdot T \text{ за } 1 \text{ kg гас}$$

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \text{ за } m \text{ kg од гасот.}$$

Од наведената равенка може да се изрази вредноста за R :

$$R = \frac{p \cdot v}{T} \text{ или}$$

$$R = \frac{p}{T \cdot \rho} \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right],$$

каде што ρ претставува густина на гасот, дадена во kg/m^3 .

Гледаме дека погустите гасови имаат помала гасна константа и обратно. Константата R зависи и од составот на гасот.

2.2 ГЕЈ-ЛИСАКОВ ЗАКОН

Ако во наведената апаратура притисокот p се одржува константен може да се испита зависноста на волуменот од температурата. Тоа значи дека температурата во термостатот се менува и се отчитуваат промените на волуменот при ист притисок. Според геј-лисаковите проби најдена е

зависност на волуменот со температурата при $p = \text{const.}$ прикажано со изразот:

$$v = v_0 + \frac{v_0 t}{273,15}$$

$$v = \frac{v_0}{273,15} (273,15 + t)$$

каде што се:

v = специфичен волумен [m^3/kg], при температура t ;

v_0 = специфичен волумен [m^3/kg], при температура од 0°C при ист притисок.

Наведената равенка претставува права која за секој притисок е различна, но сите правци нацртани во v, t дијаграмот, сл.2.2, се завршуваат во една точка на апсисната оска и тоа за $t = -273,15^\circ\text{C}$.

Доцртаните правци со испрекинати линии ја покажуваат точката кон која тежнеат; инаку тие немаат реална вредност бидејќи при тие услови преовладува привлечната сила помеѓу молекулите и гасот се претвора во течност, а овој закон важи само за идеалните гасови. Исто така нереално е да се каже дека кај температура од $t = -273,15^\circ\text{C}$ нема волумен, што значи дека материјата ја снемало, а тоа е невозможно. Ако наместо t се воведи апсолутна температура

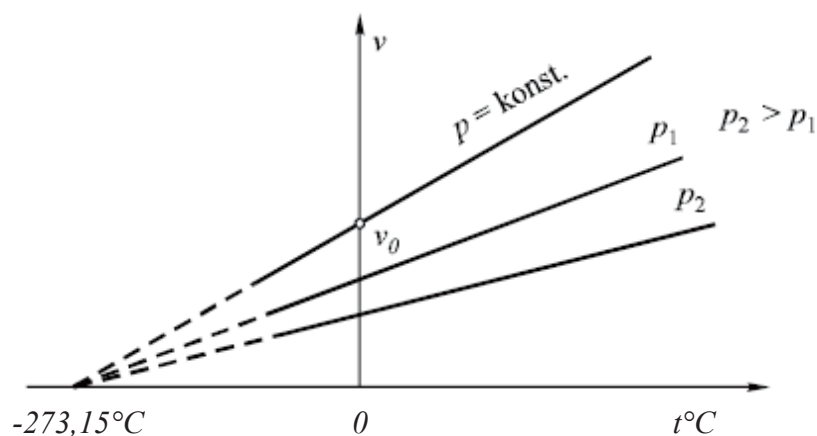
$$T = 273,15 + t$$

се добива:

$$v = \frac{v_0}{273,15} \cdot T \text{ или}$$

$$v = k \cdot T = f(p)T$$

каде што k е константа зависна од притисокот и видот на гасот.



Слика 2.2 Приказ на резултатите за Геј-Лисаковиот закон

За да притисокот (просечна сила по единица површина на ѕидот на садот во кој гасот се наоѓа) е константан при пораст на температурата (кога

расте средната брзина на движење на молекулите), мора да расте волуменот на садот во кој гасот се наоѓа.

2.3 ШАРЛОВ ЗАКОН

Ако во наведената апаратура волуменот v се одржува константен може да се испита зависноста на притисокот од температурата. Тоа значи дека температурата во термостатот се менува и се отчитуваат промените на притисокот при ист волумен. Според шарловите проби најдена е зависност на притисокот со температурата при $v = \text{const.}$ прикажано со изразот:

$$p = p_0 + \frac{p_0 t}{273,15}$$

$$p = \frac{p_0}{273,15} (273,15 + t)$$

p = специфичен притисок при температура t ;

p_0 = специфичен притисок при температура од 0°C при ист волумен.

Ако наместо t се воведо апсолутна температура

$$T = 273,15 + t$$

се добива:

$$p = \frac{p_0}{273,15} \cdot T \text{ или}$$

$$p = k \cdot T$$

каде што k е константа зависна од температурата при константен волумен.

Колку што е поголема температура на гасот во садот со константен волумен толку поголема е и средната брзина на молекулите, бројот на судари, како и силата со кои молекулите удараат во ѕидот на садот, а со тоа поголем е и притисокот.

2.4 РАВЕНКА НА СОСТОЈБАТА НА ИДЕЛНИТЕ ГАСОВИ И НЕЈЗИНА ПРИМЕНА ПРИ РЕШАВАЊЕ НА ПРОБЛЕМИ

Состојбата на масата на гасот е одредена со три параметри и тоа: притисок p , апсолутна температура T и волумен V , при што меѓусебе се зависни. Ги поврзува релацијата $f(p, V, T) = 0$.

Во случај на идеален гас оваа релација гласи:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const.}$$

Константата се одредува според законот кој го вовел Авогадро и кој вели дека 1 мол од гасот кој содржи Авогадров број на молекули

($N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$) на температура од 0°C , и на нормален притисок од $1,01 \cdot 10^5 \text{ [Pa]}$ има секогаш ист волумен од $22,4 \text{ [dm}^3\text{]}$.

Ако овој волумен го бележиме со V_m , може да се напише равенката на состојба за идеален гас за еден мол гас со следниов облик:

$$p \cdot V_m = RT \text{ или } \frac{p \cdot V_m}{T} = R,$$

а гасната константата R се одредува според:

$$R = \frac{1,01 \cdot 10^5 \text{ [Pa]} \cdot 22,4 \text{ [dm}^3\text{]}}{273,16 \text{ [K]}} = 8,314 \left[\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right]$$

Гасната константа уште се нарекува и универзална гасна константа.

Ако масата на гасот m содржи n молови на гасот, тогаш волуменот на таа маса на гасот при нормален притисок и на 0°C е $V = n \cdot V_m$. Со множење на горенаведената равенка со n се добива:

$$p \cdot n \cdot V_m = n \cdot R \cdot T \text{ или} \\ p \cdot V = nRT.$$

Вака добиената равенка претставува равенка на состојбата на идеалниот гас изразена во молови.

Бидејќи бројот на молови на гасот n е однос на масата на гасот m и моларната маса на гасот M , т.е $n = \frac{m}{M}$, равенката на состојбата на идеалниот гас може да се прикаже со следниов облик:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

Од општата гасна константа може да се пресметаат гасни константи на поедини гасови:

$$R = R/M$$

Исто така со користење на равенката на состојбата на идеалниот гас може да се одреди што се случува со параметрите на состојба на гасот кога тој се загрева, лади, збива и сл.

Пример 2.1

Во боца со волумен од $120 \text{ [dm}^3\text{]}$ се наоѓа кислород под притисок од $8825,98 \text{ kPa}$, а температура е 25°C . Колку килограми кислород се наоѓаат во боцата, а колку молови тоа претставува?

Решение:

Гасната константа на кислородот изнесува:

$$R_{O_2} = \frac{8,314}{M} = \frac{8,314}{32} = 0,260 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right]$$

Масата на кислородот следува од равенката на состојбата:

$$m = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{8825,98 \cdot 0,12}{0,260 \cdot (273 + 25)} = 13,68 \text{ [kg]} \text{ или}$$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{13,68}{32} = 0,427 \text{ [kmol]} \text{ изразено во киломолови.}$$

Пример 2.2

Извршено е мерење на густина на непознат гас. Добиената вредност изнесува $\rho = 1,293 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$. Ако мерењето е вршено според нормални услови, колку е моларната маса на гасот?

Решение:

Нормални услови се земаат при температура од $t=0^\circ\text{C}$ и $p=101325\text{Pa}$.

Од равенката на состојба за 1 [kg] гас следува:

$$p \cdot v = R \cdot T \text{ или}$$

$$R = \frac{p \cdot v}{T} = \frac{p}{T \cdot \rho} = \frac{1,013 \cdot 10^2}{273,15 \cdot 1,293} = 0,287 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right]$$

$$R = R/M \Rightarrow M = \frac{8,314}{0,287} = 29,0 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right]$$

Приме 2.3

Во боца се наоѓа $24 \text{ [m}^3]$ гас со температура од 10°C . Гасот е со натпритисок од $4,905 \text{ [bar]}$ при бараметарски притисок од $100,508 \text{ [kPa]}$.

а) Колку $\text{[m}^3]$ содржи боцата?

б) На кој натпритисок ќе се наоѓа гасот, ако на сонце се загрее за 30°C ?

Решение:

а)

$$p_a = p_b + p_m = 490,5 + 100,508 = 591,008 \text{ [kPa]}$$

$$1 \text{ [m}^3] = \frac{1}{22,414} \text{ [kmol]}$$

$$n = \frac{24}{22,414} = 1,07 \text{ [kmol]}$$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \Rightarrow$$

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{p} = \frac{1,07 \text{ [kmol]} \cdot 8,314 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmolK}} \right] \cdot (273 + 10) \text{ [K]}}{591,008 \text{ [kPa]}} = 4,26 \text{ [m}^3]$$

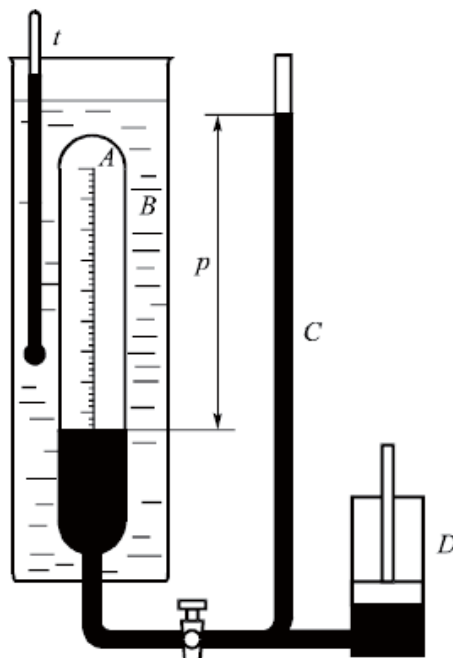
б)

$$p = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} = \frac{1,07 \text{ [kmol]} \cdot 8,314 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmolK}} \right] \cdot (273 + 30) \text{ [K]}}{4,26 \text{ [m}^3]} = 632,742 \text{ [kPa]}$$

$$p_m = p_a - p_b = 632,742 - 100,508 = 532,234 \text{ [kPa]}$$

2.5 ТОПЛОТНИ СВОЈСТВА НА ГАСОВИТЕ

Да го разгледаме следниов експеримент со помош на лабораториски уред прикажан на сликата 2.3.



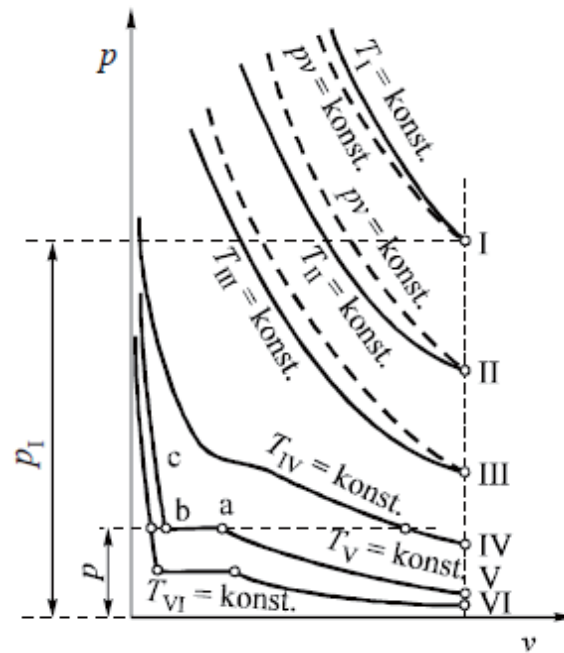
Слика 2.3 Шема на лабораториски уред за испитување на однесувањето на реалните гасови

Нека во сад А е затворен 1 kg реален гас кој ќе се испитува. Со помош на термостатот В се одржува постојана температура за време на испитувањето која ја покажува термометарот t . Затворениот гас при таа температура можно е да се компримира со кревање на живата во садот А со помош на клипот D на сè помал волумен, што може да се отчита на соодветна скала означена на садот А. Со промена на волуменот ќе се менува и притисокот, т.е притисокот ќе расте при компресија, а тоа може да се отчита на манометарот С.

Ако почетната состојба на разгледуваниот гас на почетокот се означи со I, како што е покажано на сликата 2.4, т.е гасот на почетокот се наоѓа на релативно висока температура при притисок p_1 и волумен v , тогаш изотермната компресија на гасот ќе биде прикажана со кривата на изотермата $T_I = \text{const}$ која ја добиваме со вртнување на соодветните вредности на притисокот и волуменот прочитани на скалата прикажана на лабораториската апаратура.

Меѓутоа, ако од истата почетна состојба се нацрта истострана хипербола $p \cdot v = \text{const}$ (изотермата на идеалниот гас), таа нема да се поклопува со стварната изотерма $T_I = \text{const}$, туку на таа релативно висока температура ќе биде легната, на пр. нешто под реалната изотерма. Ако се повтори истиот експеримент поаѓајќи од истиот почетен волумен, но со подесување со помош на термостатот, некоја пониска температура T_{II} , тогаш компресијата ќе биде претставена со изотермата $T_{II} = \text{const}$ која ќе

лежи, на пр. под изотермата $p \cdot v = const$ на идеалниот гас, вртана од истата почетна состојба II. Понатаму, со повторување на експериментот од некоја почетна состојба III, реалната изотерма $T_{III}=const$ во почетокот компресијата ќе биде поблага, а подоцна пострмна од изотермата $p \cdot v = const$ на идеалниот гас, додека при пониска температура со изотермна компресија од некоја почетна состојба IV, по одредена компресија ќе се забележи одредена деформација на изотермата $T_{IV}=const$.



Слика 2.4 Спорежба на изотерми помеѓу идеални и реални гасови

Произлегува дека ако на некој реален гас при одреден температура му се зголеми притисокот, истовремено ќе се зголеми и разликата во својствата на тој гас во однос на идеалниот гас; разликата е поголема ако е температурата пониска. Така, на пример со компресија на реален гас со почетна состојба B по изотермата $T_V=const$ на некоја релативно ниска температура, во некоја одредена состојба a ќе се забележи појава на магла на ѕидовите на садот A, а изотермата ќе се крши проаѓајќи во насока паралелна со апсисната оска, која како што се гледа, истовремено ќе биде и изобара ($p=const$) на отсечката ab. Со компресија од a кон b, по појавата на магла на ѕидовите на садот A ќе се појават и капки течност, така што до b целиот гас ќе стане течност (течна фаза). Процесот на претворањето на гасната фаза, под одредени услови на притисокот и температурата, во течна фаза позната е под поимот кондензација. Како што се гледа, процесот на кондензација се одвива во две фази (течна и гасна) при што односот на течната фаза на тој двофазен систем во однос на гасната фаза, сè повеќе се зголемува, така што во состојбата b имаме само течна фаза на разгледуваната материја (течен воздух, течен кислород, јаглероддиоксид итн.). И двете фази за време на процесот кондензација се во рамнотежа бидејќи се со иста и постојана температура и притисок. Тоа значи дека во овој случај притисокот и температурата не се меѓусебно независни големини на состојбата, туку вредноста на едната од нив е условена со

вредноста на другата. Меѓутоа, поради тоа што целиот, во овој случај двофазен систем, иако од иста материја, се состои од течност и гас, чии специфични волумени, односно густини, се различни, затоа рамнотежата на двофазниот систем за време на кондензацијата понекогаш се нарекува “хетерогена” рамнотежа, за разлика од рамнотежата состојба на некои физички хомогени тела. Впечатливо е дека изотермната промена на состојбата $T_V = \text{const}$ се одвива така што во еден дел на процесот ($V-a$) постоеше само гасна фаза, а во другиот дел гасна и течна фаза ($a-b$), а во третиот дел ($b-c$) само течна фаза на разгледуваната материја.

За време на кондензацијата притисокот не се менува. Дури по кондензирањето на целиот гас и при заземањето на волумен на течност, притисокот нагло ќе се зголеми со ново намалување на волуменот ($b-c$). Ако претпоставиме дека процесот се одвива во обратна насока, очигледно е дека во точката b ќе настапи, спротивно од кондензацијата, процесот на испарување на течнота кој ќе трае сè додека и последната капка од течнота не испари (состојба a). Температурата ќе остане константна за време на процесот на испарување, а ќе расте со понатамошно загревање (прегрејување) на гасната фаза на разгледуваната материја. Според тоа произлегува дека процесот на кондензација и процесот на испарување се два меѓусебни спротивни процеси.

Потребно е да се напомене дека е можно секој гас, при дадени услови на притисокот и температурата, да се претвори во течност.

2.6 ПРИМЕНА НА ПАРЕИТЕ ВО МЕТАЛУРГИЈАТА

Производството и искористувањето на водената пареа е еден од најраспространетите начини за претворање на еден облик енергија во друг, односно до конечен облик на енергијата, кој сакаме да го добиеме како резултат од процесот на парните постројки (со парни машини или парни турбини). Денес светското производство на електрична енергија, околу 60% се добива во термоелектричните центри со посредство на парните турбини, каде што единствено работно тело е водената пареа. Водената пареа е единствено работно тело и во нуклеарните термоенергетски постројки. Исто така водената пареа се појавува како работно тело и во многу технолошки процеси во текстилната, хемиската, прехранбената индустрија и сл., но исто така голема примена има и во металургијата.

Водената пареа, како и другите реални гасови, по своите особини битно се разликува од идеалните гасови. За водената пареа, како реален гас, не можат да се применат законите за идеалните гасови и равенката на состојбата. Основните големини и други особини на состојбата се определуваат во основа по експериментален пат и се даваат во таблици и дијаграми. Денес постојат нумерички методи односно компјутерски програми за нивно определување.

Примената на водената пареа во металуршките капацитети е разновидна: се користи како работно тело во парните машини, се користи при работата на високите печки, како загревач на санитарните и на други топлински уреди и сл. Тука ќе го разгледаме **влијанието на водената пареа на работата на високите печки.**

Како прво средство со кое се ладела зоната на согорување била водената пареа. Односно, ладниот воздух кој доаѓа од дувалката, при влезот во кауперот, се пропушта низ посебен уред за климатизација, каде се заситува со точна планирана количина вода.

Теоретските пресметки и практичните искуства покажуваат дека температурата на предгрејаниот воздух кој по 1 m^3 содржи 200 mg водена пареа може да се зголеми за 4°C , дури и за $4,5^\circ\text{C}$, а температурата во зоната на согорување да остане непроменета, т.е. да се компензира дејството на оваа количина на водена пареа во зоната на согорување. Но, потребно е да се истакне дека при користење на водената пареа не се постигнува заштеда на кокс, иако температурата на вдуваниот воздух е поголема, бидејќи коксот се троши на реакција со водената пареа. Но, оваа топлина со посредство на продуктите на оваа реакција се пренесува во повеќе делови на печката, каде CO и H_2 оксидираат на сметка на кислородот од рудата. Воопштено може да се каже дека од повеќе причини водената пареа поволно влијае на производственоста на печката.

Бидејќи реакцијата на водената пареа со јаглеродот е ендотермна, се лади зоната на согорување, а образуваниот редутивен гас содржи релативно повеќе CO и H_2 , а водородот е особено ефикасен како средство за редуција. Покрај тоа, водородот има извонредно ниска вискозност и многу висок коефициент на дифузија. Водата, како производ на редуцијата, побрзо се дифундира од рудните парчиња на јаглероддиоксидот, својот кислород го предава на јаглеродмоноксидот во атмосферата, така што водородот повторно се реактивира. Всушност, водородот дејствува како катализатор при редуција на оксидите на железото со помош на јаглерод моноксид.

Водородот, покрај тоа, 7 до 10 пати ја пренесува топлината од останатите гасови, т.е. тој го подобрува и преносот на топлина од гасовите на цврстата фаза и со тоа се намалува разликата во нивните температури, т.е. се намалува губитокот на топлина од гасовите кои излегуваат од ждрелото. На високите температури, т.е. во зоната на согорување, водородот образува, со потрошување на енергија, слободни радикали (јони) кои повторно се соединуваат на површината на цврстата фаза, каде после многу ефикасно ја предаваат апсорбираната топлина во печката. Со оваа апсорбирана топлина водородот ја лади зоната на согорување, а со тоа воедно го спречува и образувањето на SiO соединението.

Бидејќи воздухот обогатен со кислородот дејствува на сличен начин како појакно предгрејан воздух, за тоа Суслов уште при своите први проби со воздух обогатен со кислород користел водена пареа за загревање. Ако во печката се дува воздух обогатен со кислород тогаш се интензивира оксидацијата на јаглеродот во зоната на согорување, односно се зголемува производноста на печката. Но при тоа се наштетува на температурниот градиент во печката, т.е. температурата во зоната на согоревање, т.е. во печката релативно се зголемува, додека во горните делови на печката релативно се намалува. Бидејќи **водената пареа** вдувана во печката дејствува токму во обратна смисла, т.е. **ја снижува температурата во зоната на согорување, а ја покачува во горните делови на печката**. На тој начин Суслов сакал да го воспостави првобитниот температурен градиент.

Бидејќи влагата во атмосферскиот воздух силно варира, особено во поедини годишни времиња, загревањето на воздухот е корисно и тогаш

кога високата печка работи со вообичаени услови на работа. На тој начин во печката се дува воздух секогаш со еднаква влажност, со што се отстранува една од можните причини за неизедначена работа на високите печки.

Контролни прашања:

1. Што претставува Бојл-Мариотовиот закон?
2. Од што е зависна константата к употребена во Геј-Лисаковиот закон?
3. Објасни го Шарловиот закон?
4. Како гласи равенката на состојбата на идеалните гасови?
5. Од што зависи постојаниите својства на гасовите?
6. Објасни го влијанието на водената пара на работата на високите печки!

3. ОСНОВНИ ТЕРМОДИНАМИЧКИ ПОЈАВИ

3.1 ЗАКОН ЗА ОДРЖУВАЊЕ НА ЕНЕРГИЈАТА

Овој закон претставува еден од основните закони на физиката: во секој затворен систем, кој не разменува енергија со околината, вкупната количина на енергија во нејзините разни облици е постојана; со други зборови, енергијата не може ниту да се створи ниту да се изгуби, само може да го менува својот облик.

Енергијата се јавува во разни облици: кинетичка, потенцијална, електрична, хемиска, нуклеарна, енергија на светлината, енергија на деформацијата, енергија која ја има секоја честичка со самото нејзино постоење (Ајнштајн: $W=mc^2$). Разновидноста на облиците, како и подрачјето на знаење во кои се откриени или воведени, се одразува со разновидноста на единиците во кои енергијата се изразува (ерг, калории, џулови,...). Односите на поедини облици се сложени, топлинската енергија е, на пример, кинетичка енергија на триење на честичките во телото, додека пак електричната и хемиската енергија е последица на дејствувањето на меѓуатомските сили.

Во теоријата на деформабилните тела се проучуваат облиците на енергија поврзани со дејствување на силите, моментите и дистрибуираните оптоварувања, па и топлините и присилните помести на телата.

Работата, што при деформацијата на телата ја извршуваат надворешните сили со одредените поместувања, се претвора во потенцијална, кинетичка и топлинска енергија на телата. Според законот на одржување на енергијата работата на надворешните сили е еднаква на збирот на „внатрешната“ енергија.

Во наједноставниот случај, на кој се базираат поголемиот број статички анализи на конструкциите, се претпоставува дека надворешните сили полека и мирно се зголемуваат од нула до некоја конечна вредност (т.н. статичко оптоварување), освен тоа се претпоставува дека при деформација не е надмината границата на еластичноста на телата. Работата на надворешните сили, која ќе ја обележиме со W , секогаш е позитивна (и во случај да дејствуваат повеќе сили од кои некои се негативни вкупната работа на сите сили секогаш е позитивна). Внатрешните сили пак (силите кои дејствуваат помеѓу материјалните честички на телото) се спротивставуваат на деформацијата на телото, со што вршат негативна работа. Работата на внатрешните сили, која ќе ја означиме со U , се акумулира во телото во облик на потенцијална енергија на деформација, со

ознака W_{pd} . Законот на одржување на енергијата во тој случај може да се прикаже како:

$$W = -U = W_{pd} \text{ и гласи:}$$

Работата на надворешните сили е еднаква на негативната работа на внатрешните сили, односно на акумулираната потенцијална деформациона енергија.

Акумулираната енергија е доволна при постепено растоварување телото да се врати во почетната недеформирана состојба, притоа надворешните сили вршат негативна работа, а внатрешните позитивна работа.

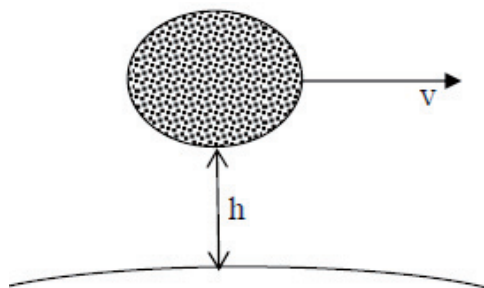
Да нагласиме дека вака формулиран законот за одржување на енергијата важи само при статички оптоварувања и при еластични деформации. Ако силата не дејствува постепено туку наеднаш, ќе се појави забрзување, па дел од работата се претвора во кинетичка енергија; ако пак деформациите не се еластични, дел од работата се претвора во топлина.

3.2 ВНАТРЕШНА ЕНЕРГИЈА, КОЛИЧЕСТВО ТОПЛИНА, СПЕЦИФИЧЕН ТОПЛИНСКИ КОЕФИЦИЕНТ

За да го објасниме процесот на пренос на енергија од системот на околината и обратно, се воведува поимот **внатрешна енергија** на системот или внатрешна енергија на телото која се бележи со U .

Внатрешната енергија на системот или телото се дефинира како вкупна енергија на тоа тело намалено за кинетичката енергија на телото како целина, и намалено за потенцијалната енергија на телото во некое надворешно поле.

Ова најлесно може да се замисли ако се разгледува гас со маса m во некој затворен сад кој се движи, слика 3.1.



Слика 3.1 Приказ за внатрешна енергија на телото

Внатре во садот гасот го сочинуваат молекули кои се движат, судираат, меѓусебно се привлекуваат. Целиот сад со гасот е во гравитационото поле на Земјата на висина h и има потенцијална енергија, а поради неговото движење има и кинетичка енергија.

Вкупната енергија на гасот е збир на неговата внатрешна енергија U , неговата потенцијална енергија W_p и неговата кинетичка енергија

$W_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$. До сега објаснувавме што не спаѓа во внатрешна енергија на телото, а треба да видиме што спаѓа.

Во **внатрешна енергија** спаѓа кинетичката енергија на сите молекули, енергијата на врските помеѓу молекулите и енергијата на врските внатре во самите молекули кои потекнуваат од неговите компоненти.

Ако разгледуваме систем од макроскопски тела тогаш внатрешната енергија на системот е еднаква на збирот на внатрешните енергии на телата.

Внатрешната енергија на системот или телата е функција на состојба на системот. Тоа значи дека кога системот се наоѓа во одредена состојба тој има иста вредност со внатрешната енергија, без обзир на кој начин дошол во таа состојба и без обзир во која состојба претходно се наоѓал. Кај идеалните гасови состојбата на гасовите е одредена со притисокот, волуменот и температурата.

Ако разгледуваме некоја количина на гас која се наоѓа во состојба 1 и има притисок p_1 , волумен V_1 и температура T_1 , тогаш неговата внатрешна енергија е U_1 . Ако состојбата на гасот се промени во состојба 2, така што термините на состојба на гасот се променат во p_2 , V_2 и T_2 тогаш и неговата внатрешна енергија се менува и станува U_2 . Ако гасот со било кој процес повторно се врати на првобитната состојба определена со големините p_1 , V_1 и T_1 , тогаш и неговата внатрешна енергија ќе биде U_1 .

Промената на внатрешната енергија на гасот (во претходно опишаниот случај на гасот) при преминот од состојба 1 во состојба 2 е еднаква на разликата на внатрешните енергии карактеристични за тие состојби:

$$\Delta U = U_2 - U_1$$

Ова промена не зависи од видот на процесот, односно начинот на кој е дојдено до промената на состојбата.

Топлината е вид на енергија, и како и сите видови на енергија, таа може да се пренесува од тело на тело и да се претвора во други видови на енергија. Нејзина единица мерка е џул [J].

За да ги разгледуваме процесите во кои доаѓа до пренос на топлотната енергија и останатите појави поврзани за топлината, се воведуваат поимите систем и околина.

Системот се однесува на збир од едно или повеќе тела, а сè што е надвор од овој систем на телата, но има директно влијание на однесување на системот се нарекува околина.

Кога системот и околината не се со иста температура, тие разменуваат топлотна енергија додека температурите не им се изедначат. Пренесената топлотна енергија од системот на околината и обратно се нарекува количество топлина и се бележи со Q [J]. Количеството топлина со алгебарски вредности може да биде позитивна и негативна:

- ❖ Во случај кога температурата на системот T_s е поголема од температурата на околината T_{ok} системот оддава количество топлина Q на околината и таа количина има негативен алгебарски знак.

- ❖ Во случај кога температурата на системот T_s е помала од температурата на околината T_{ok} околината оддава количество топлина Q на системот и таа количина има позитивен алгебарски знак.
- ❖ Во случај кога температурата на системот T_s е еднаква со температурата на околината T_{ok} , нема пренос на топлина од системот на околината и обратно, па $Q = 0$.

Ако некое тело се загрева со количество топлина кое е потребно да тоа се загрее од температура T_1 на T_2 , тогаш:

$$Q = C_T \cdot (T_2 - T_1) = C_T \cdot \Delta T$$

Големината C_T се нарекува топлински капацитет на телата и претставува количество топлина потребна да некое тело се загрее за еден степен (Целзиус или Келвин) и може да се претстави со изразот:

$$C_T = \frac{Q}{\Delta T} \left[\frac{J}{K} \right].$$

Количеството топлина која е потребна телото да се загрее за бесконечно мала разлика на температура dT , е

$dQ = C_T \cdot dT$, па топлинскиот капацитет може да се прикаже во следниов облик:

$$C_T = \frac{dQ}{dT}.$$

Топлинскиот капацитет е различен за тела од ист материјал но со различна маса, па би требало да се одредува за секое тело, што е непрактично и затоа се воведуваат други топлински капацитети, како моларниот топлински капацитет и **специфичниот топлински капацитет**.

Во овој случај ќе го разгледаме специфичниот топлински капацитет.

Ако некое тело со маса m се загрева со количество топлина кое е потребно да тоа се загрее од температура T_1 на T_2 тогаш:

$$Q = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Големината c се нарекува **специфичен топлински капацитет** и претставува количество топлина која е потребна некое тело со единична маса да се загрее за единична температура и може да се претстави со следниов израз:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \left[\frac{J}{kgK} \right].$$

Количеството топлина која е потребна тело со маса m да се загрее за бесконечно мала разлика на температура dT , е

$dQ = m \cdot c \cdot dT$, па специфичниот топлински капацитет може да се прикаже во следниов облик:

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT}.$$

Специфичниот топлински капацитет често се нарекува и специфична топлина.

3.3 ПРВ ЗАКОН НА ТЕРМОДИНАМИКАТА

Промената на внатрешната енергија на системот може да се врши со помош на два вида на процеси, и тоа:

- ❖ со доведување на количество топлина Q на системот и
- ❖ со вршење на работа над системот, и таа работа се бележи со W' .

Тоа може да се прикаже со следниов израз:

$$\Delta U = Q + W'$$

Ако околината врши работа над системот W' , тогаш врз основа на законот за акција и реакција може да се каже дека системот врши работа W врз околината која е еднаква со W' по апсолутна вредност, но со спротивен знак. Така што $W = -W'$.

Промената на внатрешна енергија врз основа на ова може да се претстави како:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - W$$

каде што:

U_1 = почетна вредност на внатрешната енергија во состојба 1;

U_2 = крајна вредност на внатрешната енергија на системот чија состојба се променила со доведување на количество на топлина Q и вршењето на работа W' ;

W = претставува работа која ја врши системот над околината.

Претходниот израз може да се прикаже и како:

$$Q = (U_2 - U_1) + W$$

Оваа равенка претставува **аналитички израз на Првиот закон на термодинамиката**, а кој гласи: количеството на топлина која се доведува во системот се троши за зголемување на внатрешната енергија и работа која системот ја врши над околината.

Ако во системот се доведе дел $\Delta'Q$ од вкупно доведеното количество топлина тогаш неговата внатрешна енергија ќе се промени за некоја друга ΔU и гасот ќе изврши дел $\Delta'W$ од вкупната работа, па може да се напише:

$$\Delta'Q = \Delta U + \Delta'W$$

Каде што само ΔU е вистинска разлика помеѓу крајната и почетната внатрешна енергија на системот, додека $\Delta'Q$ и $\Delta'W$ не можат да се дефинираат како разлика на крајната и почетната доведена топлина или работа туку само како делови од вкупно доведеното количество топлина односно вкупно извршената работа на системот над околината.

Првиот закон на термодинамиката може да се изрази и во следниов облик преку изразот:

$$\delta Q = dU + \delta W$$

Бесконечно малата количество на топлина δQ која се доведува во системот се троши на бесконечна мала промена на внатрешната енергија dU и на бесконечна мала работа δW која системот ја врши над околината.

Бесконечно малите промени δQ и δW не се вистински диференцијали бидејќи зависат од видот на процесот со кој системот ја менува состојбата, додека dU е вистински диференцијал бидејќи тоа е бесконечна мала разлика на две внатрешни енергии која зависи само од температурата.

3.4 ПРОМЕНА НА СОСТОЈБАТА НА ГАСОВИТЕ НА p-V ДИЈАГРАМ

Една од основните задачи на техничката термодинамика е да изнајде начин за добивање механичка работа во топлотните машини (постројки) со што помала потрошувачка на гориво. За таа цел треба да се проучат факторите што влијаат на големината на добиената механичка работа, цврстината на деловите на машината - постројките и големината на самата машина. Тие фактори во прв ред се основните големини на состојба: притисокот, температурата и волуменот, како и потребната количина топлина и добиената работа. Во општ случај, при промена на состојбата на некое работно тело се менуваат сите нејзини основни големини, но постојат и посебни промени на состојбата кај кои една од нејзините основни големини останува непроменета, а другите две се менуваат.

Такви промени на состојбата се:

- ❖ промена при константен волумен ($V = \text{const}$) - **изохора**,
- ❖ промена при константен притисок ($p = \text{const}$) - **изобара**,
- ❖ промена при константна температура ($T = \text{const}$) - **изотерма**,
- ❖ промена без размена на топлина ($Q = 0$) - **адијабата**,
- ❖ општа промена на состојбата - **политропа**.

Ако за некоја промена ги знаеме големините на почетната состојба и една големина на крајната состојба, можеме да ги пресметаме:

- ❖ другите големини на крајната состојба;
- ❖ добиената, односно вложената работа и
- ❖ разменетата количина на топлина.

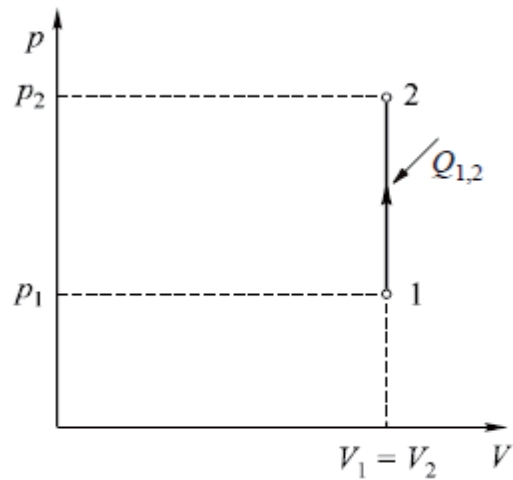
Кај сите споменати промени на состојбата се зема дека количината на работното тело (гасот) не се менува во текот на промената.

3.4.1 ПРОМЕНА НА СОСТОЈБАТА ПРИ КОНСТАНТЕН ВОЛУМЕН ($V = \text{const}$) - ИЗОХОРА

Изохора е таква промена на состојбата на работното тело кај која неговиот волумен останува непроменет.

Овој процес настанува само тогаш кога некое работно тело се загрева или лади во затворен сад.

Математичкиот облик за условите по кој тече изохорниот процес е:
 $V = \text{const}$.



Слика 3.2 Изохорна промена на состојба

Изохората прикажана графички во p - V дијаграм (сл.3.2) претставува права линија 1 - 2, паралелна со p – оската. Со примена на главната равенка на состојбата за почетна и крајна состојба:

$$p_2 V = mRT_2;$$

$$p_1 V = mRT_1,$$

со делење се добива:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow T_2 = T_1 \frac{p_2}{p_1}$$

Со примена на I закон на термодинамиката

$$Q_{1,2} = U_2 - U_1 = m \cdot c_v (T_2 - T_1) \text{ се добива:}$$

$$Q_{1,2} = m \cdot c_v \left(T_1 \frac{p_2}{p_1} - T_1 \right) = m \cdot c_v \cdot T_1 \left(\frac{p_2 - p_1}{p_1} \right)$$

или:

$$\frac{p_2 - p_1}{p_1} = \frac{Q_{1,2}}{m \cdot c_v \cdot T_1}$$

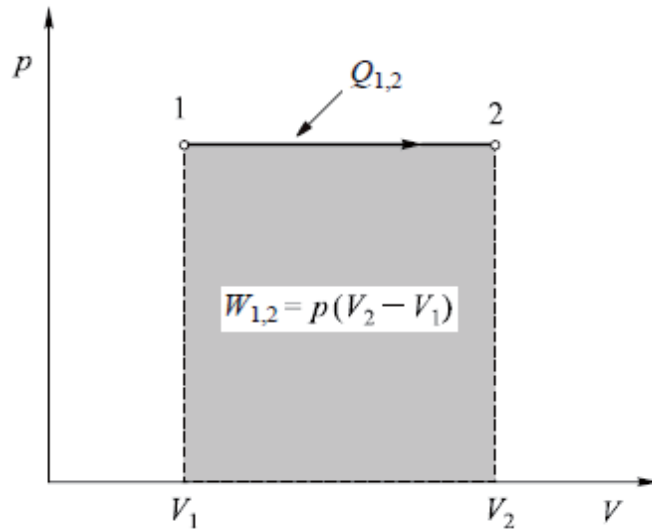
Температурата и притисокот растат кога се доведува топлина, а се намалуваат кога топлината се одведува (сл.3.2).

3.4.2 ПРОМЕНА НА СОСТОЈБАТА ПРИ КОНСТАНТЕН ПРИТИСОК ($p = \text{const}$) - ИЗОБАРА

Изобарата е таква промена на состојбата на работното тело кај која неговиот притисок останува непроменет.

Исто така овој процес настанува само тогаш кога некое работно тело се загрева или лади во затворен сад.

Математичкиот облик за условите под кој тече изобарниот процес е:
 $p = \text{const}$.



Слика 3.3 Изобарна промена на состојба

Изобарата прикажана графички во p-V дијаграм (сл.3.3) претставува права линија паралелна со V – оската.

Ако гасот го грееме, неговата состојба се менува од состојба 1 до состојба 2. Поради зголемувањето на температурата ќе се зголеми и волуменот, па според равенката на состојбата ќе се добие:

$$\frac{p_2 \cdot V_2}{p_1 \cdot V_1} = \frac{R \cdot T_2}{R \cdot T_1}, \text{ бидејќи } p_1 = p_2 = \text{const}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}, \text{ т.е гасот го зголемува волуменот при доведување на топлина}$$

(види слика 3.3).

Работата при промена на волуменот се определува со равенката:

$$W_{1,2} = p \cdot (V_2 - V_1)$$

Според I главен закон доведената топлина е:

$$Q_{1,2} = U_2 - U_1 + W_{1,2} = U_2 - U_1 + p \cdot (V_2 - V_1)$$

$$Q_{1,2} = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) + m \cdot R \cdot (T_2 - T_1)$$

$$Q_{1,2} = m \cdot (T_2 - T_1)(c_v + R)$$

$$Q_{1,2} = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

каде што:

c_v =специфична топлина при $V=\text{const}$.

c_p =специфична топлина при $p=\text{const}$. ($c_p = c_v + R$).

Процесите со постојан притисок се многу чести во техниката. Така на пример течат сите процеси при струење при $p=\text{const}$. Овие процеси се важни за изменувачите на топлина. За тие процеси важи равенката:

$Q_{1,2} = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$, со што масата на гасот и изменетата топлина е изразена во единица време. На тој начин можат сите односи, кои ги добивме во изобарните процеси, да се применат и на струењата на гасовите.

3.4.3 ПРОМЕНА НА СОСТОЈБАТА ПРИ КОНСТАНТНА ТЕМПЕРАТУРА ($T = \text{const}$) - ИЗОТЕРМА

Изотерма е таква промена на состојбата на работното тело кај која неговата температура останува непроменета.

Оваа промена се појавува при процеси кои се одвиваат многу бавно, така што има време температурата на работното тело да се изедначи со температурата на околината.

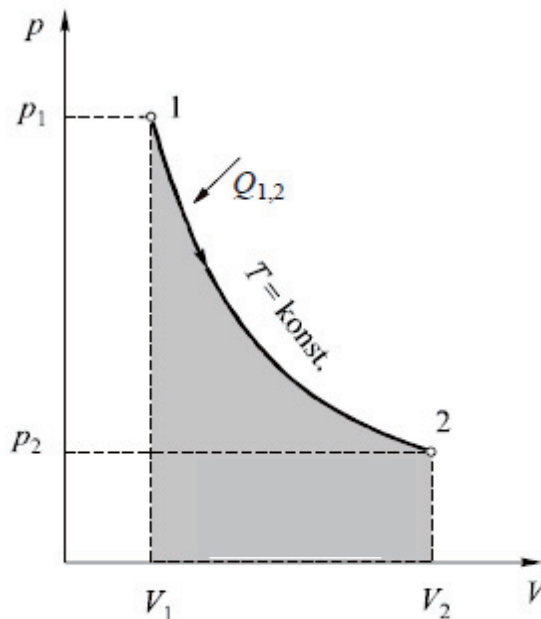
Математичкиот облик за условите под кои тече изотермниот процес е:

$$T = \text{const}$$

При изотермниот процес на идеален гас односот меѓу p и V се дефинира со Бојл - Мариотовиот закон:

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 = p \cdot V = \text{const}$$

Изотермната промена графички претставена во p - V дијаграм претставува истострана хипербола (сл.3.4) и нејзината положба во дијаграмот зависи од температурата при која се одвива процесот. Колку е повисока температурата толку кривата е повисоко поставена во p - V дијаграмот ($t > t_0$).



Слика 3.4 Изотермна промена на состојба

Според I главен закон:

$$Q_{1,2} = U_2 - U_1 + W_{1,2} = dU + W_{1,2}$$

бидејќи $T = \text{const}$ следува дека: $dT = 0$ односно $dU = 0$, или:

$$Q_{1,2} = W_{1,2}$$

Значи, кај идеалните гасови поради тоа што $T=const$ следува дека $U_1 = U_2$.

Кај изотермните промени внатрешната енергија не се менува, а сета доведена топлина се претвора во работа која можеме да ја пресметаме од почетната и крајната состојба:

$$W_{1,2} = m \cdot R \cdot T \ln \frac{V_2}{V_1} = m \cdot R \cdot T \ln \frac{p_1}{p_2}, \text{ или:}$$

$$W_{1,2} = p_1 \cdot V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = p_2 \cdot V_2 \ln \frac{p_1}{p_2} = p \cdot V \ln \frac{p_1}{p_2}$$

3.4.4 ПРОМЕНА НА СОСТОЈБАТА БЕЗ РАЗМЕНА НА ТОПЛИНА ($Q = 0$) - АДИЈАБАТА

Адијабата е таква промена на состојбата на работното тело која се одвива без доведување и одведување топлина однадвор.

Оваа промена графички претставена во p - V дијаграм (сл.3.5), претставува општа хипербола и споредена со изотермата е малку пострмна.

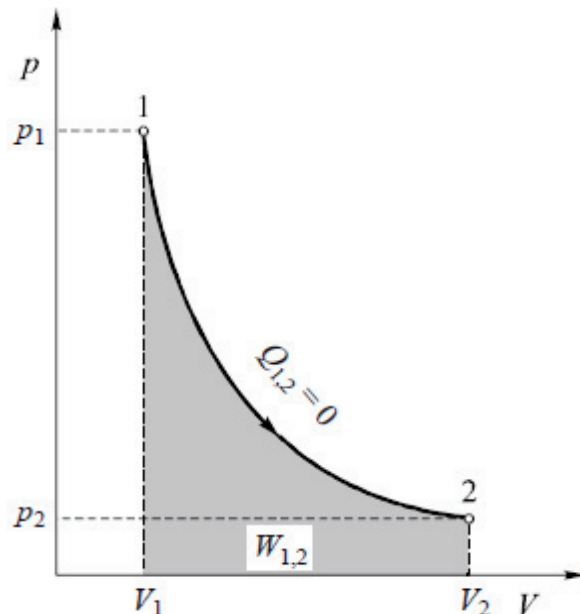
Според I главен закон:

$$Q_{1,2} = dU + W_{1,2}.$$

Бидејќи $Q=0$, следува дека $Q_{1,2} = 0$, и се добива:

$$dU = -W_{1,2}$$

$$U_2 - U_1 = -W_{1,2} \text{ или } W_{1,2} = U_1 - U_2$$



Слика 3.5 Адијабатска промена на состојба

Кај адијабатската промена на состојбата, како што гледаме, работата се врши исклучиво на сметка на промената на внатрешната

енергија на работното тело со тоа што адијабатската експанзија (ширење) предизвикува ладење на телата, а адијабатската компресија (збивање) загревање на телата. Равенката на адијабата ни е потребна кога треба да се пресмета промената на температурата на работниот медиум.

А математички таа се искажува со равенката:

$$p \cdot v^\kappa = \text{const}$$

каде што κ претставува експонат на адијабатата, односно Поасонова константа.

Притисокот и волуменот од равенката на адијабатата ќе бидат:

$$p_1 \cdot v_1^\kappa = p_2 \cdot v_2^\kappa \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^\kappa.$$

Волуменот и температурата од равенката на адијабата и равенката за состојба:

$$\frac{p_1 \cdot v_1}{T_1} = R \text{ и } \frac{p_2 \cdot v_2}{T_2} = R$$

$$\frac{p_1 \cdot v_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot v_2}{T_2} \Rightarrow p_1 \cdot v_1 \cdot T_2 = p_2 \cdot v_2 \cdot T_1 \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1 \cdot T_2}{v_2 \cdot T_1}.$$

Ако тој израз го примениме во следнава равенка:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^\kappa, \text{ ќе добиеме:}$$

$$\frac{v_1 \cdot T_2}{v_2 \cdot T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^\kappa, \text{ а оттука:}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1}.$$

Притисокот и температурата од равенката

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^\kappa \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}},$$

а ако во тој израз ја примениме равенката $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1}$, ќе добиеме:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}.$$

За извршена работа при адијабатска промена на состојбата ќе се добие:

$$W = U_1 - U_2 = m \cdot c_v \cdot (T_1 - T_2) = m \cdot c_v \cdot T_1 \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right).$$

Ако наместо $\frac{T_2}{T_1}$ ја внесеме горната равенка, а бидејќи $c_v = \frac{R}{\kappa-1}$ ќе добиеме:

$$W_{1,2} = \frac{m \cdot R \cdot T_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right],$$

А со помош на равенката на состојбата ќе се добие следниов израз:

$$W_{1,2} = \frac{p_1 \cdot V_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right].$$

3.4.5 ОПШТА ПРОМЕНА НА СОСТОЈБАТА - ПОЛИТРОПА

Кај вистински изведените топлотни машини, промената на состојбата, односно компресијата или експанзијата никогаш не се одвиваат ниту по изотерма, ниту по адијабата, бидејќи условите за овие промени на состојбата не можат при реалните процеси да се постигнат. Вистинските промени на состојбата во p - V дијаграм претставуваат некоја општа хипербола чиј експонент n се разликува од оној при адијабатата κ . Според тоа, вистинските процеси се одвиваат по равенката:

$$p \cdot v^n = \text{const}$$

Таквата промена се нарекува **политропа** (поли-повеќе, етропо-промени).

Во горната равенка експонентот n може да има најразлични вредности, (од $-\infty$ до $+\infty$) зависи од видот на гасот и видот на промената и се нарекува **степен на политропа**. Политропата уште се нарекува и општа промена на состојбата, бидејќи за разни вредности на n се добиваат основните промени, и тоа:

- ❖ за $n = 1$ $pV = \text{const}$ - изотерма;
- ❖ за $n = \kappa$ $pV^\kappa = \text{const}$ - адијабата;
- ❖ за $n = 0$ $p = \text{const}$ - изобара;
- ❖ за $n = \pm \infty$ $V = \text{const}$ - изохора.

Значи, основните промени на состојбата се посебни случаи на политропската промена. Бидејќи вистинските процеси најчесто се одвиваат по криви меѓу адијабатата и изотермата, степенот на политропата најчесто ќе има вредности меѓу 1 и κ .

Равенките што ги изведовме за адијабатата важат и за политропата, само што степенот (експонентот) κ се заменува со n .

Односите меѓу притисокот и волуменот; волуменот и апсолутната температура и притисокот и температурата се :

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^n \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}};$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{n-1} \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{n-1}};$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{n}{n-1}}.$$

Работата при промена на волуменот кај политропата се определува по следниве изрази:

$$W_{1,2} = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2)$$

$$W_{1,2} = \frac{R \cdot T_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$W_{1,2} = \frac{p_1 \cdot V_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right], \text{ а оттука:}$$

$$W_{1,2} = \frac{1}{n-1}(p_1 \cdot V_1 - p_2 \cdot V_2).$$

Количината топлина што се разменува со околината при политропска промена изнесува:

$$Q_{1,2} = m \cdot c_n \cdot (T_2 - T_1)$$

Каде c_n е средна политропска специфична топлина која се пресметува по изразот:

$$c_n = c_v \cdot \frac{n - \kappa}{n - 1}$$

Кога степенот на политропата n при експанзија не се менува според претходната равенка, $c_n = \text{const}$. Доколку $1 < n < \kappa$, предзнакот пред c_n ќе биде негативен (-). Ова нешто настанува бидејќи при доведување топлина при експанзијата гасот сепак се лади. При компресијата случајот е обратен, топлината се одведува, а температурата сепак расте.

Степенот на политропата n може да се определи преку логаритмирање на претходната равенка за почетната и крајната состојба:

$$p_1 \cdot V_1^n = p_2 \cdot V_2^n \Rightarrow \log p_1 + n \cdot \log V_1 = \log p_2 + n \cdot \log V_2$$

$$\log p_1 - \log p_2 = n \cdot \log V_2 - n \cdot \log V_1$$

$$n = \frac{\log p_1 - \log p_2}{\log V_2 - \log V_1}.$$

3.5 РЕШАВАЊЕ НА ПРОБЛЕМИ ПРИ ПРОМЕНА НА СОСТОЈБАТА НА ГАСОВИТЕ ВО p-V ДИЈАГРАМ

Тука ќе разгледаме неколу примери, за да се добие појасна слика при решавањето на проблемите при промена на состојбата на гасовите.

Пример 3.1

Два килограми кислород се грее при константен волумен од 27°C на 300°C. Треба да се одреди апсолутниот притисок по загревањето и

количината на потрошената топлина ако почетниот притисок е 98,066 kPa. Промената да се нацрта во p-V дијаграм!

Решение:

Од равенката на состојбата при $V=\text{const}$ се добива

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}, \text{ а оттука}$$

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 98,066 \cdot \frac{573}{300} \text{ (}^\circ\text{C се претвораат во K)}$$

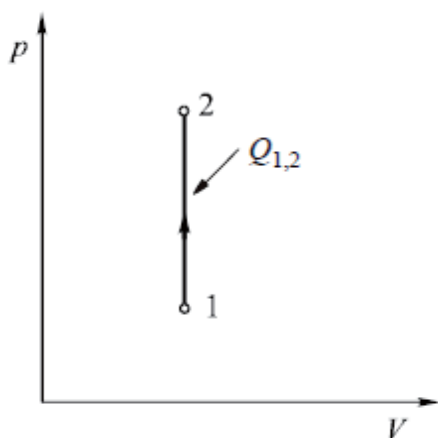
$$p_2 = 187,306 \text{ [kPa]}$$

Количината на потрошената топлина ќе ја пресметаме со:

$$Q_{1,2} = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) = 2 \cdot \frac{20,93}{32} \cdot (573 - 300)$$

$$Q_{1,2} = 357,12 \text{ [kJ]}$$

Приказот ќе биде следниов дијаграм:



Пример 3.2

Со адијабатска компресија се намалува почетниот волумен на воздухот за 14 пати. Колку изнесува крајната температура и притисок, ако почетниот притисок е 98,066 [kPa], а температурата 100°C?

Решение:

Со користење на зависноста помеѓу температурата и волуменот кај адијабатската промена на состојба за T_2 ќе добиеме:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} = 373 \cdot \left(\frac{V_1}{\frac{1}{14} \cdot V_1} \right)^{1,4-1} = 373 \cdot 14^{0,4}$$

$T_2 = 1072 \text{ K}$ или ако претвориме во степени целзиусови ќе добиеме:

$$t_2 = 799^\circ\text{C}$$

Притисокот ќе го пресметаме на следниов начин:

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 98,066 \cdot \left(\frac{1072}{373} \right)^{1,4}$$

$$p_2 = 3946,57 \text{ [kPa]} \text{ или } 39,47 \text{ [bar]} \text{ (1bar=10}^5\text{Pa)}.$$

Пример 3.3

Воздух со температура од 272°C и притисок 735,50 [kPa] експандира на температура од 27°C и притисок 90,71[kPa]. Да се најде:

- а) експонентот на промената, односно видот на промената?
б) изменетата количина топлина во kJ и корисната работа во kJ/kg?

Решение:

а) Со користење на зависноста помеѓу температурата и волуменот кај политропска промена на состојба ќе добиеме:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \text{ и ако ги логоритмираме левата и десната страна:}$$

$$\log \frac{T_2}{T_1} = \frac{n-1}{n} \log \frac{p_2}{p_1}$$

$$\log \frac{300}{545} = \frac{n-1}{n} \log \frac{90,71}{735,50}, \text{ за } n \text{ ќе се добие:}$$

$$n = 1,396 \approx 1,4 \Rightarrow \text{адијабата}$$

$$\left(\frac{c_p}{c_v} = \kappa = 1,4 \text{ за двоатомни гасови} \right)$$

Гас	c_v kJ/kmol K	c_p kJ/kmol K
Едноатомни	12,5	20,8
Двоатомни	20,8	29,1
Тро и повеќеатомни	29,1	37,4

б) Бидејќи $Q_{1,2} = 0$, за работата ќе се добие:

$$w_{1,2} = \frac{R \cdot T_1}{\kappa - 1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = \frac{8,314}{29} \cdot 545 \left(1 - \frac{300}{545} \right)$$

$$w_{1,2} = 175,60 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right].$$

Пример 3.4

1 [kg] воздух експандира од температура 25°C и притисок 4 [bar] на притисок од 1 [bar].

- а) изотермно;
б) адијабатски ($\kappa=1,4$);
в) политропски ($n=1,2$).

Треба да се одреди T_2 , $w_{1,2}$ и $q_{1,2}$?

Решение:

а) $T_2 = T_1$

$$q_{1,2} = w_{1,2} = R \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{8,314}{29} \cdot 298 \cdot 2,3 \log \frac{4}{1}$$

$$q_{1,2} = w_{1,2} = 118,30 \left[\frac{kJ}{kg} \right].$$

$$\text{б) } T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 298 \left(\frac{1}{4} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}}$$

$$\log T_2 = \log 298 + \frac{1,4-1}{1,4} \log \frac{1}{4}$$

$$T_2 = 200 \text{ [K]}$$

$$Q_{1,2} = 0$$

$$w_{1,2} = \frac{R}{\kappa-1} (T_1 - T_2) = \frac{8,314}{1,4-1} (298 - 200)$$

$$w_{1,2} = 70,24 \left[\frac{kJ}{kg} \right].$$

$$\text{в) } T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 298 \left(\frac{1}{4} \right)^{\frac{1,2-1}{1,2}}$$

$$T_2 = 273 \text{ [K]}$$

$$w_{1,2} = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{8,314}{1,2-1} (298 - 273)$$

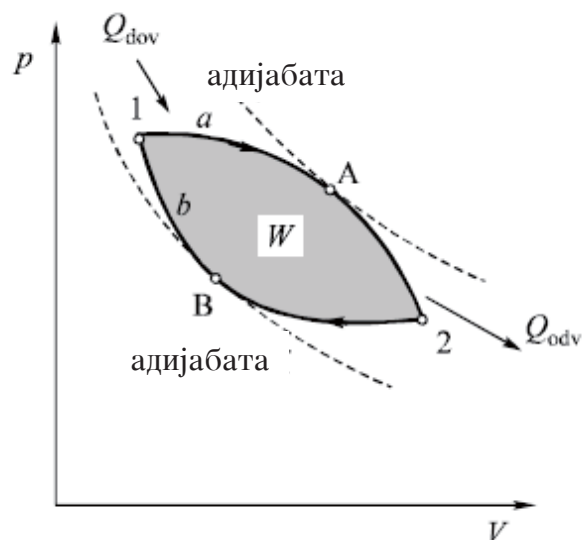
$$w_{1,2} = 87,44 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$q_{1,2} = c_v \frac{n-\kappa}{n-1} (T_2 - T_1) = \frac{20,93}{29} \cdot \frac{1,2-1,4}{1,2-1} \cdot (273 - 298)$$

$$q_{1,2} = 44,03 \left[\frac{kJ}{kg} \right].$$

3.6 ОСНОВНИ ПРИНЦИПИ НА КРУЖНИТЕ ЦИКЛУСИ

Основните промени на состојбата што ги проучивме настануваат само еднаш, односно само еднаш се вложуваше топлина и се добиваше работа. Ова за техниката е недоволно, бидејќи за континуирано претворање на топлината во механичка работа тие процеси треба непрекинато да се повторуваат. Во тој случај работното тело треба да се врати во почетната состојба, односно на првобитен притисок, температура и др. Термодинамичките процеси кај кои работното тело проаѓајќи низ различни состојби повторно се враќа во првобитната состојба се нарекуваат **кружни процеси или циклуси**.



Слика 3.6 Доведување и одведување на топлина за кружниот процес

На слика 3.6 е прикажан произволен циклус на работно тело во p-V дијаграм. Работното тело експандира по кривата 1-2 и при тоа врши работа W_a . За да го вратиме работното тело во почетната состојба, односно да се заврши циклусот, потребно е тоа да се компримира по кривата 2-1, а за тоа е потребно да се потроши работа W_b . На крајот од циклусот како резултат ќе се добие корисна работа, како разлика на работата на експанзија и компресија која е дадена со површината 1-2-1 (W). Добиената работа:

$$W = W_a - W_b$$

Оваа добиена работа може да се користи за извршување на разни корисни работи. Во случајов промената на состојбата во p-V дијаграм се одвиваше во насоката на движењето на стрелката на часовникот, односно деснонаочно, и се добиваше корисна работа. Истиот циклус може да се одвива и во обратна насока (налево), наречен лев процес, во кој сумарната работа е негативна, односно, за да се изврши овој процес мораме да доведуваме работа.

За извршување на кружен процес потребно е во еден дел да се доведува топлина на работното тело, а во друг дел да се одведува топлина. За да ги одделиме овие делови вртваме две адијабати (сл.3.6), така што ги тангираат кривите на компресија и експанзија во точките A и B, и во овие точки од процесот ниту ќе се доведува, ниту ќе се одведува топлината (при адијабатата $Q = 0$). Во другите точки од процесот ќе се врши размената на топлина и тоа при деснонаочниот процес на делот B-1-A ќе се доведува топлина Q_1 , а во делот A-2-B ќе се одведува топлина Q_2 . Значи, за добивање корисна работа од процесот треба $Q_1 > Q_2$.

Ако за наведениот процес ја разгледаме внатрешната енергија на работното тело, видливо е дека во текот на промената таа се менува, но на крајот пак ја добива почетната вредност, бидејќи работното тело се враќа во првобитната состојба. Значи, при затворен кружен процес внатрешната енергија на почетокот и на крајот од процесот има иста вредност, така што конечната промена на внатрешната енергија изнесува:

$$\Delta U = 0.$$

Согласно со Првиот главен закон може да се напише:

$$Q = \Delta U + W,$$

при што:

$$Q = Q_1 - Q_2,$$

и со замена се добива:

$$W = Q_1 - Q_2$$

Значи, при кружните процеси добиената работа е еднаква на разликата на доведената и одведената топлина.

Доведената количина топлина Q_1 на работното тело не се претвора цела во работа, туку еден дел (Q_2) се одведува од процесот како неупотребен. За да се доведе топлината Q_1 на работното тело мора да постои **извор на топлина** со температура повисока од највисоката постигната температура во текот на процесот. Ако тоа не се обезбеди, не може да настане доведување на топлина.

За одведување на топлината Q_2 од процесот, мора да постои **понор на топлина**, со температура пониска од најниската температура која е постигната во текот на процесот.

Од горното произлегува дека, за претворање на топлината во механичка работа потребно е да се има не само топлотен извор туку и топлотен понор (вода за ладење, воздух или друга околина) кој ќе обезбеди одведување на топлината од процесот.

Односот меѓу претворената топлина во работа и вкупно доведената топлина во процесот се нарекува **топлотен** или **термодинамички коефициент на корисно дејство** на циклусот и е еднаков на:

$$\eta_t = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

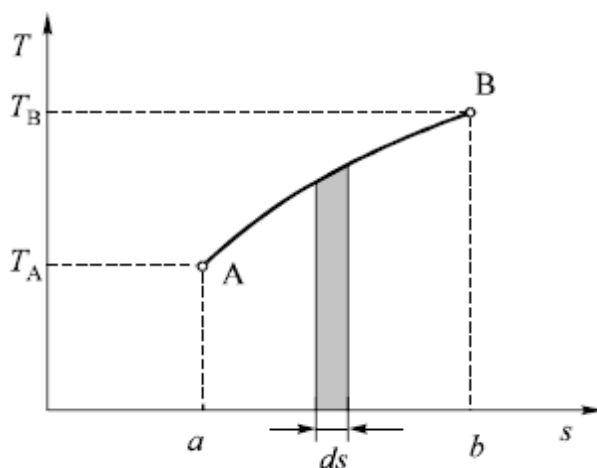
Бидејќи одведената топлина Q_2 е само дел од фактички доведената топлина Q_1 ($Q_2 < Q_1$) тогаш $\frac{Q_2}{Q_1} < 1$ и $\eta_t < 1$. Значи, при деснонасочените

термодинамички процеси ниту при идеални теоретски услови не може да се постигне коефициентот на искористување да е рамен на единица.

Ако кружниот процес се врши во обратна насока (налево), тогаш за време на промената (компресија) се одведува топлина Q_1 , а за време на промената (експанзија) се доведува топлина Q_2 . Одведената топлина Q_1 е поголема од доведената топлина Q_2 за износот на доведената работа W , која се претвора во топлина, односно за сметка на доведената работа W се врши пренесување на топлината од поладно на потопло тело. Значи, во никој случај топлината не може да преминува сама од себе од поладно на потопло тело. За да се постигне оваа цел, мора да се потроши определена количина механичка работа. Топлината сама од себе преминува од тело со повисока температура на тело со пониска температура и при таков премин таа не се претвора во механичка работа. Ако сакаме топлината да ја претвориме во механичка работа, треба меѓу двете тела со различна температура (изворот на топлина и понорот на топлина) да се постави топлотна машина во која дел од топлината ќе се претвори во механичка работа, а дел ќе се одведе како неискористен.

3.7 ЕНТРОПИЈА

Досега процесите ги прикажувавме исклучително во p - V дијаграм, наречен работен дијаграм, бидејќи производот на неговите координатни големини ја даваат механичката работа. При претворањето на топлината во механичка работа таа се добива како разлика на доведената и одведената топлина, но големините на тие топлини не можат да се согледаат во p - V дијаграмот. Затоа се постави прашањето, на кој начин со мерењето на некои површини од некој дијаграм би се определиле топлините што учествуваат во процесот. За таа цел се воведува поимот **топлотен дијаграм**, а производот на координатните големини ќе ја дава количината на топлина. Поаѓајќи од основниот услов за премин на топлина, се наметна едната координата да биде температурата, додека другата ја означуваме со S и ја нарекуваме **ентропија**. Оваа нова големина засега нека биде само помошна математичка големина.



Слика 3.7 Приказ на промена на состојбата во T - s дијаграм

На дијаграмот од сл.3.7, на координатата ја нанесуваме апсолутната температура T , а на апсцисата новата големина S . Нека промената на состојбата на гасот се одвива од точ.А до точ.В. Површината ABS_bS_a ја претставува топлината вложена во процесот Q . Да замислиме дека во текот на процесот доведената топлина пораснала за некоја мала големина ΔQ , чиј износ е претставен со двојно шрафирана површина. Од сликата се гледа дека со доста голема точност таа површина може да се смета како правоаголник со страните ΔS и T , каде ΔS е сосема мала промена на ентропијата. Тогаш:

$$\Delta Q = T \cdot \Delta S$$

од каде:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \left[\frac{J}{K} \right]$$

Доколку се земе ентропија за единица маса, доаѓаме до поимот специфична ентропија која ја означуваме со s и:

$$s = \frac{S}{m} \left[\frac{J}{kgK} \right]$$

Единици за мерење на ентропијата и специфичната ентропија се исти како и единиците за топлотен капацитет, односно за специфична топлина.

Ако се познати основните големини на состојбата на гасот, ентропијата на гасните тела може да се пресмета според следниве изрази, до кои е дојдено со примена на виша математика:

$$s - s_0 = c_p \cdot \ln \frac{T}{T_0} - R \cdot \ln \frac{p}{p_0}$$

$$s - s_0 = c_p \cdot \ln \frac{v}{v_0} + c_v \cdot \ln \frac{p}{p_0}$$

$$s - s_0 = c_v \cdot \ln \frac{T}{T_0} + R \cdot \ln \frac{v}{v_0}$$

Каде што s_0 е почетна ентропија, и е договорено дека при физичка нормална состојба ($T=273$ [K] и $p = 101325$ [Pa]) $s_0 = 0$.

Од горниве равенки се гледа дека ентропијата може да се пресмета кога се знаат две основни големини на состојбата.

Ентропијата, како и притисокот, температурата, волуменот, внатрешната енергија и енталпијата претставува основна големина на состојбата. За разлика од притисокот, температурата и специфичниот волумен, ентропијата е недопирлива и немерлива големина.

Потребно е да се нагласи дека сите пресметки каде што се појавува ентропијата се вршат со промена на ентропијата меѓу двете состојби А и В (или ако место А запишеме 1, а место В 2), при што горенаведените равенки во општ случај ќе го имаат следниот облик:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_p \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} + c_v \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Доведената топлина, според равенката $\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$ е еднаква на производот од апсолутната температура T на тоа тело и прирастот на ентропијата ΔS на истото тело. Бидејќи може да биде $\Delta Q \leq 0$, тогаш и прирастот на ентропијата на некое тело $\Delta S \leq 0$. При доведување топлина на некое тело неговата ентропија расте, и обратно при одведување топлина од некое тело неговата ентропија опаѓа. При адијабатската промена, каде немаме размена на топлина, промената на ентропијата е еднаква на 0.

Големината на промената на ентропијата е зависна од количината на разменетата топлина и висината на температурата при која се врши таа размена на топлина. При размена на иста количина топлина, еднаш при високи температури, а втор пат при ниски температури, промената на ентропијата во првиот случај ќе биде помала, отколку во вториот. Ова можеме да го согледаме на следниов пример.

Ако разгледаме две општи промени при различни висини на температурите ($T > T'$), со тоа што и кај двете промени се разменува иста количина топлина ($Q = Q'$), односно двете површината се еднакви и ако ΔQ е со поголема T , а $\Delta Q'$ со помала T' , прирастот на ентропијата ΔS за двете промени битно ќе се разликува ($\Delta S' \gg \Delta S$).

Ако кај повратните процеси ја земеме во предвид промената на ентропијата на изворот на топлина и работното тело, тогаш промената на ентропијата на изворот на топлина ќе се смалува за толку колку што ќе порасне промената на ентропијата на работното тело. Вкупната промена на ентропијата ќе биде еднаква на нула. Истото важи и за кружните повратни процеси. Во текот на промената, промената на ентропијата во одделни фази расте или опаѓа, но вкупната промена на ентропијата за целиот систем кај повратните кружни процеси е еднаква на нула.

Кај неповратните процеси промената на ентропијата се зголемува. Ова можеме да го предочиме ако го разгледаме следниов пример.

Ако тело 1 со температура T_1 врши размена на топлина со телото 2, чија температура $T_2 < T_1$ според Вториот главен закон, преминот на топлина ќе се врши само во една насока, и тоа од телото 1 на телото 2. Таков премин на топлина е типично неповратен процес. Од телото 1 се одведува топлина ($-\Delta Q$) и таа е рамна на: $-\Delta Q = T_1 \cdot \Delta S_1$. На телото 2 му доведуваме топлина ($+\Delta Q$), која изнесува: $\Delta Q = T_2 \cdot \Delta S_2$. Тогаш промените на ентропијата на телата би биле: $\Delta S_2 = \Delta Q / T_2$ и $\Delta S_1 = -\Delta Q / T_1$. Вкупната промена на ентропијата на целиот систем ќе биде:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -\frac{\Delta Q}{T_1} + \frac{\Delta Q}{T_2} = \Delta Q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) > 0$$

Од претходната равенка следува, $\Delta S > 0$ бидејќи $T_1 > T_2$, односно вкупната промена на ентропијата на системот ќе расте, иако прирастот на ентропијата на едното тело се смалува.

Врз основа на примерот можеме да заклучиме дека при неповратните процеси вкупниот прираст на ентропијата може само да расте. Доколку овој прираст е помал, дотолку неповратниот процес се доближува до повратниот. Значи, прирастот на ентропијата при одреден процес може да се земе како мерило за повратноста или неповратноста на процесот, односно да биде мерило за совршеноста на процесот при претворањето на топлината во механичка работа.

Врз основа на изнесеното сега може да се заклучи дека од претходниот пример топлината Q повеќе е способна за претворање во механичка работа од топлината Q' , бидејќи $\Delta S \ll \Delta S'$.

Со воведување на поимот ентропија како мерило за совршеноста на некој процес при претворањето на топлината во механичка работа, всушност претходноспоменатиот израз:

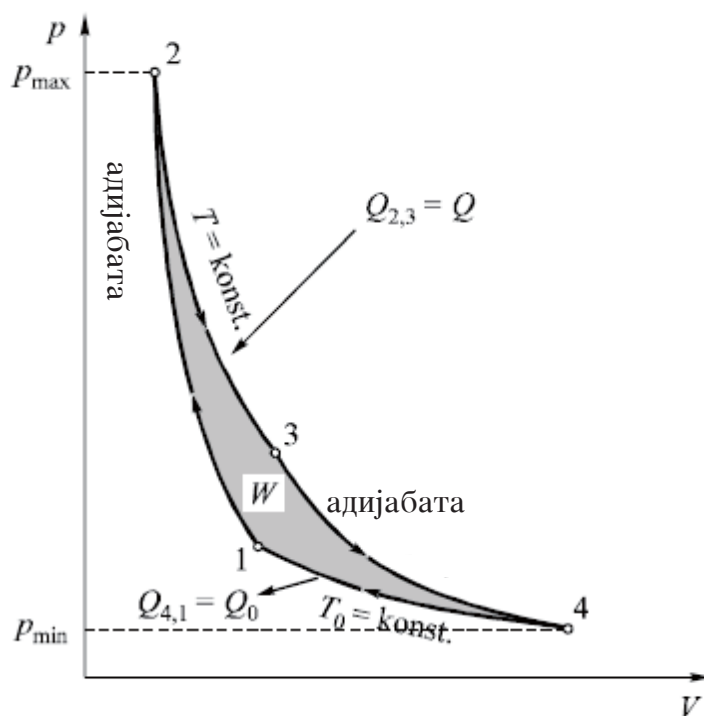
$$\Delta Q = T \Delta S$$

претставува аналитички израз на Вториот закон.

3.8 КАРНОВ ЦИКЛУС

На слика 3.8 е прикажан еден карактеристичен кружен процес, проучуван од Карнот и по него наречен Карнотов процес. Од сликата се гледа дека овој процес е составен од две изотерми и две адијабати.

Процесот тече вака: гасот експандира од точката 2 до точката 3 по изотерма, а од точката 3 до точката 4 по адијабата. Компресијата почнува во точката 4 и до точката 1 се одвива по изотерма, а од точката 1 до почетната состојба 2 по адијабата. За одвивање на циклусот постојат топлотен извор (ТI) со температура t_i и топлотен понор (ТР) со температура t_p . За да се оствари премин на топлина од ТI на работното тело во текот на изотермата 2-3 чија температура е $t = \text{const}$, треба $t_i > t$. За да се овозможи одведување топлина во текот на изотермата 4-1, чија температура $t_0 = \text{const}$, треба $t_0 > t_p$. Бидејќи промената на состојбата на работното тело од 3-4 и 1-2 се одвива по адијабата, немаме премин на топлина.



Слика 3.8 Карнотов кружен процес

Како и за сите циклуси така и за Карнотовиот кружен процес термодинамичкиот коефициент на корисно дејство ќе биде:

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Бидејќи доведувањето и одведувањето на топлината се одвива по изотермите 2-3 и 4-1, тогаш според равенките при промена на состојба при константна температура, имаме:

$$Q_1 = m \cdot R \cdot T_2 \cdot 2,303 \lg \frac{V_2}{V_3} \quad (T_2 = T_3)$$

$$Q_2 = m \cdot R \cdot T_1 \cdot 2,303 \lg \frac{V_1}{V_4} \quad (T_1=T_4)$$

Ако претходните изрази ги замениме во равенката за η_t , ќе добиеме:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1 \cdot \lg \frac{V_2}{V_3}}{T_2 \cdot \lg \frac{V_1}{V_4}}$$

Од равенките за адијабатите 3-4 и 1-2, според равенката $\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{k-1}}$,

следува:

$$\frac{V_4}{V_3} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{1}{k-1}} \quad \text{или} \quad \frac{V_4}{V_3} = \left(\frac{T_2}{T_4}\right)^{\frac{1}{k-1}}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \quad \text{или} \quad \frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_2}{T_4}\right)^{\frac{1}{k-1}}.$$

Десните страни на претходните равенки се еднакви, тогаш еднакви се и левите:

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{V_1}{V_2},$$

односно со средување се добива:

$$\frac{V_2}{V_3} = \frac{V_1}{V_4}.$$

Сега во равенката за η_t можеме да ги скратиме членовите (во горната формула), и за термодинамичкиот коефициент на корисно дејство на Карнотовиот кружен процес добиваме:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

Анализирајќи ја равенката доаѓаме до следниве заклучоци:

Коефициентот на корисно дејство - η_t на Карнотовиот кружен процес расте со зголемување на температурата T_2 , при која се доведува топлина во процесот, и со намалување на температурата T_1 при која се одведува топлина од процесот. Значи за зголемување на η_t на Карнотовиот процес треба да се оди кон зголемување на температурата на топлотниот извор и кон смалување на температурата на топлотниот понор.

η_t на Карнотовиот кружен процес секогаш е помал од единица. Тој би бил единица при $T_2 = \infty$ или при $T_1 = 0$ (т.е. при $t_1 = -273^\circ \text{C}$), што практично е невозможно, бидејќи температурата на околината секогаш и секогаш е поголема од 0 К.

При еднакви температури на топлотниот извор и на топлотниот понор ($T_2 = T_1$), η_t на Карнотовиот кружен процес е рамен на нула.

Карнотовиот кружен процес во однос на термодинамичкиот коефициент на корисно дејство е најдобар од сите можни процеси и

претставува граничен случај, кој не само што не може да се надмине фактички и не може да се постигне. Тој ни служи како мерило за споредба на совршеноста на изведените машини.

Процесот даден на слика 3.8 се одвива деснонасочно и како резултат дава работа W . Истиот процес може да се одвива и налево, при што мора да се доведува работа во процесот, и во тој случај на делот 1-4 ќе се одземе топлина од TR , а во делот на 3-2 ќе се оддава топлина на TI . Значи, со лев Карнотов процес, со вложување работа во процесот, вршиме премин на топлина од поладно (TR) на потопло тело (TI), односно левиот Карнотов процес се јавува како дигалка на топлина.

3.9 ВТОР ГЛАВЕН ЗАКОН НА ТЕРМОДИНАМИКАТА

Од изложеното во претходниот дел можеме да заклучиме дека за претворање на топлината во механичка работа мора да постојат топлотен извор и топлотен понор со различни температури, односно треба да постојат два резервоара на топлина.

Спротивно на горното, при претворањето на механичката работа во топлина, на пример при триењето (при спуштање на некој тег преку макара со кочење), може целокупната работа да се претвори во топлина и да се одведе во еден единствен топлотен резервоар (топлотен понор). Значи, за да се претвори механичката работа во топлина, доволно е да се има само еден топлотен резервоар.

Од изложеното може да се заклучи дека процесите на претворање на топлината во механичка работа битно се разликуваат од процесите на претворање на механичката работа во топлина, имено во првиот случај се потребни два топлотни резервоара (извор и понор на топлина), а во вториот само еден топлотен резервоар (понор на топлина).

Исто така треба да се потенцира условот дека меѓу двата топлотни резервоара мора да постои температурна разлика, што е основен услов за премин на топлината. Иако во морето и воздухот има големи количини топлина, таа не може да биде искористена во некоја топлотна постројка, од причини што немаме втор резервоар на топлина со пониска температура (понор на топлина), бидејќи целата околина има иста температура. Постои можност по вештачки пат да се направи резервоар на топлина со пониска температура од околината, но за таа цел треба да се потроши механичка работа, која во идеален случај може да се покрие со топлината добиена од изворот на топлина (морето или воздухот), но не може да стане збор за некое искористување на топлината.

Од изложеното може да заклучиме дека е невозможно да се конструира топлотна машина која со користење на топлината од морето или воздухот би работела вечно.

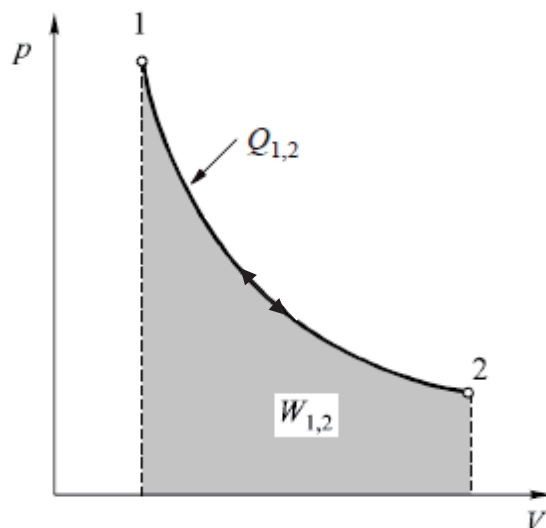
Таква машина со оглед на неисцрпната топлина на морето и воздухот би претставувала некој вид перпетуум - мобиле. За разлика на перпетуум - мобиле од механика, оваа машина би се нарекла **перпетуум - мобиле од втор ред**.

Од изложеното произлегува дека Вториот главен закон на термодинамиката може да се дефинира на следниве начини:

- ❖ Топлината сама од себе, без трошење на надворешна работа, не може да преминува од поладно на потопло тело.
- ❖ Не е можно со каков и да било кружен процес да се зема топлина само од еден топлотен резервоар и да се претвора во механичка работа, без да се одземе нејзин дел и да се предава во друг резервоар на топлина со пониска температура (перпетуум - мобиле од втор ред е невозможен).

3.10 ПОВРАТНИ И НЕПОВРАТНИ ПРОЦЕСИ

Да разгледаме некоја општа промена на состојбата (сл.3.9) на определена количина гас од точката 1 до точката 2. За време на експанзијата 1-2 на гасот му се доведува од изворот на топлина количина топлина $Q_{1,2}$, а е извршена работа W . Доколку сакаме процесот да се одвива во обратна насока 2-1 (компресија), треба на гасот да му доведуваме работа W , а од процесот да одведуваме во изворот на топлина количина топлина $Q_{2,1}$. Доколку $Q_{1,2} = Q_{2,1}$, односно одведената топлина при компресијата е еднаква на доведената топлина при експанзијата, гасот и изворот на топлина ќе се вратат повторно во првобитната состојба, односно ќе се постигне состојбата во точ.1 со првобитните големини на состојбата. Ваквите процеси се нарекуваат **повратни процеси**. Тие можат да се остварат под услов ако за време на промената на состојбата се занемарат триењето, придушувањето и разликата во температурите меѓу телото што врши промена и околната средина.



Слика 3.9 Општя промена на состојба

Всушност, повратни процеси не постојат. Секогаш и секаде ќе се појавува макар и најмало триење, а при секоја размена на топлина потребни се и најмали разлики на температурите. Повратните процеси ги сметаме за многу корисни гранични случаи, на кои можеме да им се приближиме под услов ако процесите ги водиме со доволно внимание, побавно и со што помало триење.

Сите процеси во природата можат да се поделат во две категории: **повратни и неповратни процеси.**

Повратни процеси се оние кај кои сите елементи (учесници) во процесот можат да се вратат на почетната состојба, а при тоа никаде во природата да не настане некоја трајна и забележлива промена.

Неповратни процеси се оние кај кои сите елементи во процесот можат да се вратат во почетната состојба, но при тоа некаде во природата ќе настане некоја трајна и забележлива промена. На пример: при размена на топлина меѓу две тела со поголема разлика во нивната температура, преминот на топлината ќе тече во насока од потоплото кон поладното тело, а според Вториот главен закон таа топлина да се врати назад на потоплото тело е невозможно без некои други промени (треба да се доведе работата од друг извор).

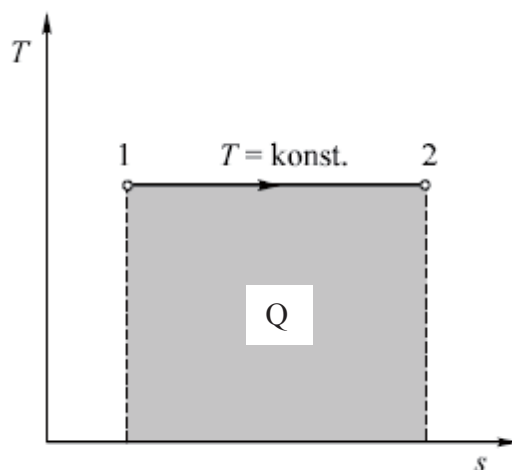
Посебно треба да се потенцира дека повратливоста не треба да се поистоветува со кружните процеси, бидејќи постојат повратни и неповратни кружни процеси. Исто така постојат повратни и неповратни процеси кои не се кружни процеси.

3.11 ПРОМЕНИ НА СОСТОЈБАТА ВО T-s ДИЈАГРАМ

Основните промени на состојбата веќе еднаш ги проучивме во p-V дијаграмот, но за понатамошно совладување на градивото од термодинамиката тие треба да се проучат и во топлотниот T-s дијаграм.

3.11.1 ИЗОТЕРМА

Промената на состојбата при T = const е дадена на сл.3.10. Бидејќи T = const изотермата во T-s дијаграмот е претставена со права линија паралелна на апсцисата.



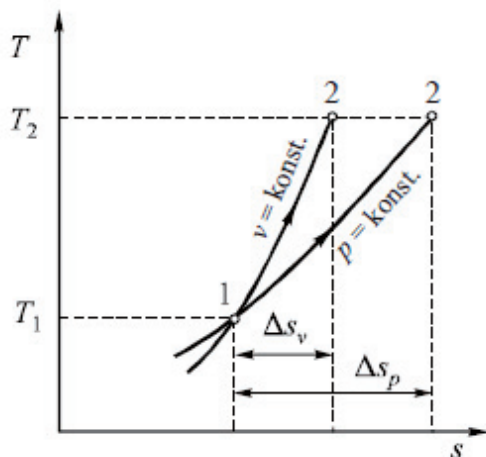
Слика 3.10 Изотерма во T-s дијаграм

Во случај на експанзија процесот се одвива во насоката 1-2, а во случај на компресија - обратно, во насоката 2-1. Доведената, односно одведената топлина која се претвора во механичка работа, еднаква е на површината под линијата на промената, и таа изнесува:

$$Q = (S_2 - S_1) T = W.$$

3.11.2 ИЗОБАРА И ИЗОХОРА

Промените на состојбата при $p = \text{const}$ и $v = \text{const}$ се дадени на сл.3.11. Текот на промените се добива од равенките разгледувани во лекција 3.7 во кои се заменува за $p = \text{const}$, односно $v = \text{const}$:



Слика 3.11 Изобара и изохора во T-s дијаграм

за $p = \text{const}$:

$$s = c_p \cdot 2,303 \cdot \lg \frac{T_2}{T_1} + \text{const}$$

за $V = \text{const}$:

$$s = c_v \cdot 2,303 \cdot \lg \frac{T_2}{T_1} + \text{const}$$

И двете равенки во T-s дијаграмот се логаритамски криви линии.

Од сликата се гледа дека и двете промени почнуваат од иста почетна состојба, а завршуваат при иста температура T_2 во различни крајни состојби. Доведените топлини Q_v и Q_p се различни, и топлината при $p = \text{const}$, $Q_p > Q_v$ при $V = \text{const}$. Тоа доаѓа оттаму што $c_p > c_v$. Бидејќи $Q_p > Q_v$, тогаш и промената на ентропијата при $p = \text{const}$ е поголема од онаа при $V = \text{const}$, односно:

$$\Delta S_p > \Delta S_v$$

3.11.3 АДИЈАБАТА

Знаеме дека адијабатската промена се врши без размена на топлина ($\Delta Q = 0$):

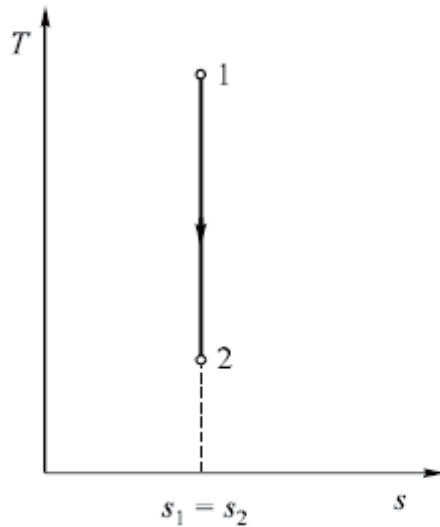
$$\Delta Q = T \cdot \Delta s$$

$$0 = T \cdot \Delta s$$

бидејќи:

$$T \neq 0, \text{ следува } \Delta s = 0.$$

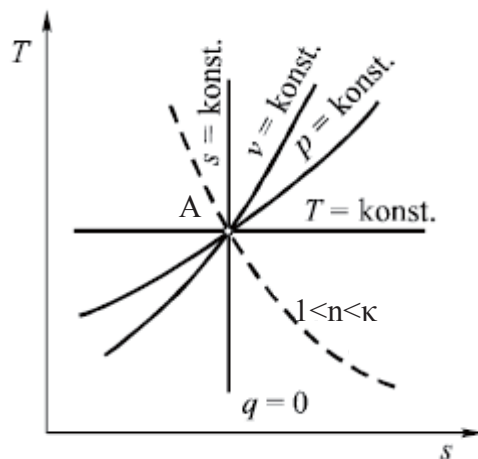
Оваа промена во T-s дијаграмот (сл.3.12) претставува права линија паралелна на ординатата. Од сликата исто така се гледа дека површината е нула ($\Delta Q = 0$).



Слика 3.12 Адијабата во T - s дијаграм

3.11.4 ПОЛИТРОПА

Политропа како општа промена на состојбата може да биде која и да било линија прикажана во T - s дијаграм, почнувајќи од состојбата во точката А (сл.3.13), и при тоа е важно дали се врши компресија или експанзија, и дали за време на промената се доведува или одведува топлината во процесот и во колкава количина. На слика 3.13 се дадени основните промени на состојбата, кои претставуваат посебни случаи на политропска промена.



Слика 3.13 Приказ на некојќи промена во T - s дијаграм

Вистинските процеси најчесто се одвиваат меѓу адијабатата и изотермата околу испрекинатата линија на сликата. Во случајов степенот на политропата $\kappa > n > 1$.

Бидејќи изохората претставува граничен случај на политропата во однос на компресијата и експанзијата, заклучуваме дека процесите десно од линијата $V = \text{const}$ (во T - s и p - V дијаграмот) се експанзии, а лево компресии.

3.12 ПРИМЕНА НА ПРВИОТ И ВТОРИОТ ЗАКОН НА ТЕРМОДИНАМИКАТА ВО МЕТАЛУРГИЈАТА

За добивање на механичка работа потребни се два топлински резервоара. Наспроти тоа механичката енергија може, на пр. со триење, да се претвори во топлина и да се доведе во некој топлински резервоар па тогаш е доволен само еден топлински резервоар. Тоа е основната разлика помеѓу претворањето на топлинската во механичка енергија и претворањето на механичката во топлинска енергија.

Кога би било можно топлинската енергија да се претвори во механичка само со помош на еден топлински резервоар, би можеле, на пример бродовите својата движечка сила да ја црпат од готово неизмерното складиште на енергија во морската вода, па тогаш погонското гориво би било непотрбно. Тоа не би било во спротивност со првиот закон бидејќи енергијата се црпи од ладната морска вода. Таква машина би била еден вид перпетуум мобиле (перпетуум мобиле од втор вид) бидејќи количината на енергијата собрана во морската вода (во околината) е неизмерно голема и бесплатна. Искористувањето на енергијата која се наоѓа во околината се противи на вториот закон на термодинамиката. Исто така невозможна е изградбата на перпетуум мобиле од втор вид како што е објаснето при изучувањето на вториот закон на термодинамиката во лекцијата 3.9.

И двете формулации на вториот главен закон имаат исто значење и е последица на едната од другата. Наспроти тоа, I-от и II-от главен закон меѓусебно се независни и не можат да се изведат еден од друг. И двата главни закона се природни закони и се базираат, како секој друг природен закон, на многу богатото животно и лабораториско искуство.

Првиот главен закон дава однос помеѓу доведената топлина и добиената работа, меѓутоа ништо не зборува за тоа каков треба да биде изворот на топлина и нејзиниот тек. По него би можело, без надворешна помош, мразот да се искористи за греење на вода при што од мразот би се одземала топлина на пониска температура и би се предавала на водата со повисока температура. Од искуство знаеме дека тоа не може да се изведе бидејќи спонтаниот тек на топлина насочен е од повисоката на пониската температура. Слична насоченост владее кај електрицитетот, водата, дифузијата, хемиските процеси и тн. Сите природни процеси спонтано течат во насока на воспоставување на рамнотежа. Првиот закон на термодинамика ништо не кажува за леснотијата и големината на претворањето на енергијата од еден облик во друг. Вториот наведува дека механичката енергија во топлинска енергија се претвора лесно и потполно. Топлотната енергија се претвора во механичка под строго одредени правила. Процесот помеѓу два топлински резервоари со различна температура, при што сета топлина не може да се претвори во механичка енергија туку само еден дел, одреден е со температурата помеѓу која процесот се врши. Како што претходно е речено, постои ограничување на претворањето на внатрешната енергија на системот во механичка енергија. Максималната механичка енергија се постигнува со адијабатска експанзија, но таа може да тече само до притисокот кој е еднаков на притисокот на околината. Според тоа, постои некоја горна граница за делот на внатрешна

енергија која може да се претвори во механичка енергија. За претворањето на механичката енергија во внатрешна енергија, како што знаеме, нема ограничување. Тоа е последица на секој неповратен процес за времето кога во системот се доведува енергија како работа на триењето која се претвора во внатрешна енергија.

Механичката енергија може да се претвори и во други енергетски облици. Со повратните процеси можно е во идеални услови потполно да се претвори во потенцијална или кинетичка енергија и обратно, потенцијалната и кинетичката енергија можат во потполност да се претворат во механичка енергија. Исто така електричната и механичката енергија можат да се претворат една во друга и тоа со помош на повративни генератори (механичката во електрична) и со повративни електрични мотори (електричната во механичка енергија). Повративни ги сметаме оние машини кои немаат триење и други губитоци.

Во овие примери може да се забележи дека постои изразена несиметричност во зависност од насоката на енергетското претворување. Од една страна механичката, електричната, потенцијалната и кинетичката енергија можат без ограничување да се претворат во топлина и внатрешна енергија, а од друга страна не е можно сета топлина и внатрешна енергија да се претвори во механичка енергија. Од тука произлегуваат и можностите за примената на двата закона во металургијата.

Ако ги разгледаме топлинските процеси кои се користат во металургијата, според вториот закон на термодинамиката, за тие континуирано да се одвиваат треба да се троши одреден енергенс (гориво). Па така за високите печки постојано треба да се донесува кокс кој ќе ја одржува работната температура. Доколку не се дотура тие ќе се изладат и процесот за топење на одреден метал ќе престане и сл. Што значи процесите не можат да се одвиваат сами од себе без да се троши одредена енергија.

Контролни прашања:

1. Како гласи законот за одржување на енергијата?
2. Што претставува внатрешната енергија?
3. Како гласи Првиот закон на термодинамиката?
4. Што претставува изотермата, а што изобарата?
5. Што претставува c_n ?
6. Кои процеси се нарекуваат кружни процеси?
7. Што е ентропија?
8. Како се бележи ентропијата?
9. Објасни го Карноовиот кружен процес.
10. Дефинирај го Вториот закон на термодинамиката.
11. Кои се повратни, а кои неповратни процеси?
12. Нацртај ги изобарната и изохорната промена на состојба во $T-s$ дијаграм.

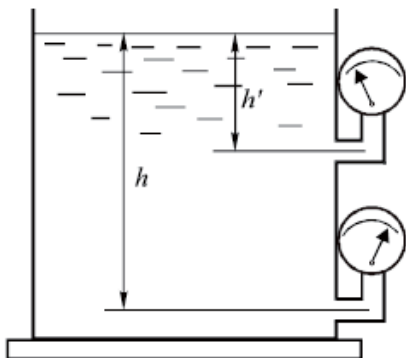
4. МЕРЕЊЕ И РЕГУЛАЦИЈА

4.1 ПРИТИСОК

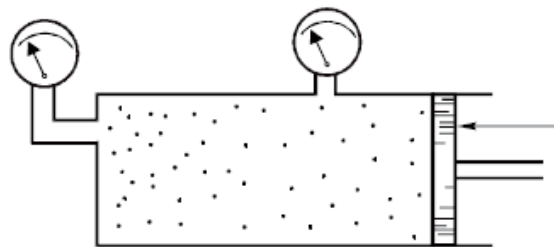
Притисокот (p) е сила (F) која дејствува нормално на единица површина (A).

$$p = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{m^2} \right].$$

Кај течнота и гасот притисокот дејствува на граничната површина и во внатрешноста на системот. Силата (F) може да биде предизвикана од сопствената тежина на медиумот или од надворешно оптоварување (слика 4.1 и слика 4.2).



Слика 4.1 Притисок поради сопствената тежина



Слика 4.2 Притисок поради надворешно оптоварување

Притисокот поради сопствената тежина зависен е, значи, од висината на течнота или гасот. Меѓутоа, често пати надворешното оптоварување е толку големо што притисокот предизвикан од сопствената тежина може да се занемари. Во тој случај притисокот измерен на кое било место во системот приближно е еднаков. Од тоа што го знаеме претходно во врска со топлината, промената на притисокот и висината кај гасовите може да се занемари и меродавно е надворешното оптоварување, но кај течностите треба да се води сметка и за висината на течнота.

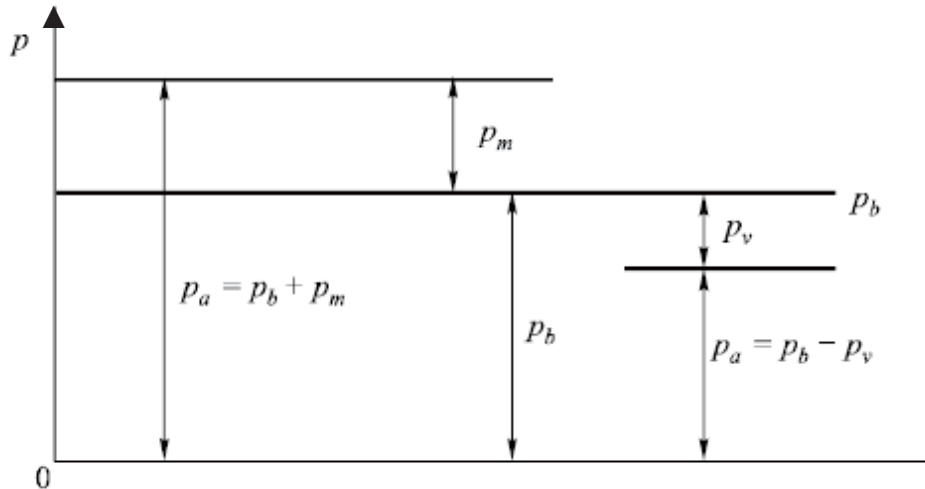
Разликуваме апсолутен притисок, натпритисок и подпритисок (вакуум). Натпритисокот и подпритисокот се однесуваат на атмосферскиот притисок, додека апсолутниот притисок е вкупниот притисок што дејствува на гасот или пареата. Апсолутниот притисок претставува збир од барометарскиот и манометарскиот (надпритисокот - P_m) притисок, т.е.

$$p_a = p_b + p_m$$

Ако притисокот во некој сад е помал од барометарскиот, тој подпритисок или вакуум се отчитува на вакуумметар. Во тој случај апсолутниот притисок е еднаков на разликата на барометарскиот притисок и вредноста која ја покажува вакуумметарот (подпритисокот - P_v), т.е.

$$p_a = p_b - P_v$$

Треба да се напомене дека апсолутниот притисок претставува големина на состојбата. На сликата 4.3 е даден приказ на притисокот во однос на притисокот на околината (барометарскиот притисок).



Слика 4.3 Приказ на притисокот во однос на притисокот на околината

Единица за притисок во SI системот е:

$$Pa = \frac{N}{m^2}.$$

Поголема единица е бар при што:

$$1 [bar] = 10^5 [Pa].$$

4.2 ПОСТАПКИ ЗА МЕРЕЊЕ НА ПРИТИСОК

Мерењето на притисокот на течностите и гасовите има големо значење како во индустриското производство така и при научните истражувања. При мерењето на притисокот може да се дојде до следниве сознанија:

- ❖ да се определи состојбата на материјата, посебно ако таа е во гасовита состојба;
- ❖ преку одредувањето на притисокот на гасовите се определува нивното количество ако се знае волуменот и температурата;
- ❖ со определување на притисокот и неговата регулација може да се влијае врз брзината на хемиските реакции;
- ❖ со определување на притисокот на заситните пари може да се определи нивната температура;

- ❖ големината на нивото исто така може да се определи преку определување на притисокот;
- ❖ определувањето на притисокот може да послужи за негово регулирање со цел да не ја надмине максимално дозволената вредност.

Најчесто користени чувствителни елементи за мерење на апсолутниот и диференцијалниот притисок (разликата на притисоците) се заснова на следниве постапки:

- ❖ потискување на манометарски течности;
- ❖ деформација на еластични елементи;
- ❖ пиезоелектричен ефект;
- ❖ магнетностриктивен ефект;
- ❖ промена на електричниот отпор;
- ❖ компресивен ефект;
- ❖ конвекционен ефект;
- ❖ гаснокинетички ефект;
- ❖ јонизационен ефект.

Класификација на мерните методи може да се изврши во три основни групи, и тоа:

- ❖ мерење на финиот и високиот вакуум;
- ❖ мерење на малите и нормалните притисоци;
- ❖ мерење на високите и највисоките притисоци.

Мерење на финиот и високиот вакуум. Под вакуум се подразбираат апсолутните притисоци на гасните медиуми, помали од 1 bar (100000 Pa). Теоретски овие притисоци се движат од 0 Pa (на што би одговарал апсолутниот вакуум) па се до атмосферскиот притисок од 1 bar, со кој се дефинира нормалниот атмосферски притисок.

Во зависност од редот на вакуумот, истиот се дели на:

- | | |
|----------------------|--|
| ❖ низок вакуум | 100000 - 100 [Pa] |
| ❖ фин вакуум | 100 - 10^{-1} [Pa] |
| ❖ висок вакуум | 10^{-1} - 10^{-4} (10^{-6}) [Pa] |
| ❖ ултра висок вакуум | 10^{-6} - 10^{-8} [Pa] |

Ултра високиот вакуум се користи во експерименталната физика, додека останатите вакууми сè повеќе ги користи современата техника.

Постојат поголем број на принципи кои се применуваат при мерење на вакуумот. Основни постапки се:

- ❖ **Компресиони вакуумметри** се служат со основните закони на кои се базираат перманентните гасови. Мек-Леодовиот вакуумметар е главен претставник на овие инструменти.
- ❖ **Конвекционите вакуумметри** се служат со термичка конвекција на молекулите при мерење на вакуумот. Типичен претставник на оваа група е Пираниевиот вакуумметар.
- ❖ **Јонизационите вакуумметри** ги мерат високите вакууми со помош на јонските струи кои проаѓаат низ разредените гасови. Најчесто се користат: Пенинговиот јонизационен вакуумметар, вакуумметрите со ладна катода и вакуумметрите со извор на алфа-зрачење.

Мерење на малите и нормалните притисоци. Малите и нормалните притисоци можат да се класифицираат како притисоци од 1 bar (100000 Pa) до 10 bar (1000000 Pa). Во овој опсег енергијата на сигналот која ја даваат чувствителните елементи е доволна, па не е потребно да се појачуваат и овие притисоци во некои случаи можат да ги придвижат не само индикаторите, туку и регистраторите, па и регулаторите на притисок или проток. Одредувањето на овие притисоци се врши на основа на следниве постапки:

- ❖ Одредување на нивото со манометарски течности:
 - непосредно;
 - преку прстенест манометар;
 - преку манометар со своно.
- ❖ Деформација на еластични елементи:
 - механичко регистрирање;
 - капацитативно регистрирање;
 - индуктивно регистрирање;
 - регистрирање преку промена на електричниот отпор.
- ❖ Пиезоелектричен ефект.



Слика 4.4 Манометар

Мерење на високите и највисоките притисоци. Мерењето на високите притисоци се врши со следниве постапки:

- ❖ преку промена на проводливоста на металот;
- ❖ со деформација на еластичните елементи;
- ❖ со пиезоелектричен ефект;
- ❖ со магнетностриктивен ефект;
- ❖ со електрични големини:
 - електричен капацитет;
 - промена на индуктивитетот;
 - со промена на електричниот отпор на мерната лента.

4.3 ПРОТОК НА ГАСОВИТЕ

Проток е количина на флуид која протекува низ набљудуваниот напречен пресек за единица време. Според тоа дали количината на флуидот се изразува преку волуменот или масата разликуваме:

❖ Волуменски проток:

$$Q_V = \frac{dV}{dt} \left[\frac{m^3}{s} \right],$$

каде што:

Q_V - волуменски проток,

V - волумен на протечениот флуид

$d()/dt$ - ја означува промената на волуменот на протечниот флуид во функцијата на времето.

❖ Масен проток:

$$Q_m = \frac{dm}{dt} \left[\frac{kg}{s} \right],$$

каде што:

Q_m - масен проток,

m - маса на протечениот флуид

$d()/dt$ - ја означува промената на масата на протечниот флуид во функцијата на времето.

Поприроден е масениот проток бидејќи ја опишува вистинската количина на материјата во движење. Волуменскиот проток зависи од густината, притисокот, температурата на материјата и од локалната гравитација.

Количината на флуидот кој протекува низ мерачот на протокот (протокомер) во временскиот интервал $[t_1, t_2]$, се добива со интеграција на изразите за волуменски односно масен проток.

Масениот и волуменскиот проток се поврзани со релацијата:

$$Q_m = \rho \cdot Q_V = \rho \cdot \frac{dV}{dt},$$

каде што ρ $[kg/m^3]$ претставува густината на флуидот.

Ова равенка е основна при волуменското мерење на протокот.

Односот на протокот и брзината произлегува од законот за одржување на масата, а е изразен со познатата равенка за континуитет:

$$Q_m = \rho \cdot v \cdot A$$

каде што v претставува средната брзина во набљудуваниот напречен пресек со површина A .

Ова равенка е основна при мерење на брзината на протокот.

4.4 МЕРЕЊЕ ПРОТОК

Мерењето на **протокот на гасови** зависи од нивната температура и притисок. Затоа протокот на гасови се изразува во однос на нормалната состојба на гасовите, кое е дефинирано со притисокот $p_n = 101325 [Pa]$ и температура $T_n = 293,15 [K]$ при релативна влажност $\varphi = 0\%$ така што:

$$Q_m = \rho \cdot Q_V = \rho_n \cdot \frac{p \cdot T_n}{p_n \cdot T \cdot k} \cdot Q_V,$$

каде што со коефициентот k се корегира неидеалноста на гасовите при големи притисоци, а T е температура на мерениот гас.

Мерењето на протокот има голема важност во постројките на процесната индустрија, бидејќи преку регулацијата на протокот се врши управување со материјалните биланси на постројката.

Чувствителните елементи за мерење на протокот се базираат на неколку основни постапки:

- ❖ мерење на потиснатиот волумен;
- ❖ конверзија на кинетичката енергија во енергија на притисок;
- ❖ мерење на количината на движење и моментот на количината на движење;
- ❖ мерење на средната брзина или интегралот на локалната брзина;
- ❖ користење на топлотен биланс;
- ❖ користење на материјален биланс;
- ❖ броење на парчиња.

Мерење со потиснат волумен на гасот. Кај уредите за мерење на проток од ова група протокот на гасот се мери на основа на пренесениот волумен на гасот низ ротациони, нутациони или осцилаторни системи. При тоа дел од енергијата на притисокот на флуидот се користи за придвижување на мерачот. Излезниот сигнал кој е пропорционален на протокот претставува број на вртежи или одови на придвижени елементи на мерниот инструмент во единица време, односно, се добива во облик на фреквенција. Опсегот на мерење е ограничен за одредени големини на инструментот. Овие мерачи не се погодни за мерење на мали и големи протоци. При мали протоци губитоците на флуидите низ процепите на погонскиот систем предизвикуваат големи грешки, додека при големи протоци доаѓа до преголем број на вртежи на погонскиот систем во единица време. Грешките при мерење зависат од вредноста на протокот, вискозноста на флуидот, начинот на заптивање на погонскиот систем и прецизноста на изработката на инструментите.

Најчести користени типови на инструменти за мерење на проток на основа на потиснат волумен се следните:

- ❖ Ротациони мерачи на проток:
 - гасни саати (за мерење на гасови);
 - мерачи со ротационен елиптичен запчаник (за мерење на проток на течности);
 - мерачи со ротациони осмици (за мерење на гасови) и
 - мерачи со ротационен триаголен клип (за мерење на гасови);

- мерачи со лизгачки крилца (за мерење на проток на вискозни течности).
- ❖ Нутациони мерачи на проток (се користат за мерење на чисти течности со средна вискозност);
- ❖ Осцилаторни мерачи:
 - мерачи со осцилаторен цилиндричен клип (за мерење на мали протоци);
 - мерачи со осцилаторна мембрана или мев (за мерење на гасови).

Мерачи на проток кои работат на принцип на пренос на кинетичката енергија на флуидот (турбински мерачи) (види слика 4.5). Кај турбинските мерачи мерењето на волуменскиот проток на флуидот се базира на преносот на количината на движење на флуидот на лопатките на турбинскиот мерач. Се користат два основни типа од овие уреди:

- ❖ тангенцијални млазни мерачи на проток;
- ❖ аксијални пропелерски мерачи на проток.



Слика 4.5 Турбински дигитални мерачи

Мерачи на проток кој се базира на мерење на падот на притисокот (пригушници). Еден од најчесто користените принципи за мерење на проток во индустријата се базира на користењето на пригушници. Тоа се мерачи на проток кај кои поради стеснување во цевководот кинетичката енергија на флуидот делумно се претвора во енергија на притисок. Променливата разлика на притисокот пред и по стеснувањето претставува нелинеарна функција на средната брзина, односно волуменски проток на флуидот. Пригушните елементи се користат за мерење на проток на еднофазни течности, гасови и пареи при турбулентен режим на струење и во широки граници на температура и притисок. Постојат три основни типа на пригушници:

- ❖ пригушна плоча (бленда);
- ❖ млазница и
- ❖ вентурина цевка.

Мерачи на проток кој се базира на мерење на силата на отпорот (ануларни мерила). Принципот на работа на ануларните мерила се базира на мерење на силата која дејствува на телото кое се наоѓа во центарот на цевководот, настаната со отпорот на движењето на флуидот. Постојат две основни варијанти на ануларни мерила, и тоа: мерила со константна сила и

променлив напречен пресек на цевководот - **ротометри** (слика 4.6), и мерила со променлива сила и константен пресек на цевководот - мерила со **мета**.



Слика 4.6 Ротометри

4.5 МЕРЕЊЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА СО ТЕРМОМЕТРИ, ТЕРМОЕЛЕМЕНТИ И ОПТИЧКИ ПИРОМЕТРИ

Температурата се мери со инструменти наречени термометри. Тие можат да бидат: со течност, биметални, електроотпорни, термоелементи, пирометри и сл.



Слика 4.7 Стаклени термометри



Слика 4.8 Биметални термометри

Термометрите со течност можат да бидат стаклени или пружински. Како течност може да се користи жива, алкохол, пентанон и др. Кај овие термометри се користи особината промена на волуменот на течноста со промена на температурата. Стаклени термометри (слика 4.7) се состојат од стаклен резервоар поврзан со тенка стаклена цевка. Во резервоарот се

става течност која со покачувањето на температурата се шири и од резервоарот се издига во тенката цевка. Големинта на температурата се чита на температурната скала која се наоѓа покрај тенката цевка.

Биметалните термометри (слика 4.8) работат на принцип на ширење на цврстите тела при нивно загревање. Составени се од две со валање споени метални ленти (елементи) со различен коефициент на топлотна дилатација. Биметалните ленти (најчесто никел-железо) се изведуваат во спирална форма (рамнинска или просторна во вид на цилиндрична торзиона пружина), чиј еден крај е поврзан за куќиштето, а другиот за стрелката на термометарот. Со промена на температурата, поради различното истегнување на елементите на лентата, таа се свиткува и ја поместува стрелката пропорционално на температурата.

Електроотпорните термометри се базираат на особината на материите со промената на температурата да си го менуваат електричниот отпор. Значи, температурата се мери со мерење на електричниот отпор, или друга електрична големина.

Мерењето на температурата со термоелементи се применува во индустријата и во лабораториите за испитување затоа што е едноставно, прецизно и евтино. Ако разгледаме едноставен термоелектричен круг, составен од два проводници од различен метал, споени во две точки 1 и 2.

Сибек во 1821 година го откри феноменот дека во такво коло се создава електрична струја, ако споевите во двете точки се загреани на различна температура. Во термоелектриката важат следниве закони:

- ❖ Закон за хомогено коло - во коло од еден ист хомоген метал не може да се створи електрична струја, независно од промената на пресекот и температурата долж проводникот.
- ❖ Закон за различни метали во проводникот - алгебарскиот збир на електромоторните сили (ЕМС) во едно коло независно од бројот на различните метали е нула, ако колото е загреано на иста температура.
- ❖ Алгебарската сума на ЕМС створена во некое коло составено од различни хомогени метали, единствено зависи од термоелектричните особини на тие метали и од температурата на споевите. Вистинската електромоторна сила се зголемува со зголемување на температурата меѓу споевите.
- ❖ Ако во некое коло со различни проводници температурата t_2 е еднаква од некоја точка P долж проводникот до точката Q тогаш алгебарската сума на ЕМС во колото не зависи од материјалот помеѓу точките P и Q. Поради тоа колото нема да се промени ако проводникот во точка P се спои со проводникот во точката Q. Од тоа следува дека сите споеви како прекинувачи, покажувачки кои се вклучени во колото на термоелементот не влијаат на големината на ЕМС.

Термоелементите се применуваат за мерење на температура до 1600°C . За различни температурни области постојат различни термопарови. За мерење на температура до 2600°C се применува термопар од молибден - волфрам.



Слика.4.9 Термометарски пиштол

Термометарски пиштоли (слика 4.9). Тоа се рачни преносни инструменти за мерење на површинската температура на предметот во движење или статички, без контакт може да се употребат за:

- ❖ скенирање на површината за „грејна точка“;
- ❖ контрола на високи печки и котли, како и температура во цевки;
- ❖ контрола на електрични инсталации, мотори, трансформатори;
- ❖ одржување на температура на грејни елементи и сл.



Слика.4.10 Оптички пирометар

Оптички пирометри (слика 4.10). Искористен е феноменот невидливата радијација над 50°C да се претвори во видливи зачестувања. Контролираното загревање на влакната односно на бојата на влакната се споредува со бојата на загреаното тело или гасот на којшто сакаме да се измери температурата и врз основа на истите бои се отчитува температурата на инструментот. Функцијата на оптичките пирометри се базира на тоа дека секое тело на температура над апсолутната нула зрачи енергија која е сразмерна на вкупната температура на тоа тело и која може

со избор на соодветен детектор прецизно да се измери и да се претвори во информација на температура.

Оптичкиот пирометар се употребува во случаи каде што е невозможно да се обезбеди директен контакт со објектот чија температура се мери. Било поради тоа што тој се движи (флуид во цевка) или е под висок напон или е од други причини непристапен, тие се идеални, а често и единствено решение.

4.6 РЕГУЛАЦИЈА НА ТЕМПЕРАТУРАТА ВО МЕТАЛУРШКИТЕ АГРЕГАТИ

Кога се врши анализа на состојбата на еден технички систем, при што се согледуваат сите влијанија на тој систем, се тргнува најпрво од причината за настанување на топлотната енергија.

Топлотната енергија може да се создаде поради природата на самиот металуршки процес или од самиот технички систем (на пр. појава на триење).

Со регулацијата на термичката состојба на еден технички систем може да се заклучи за нивото на размена на топлина како и евентуалното отстапување од големините кои однапред се познати (дефинирани со правилата и упатствата за ракување и одржување).

Присуството или отсуството на температура, која е надвор од номиналната вредност на техничкиот систем (нејзината висина, распределба или отстапување од нормалната вредност), даваат доста прецизна (релативна) проценка на состојбата на техничкиот систем.

Во индустријата а пред сè во металургијата температурата е еден од првите забележителни параметри кои ќе укажат на состојбата на оперативните процеси и опремата, топлотната енергија, односно таа е нуспроизвод на работата на електричните, механичките или хемиските процеси.

Со регулацијата на температурата овозможено е:

- ❖ рачно да се контролира температурата или да се врши надгледување над правилното контролирање на температурата;
- ❖ да се открие промена на температура поради неисправна работа на дел од системот;
- ❖ да се открие промена во спроведувањето на топлина низ или надвор од системот, предизвикана со неисправна работа на системот или со создавање на талози во спроводните делови.

Резултатот на однесувањето и состојбата на техничкиот систем при емитување на топлина (електрична, механичка и друга процесна опрема), може да биде силна трага за дијагностицирање на проблем, со голема веродостојност на предвидувањето.

Со следење и регулација на температурата на еден металуршки систем се овозможува:

- ❖ добивање на термичка состојба на техничкиот систем;

- ❖ благовремено пронаоѓање на неисправните делови во техничкиот систем;
- ❖ спречување на потешки хаварии во техничкиот систем;
- ❖ добивање на низа важни податоци за статичка анализа, анализа на квалитет, трајност на системот, периодичност на активности за одржување на еден технички систем.

За следење и регулација на термичката состојба можат да се применат следниве методи:

- ❖ контактни (термоелементи, термисторски термометри, електрични отпорни термометри и мерни елементи на принцип на термичка експанзија);
- ❖ бесконтактни (оптички пирометар, пирометар за зрачење и термовизиска камера);
- ❖ индикаторски (осетливост на поедини бои, креда, хартија и куглица на промена на температура).

Кај контактните методи мерниот елемент е во непосреден контакт со средината чија температура се мери.

Со нив се следи термичката состојба на цврстите системи на основа на кои се донесува оценка за термонапонската состојба на системот, а со мерење на температурата на флуидите, покрај оценката за состојбата на процесот, може индиректно да се согледа температурната состојба на системот.

Бесконтактната метода се базира на принцип на мерење на електромагнетната енергија на зрачење.

Оваа метода овозможува брзо утврдување на работните способности, односно термичката состојба на целиот систем при периодични контроли. Особено се погодни за термовизиски камери кои даваат слика на температурното поле на системот.

Индикаторската метода се базира на осетливоста на поедини материјали на промена, односно пораст на температурата.

Следењето на термичката состојба може да се организира како:

- ❖ континуирано следење на техничката состојба;
 - ❖ периодично следење на техничката состојба.
- Термичката состојба на еден технички систем се манифестира како:
- ❖ термичко напрегање;
 - ❖ термичка деформација;
 - ❖ термичка дилатација.

При промена на режимите на работа, односно промената на следењето на техничкиот систем доаѓа до значителни термички напрегања со промена на интензитетот и правецот на топлотниот флукс, кои со работниот медиум преоѓат на цврстите делови на системот - промените се интензивни во масивните делови (ротори и куќишта, и тн.).

Критериуми кои ја дефинираат дозволената термичка состојба:

- ❖ погонски прописи за ракување со системот;
- ❖ следење на состојбата на критичните делови;
- ❖ поставување на сигурносни уреди.

Во еден систем извор на топлотна енергија може да биде од процесот (согорување на горивото во котелот, пареата во турбините и тн.) или од самиот систем (триење во лежиштата и тн.).

За утврдување на на термичката состојба на еден технички систем, потребно е да се познаваат механичките карактеристики на материјалот на деловите на системот, кои се дефинираат според:

- ❖ границата на развлекување на материјалот;
- ❖ трајност на цврстината на материјалот;
- ❖ отпорност на заморување при мал број на циклуси.

Од сето тоа може да се заклучи дека следењето и регулацијата на температурата игра многу важна улога во функционирањето на металуршките агрегати.

Контролни прашања:

1. Што е притисок?
2. Од кои притисоци е составен атмосферниот притисок?
3. Која е класификација на мерните методи за мерење на притисокот?
4. Каде се користат ултра високиот вакуум?
5. Што претставува притокоот?
6. Кои се основни типови на пригушници?
7. Од што се состојат стаклените термометри?
8. Како функционираат оптичките термометри?

5. ГОРИВА И СОГОРУВАЊЕ

5.1 КЛАСИФИКАЦИЈА И СОСТАВ НА ГОРИВАТА

Гориво се нарекува секоја материја која кога ќе се запали согорува бргу и развива топлина, значи секоја онаа материја која во себе ги има елементите со кои кислородот од воздухот ќе стапи во хемиска реакција и ќе образува хемиско соединение по пат на брза оксидација која е проследена со создавање на топлина.

Горивата ги делиме според агрегатната состојба на цврсти, течни и гасни. Според начинот на нивното настанување и добивање ги делиме на природни и вештачки. Индустриските горива во природата се наоѓаат во сите три агрегатни состојби: цврсти, течни и гасни.

Природни горива

Горивата од растително и животинско потекло, создадени со природни процеси, кои се наоѓаат непосредно во природата, се нарекуваат природни.

Вештачки горива

Овие горива се добиваат од природните горива со помош на механички и хемиски процеси, односно се добиваат од природни горива кога од нив се одвојуваат најкорисните потребни состојки. Оспособувањето на природните горива, прв пат во поголема мерка е применето за добивање на кокс за металуршки потреби.

Процесите за вештачко добивање на горива се: облагородување, сува дестилација, гасификација, дестилација и специјални потреби.

Облагородувањето на горива, всушност, претставува вештачко подготвување на горивата добиени од лоши, понекогаш неупотребливи, природни горива. На пример, добивање на брикети од јагленовата прашина од ситниот неупотреблив јаглен. Притоа целокупниот процес е опфатен со сушење, чистење, дробење, пресување и формирање на одреден облик на горивото, со тоа што не се менува хемискиот состав на горивото во процесот на облагородување.

Сувата дестилација е процес на добивање на вештачки облик на горивото, при кој се прави детално разложување на правобитната материја додека како резултат на крајот не се добие, од една страна, гориво кое содржи скоро чист јаглен (кокс и др.), а од друга страна, гасни потполни и непотполни производи на согорување (катран и др.).

Гасификацијата е процес при кој цврстото гориво потполно се претвора во гасно (генераторски гас).

Дестилацијата е начин за добивање различни видови на вештачки горива од течните горива (производи на фракционата дестилација на нафтата).

Специјални процеси ги опфаќаат методите за добивање на течни горива од цврстите во специјални сложени постројки (бензин од кафеав јаглен и друго).

Цврсти горива

Природните цврсти горива се делат претежно на примарни и секундарни природни цврсти горива.

Примарните природни цврсти горива се производи од растително потекло и при нивно согорување се произведува топлина која може да се искористи. Овде спаѓаат сите дрвенести растенија (листопадни, зимзелени и сл.), влакнести растенија (слама, сено и сл.). Овој вид на гориво постојано се обновува и со тоа претставува неисцрпен вид на гориво.

Секундарни природни цврсти горива се настанати од примарните природни цврсти горива со процесот јагленисување, кој трае долг период дури и векови, но кој и денес трае. Во овој вид на горива главно спаѓаат тресет, лигнит, кафеав јаглен, камен јаглен и антрацит. Овие горива се вадат од земјата и затоа уште се нарекуваат “фосилни минерални горива”. Овој вид на горива претставува огромна, но исцрплива резерва на горива.

Вештачките цврсти горива се добиваат од полошите природни и понекогаш неупотребливи горива со процесите на облагодарување и сува дестилација. Во оваа група спаѓаат: кокс, брикетиран јаглен, сепариран и сушен јаглен, дрвени отпадоци и разни индустриски растенија.

Табела 5.1 Опишана поделба на горивата

Вид на горива	Природни горива	Вештачки горива
Цврсти горива	Примарни: дрвенести и влакнести растенија	кокс, брикетиран јаглен, сепариран и сушен јаглен, дрвени отпадоци и разни индустриски растенија
	Секундарни: тресет, лигнит, кафеав јаглен, камен јаглен, антрацит	
Течни горива	сурова нафта	деривати на суровата нафта и мазут
Гасни горива	земјен гас и гас од нафтените полиња	коксен гас, гас од високите печки, разни отпадни гасови во индустриските процеси

Течни горива

Во **природните течни горива** спаѓа суровата нафта.

Вештачките течни горива се производ на дестилација на суровата нафта и во кои спаѓаат дериватите на суровата нафта и мазутот (остаток при дестилација на суровата нафта).

Гасни горива

Во природните гасни горива спаѓа земјениот гас и гасот од нафтените полиња, а во вештачките гасни горива спаѓаат коксен гас, гас од високите печки, разни отпадни гасови во индустриските процеси.

Главни состојки на горивото се: јаглерод (C), водород (H), кислород (O), сулфур (S), азот (N), влага (W) и пепел (A)(минерални примеси: глина, разни минерали), значи:

$$1 \text{ [kg] гориво} = C\% + H\% + O\% + S\% + N\% + W\% + A\%.$$

Атомската тежина на споменатите елементи е: јаглерод 12, водород 1, кислород 16, сулфур 32, азот 14.

Сите овие состојки се делат во две групи, на согорувачки и несогорувачки.

Согороувачки состојки се јаглеродот, водородот, сулфурот (делумно). Меѓутоа, на нив се приклучуваат и кислородот и азотот, кои се јавуваат со претходно наведените хемиски комбинации, иако ниеден од нив не е согорувачки, при што кислородот овозможува согорување додека пак азотот е неутрален при согорувањето. Овие пет состојки се нарекуваат основни согорувачки супстанции (C, H, S, O, N). Кај јаглените оваа супстанција се нарекува чист јаглен. Квалитетот на горивото се смета во толку подолбо доколку количината на согорливата супстанција е поголема. Ова супстанција во себе ги има сите карактеристики на гориво и е дадена со изразот:

$$\text{согорувачка супстанца} = 1 - (W + A)\%.$$

Несогорувачки состојки се: влага (W) и пепел (A). Според тоа, 1 килограм на гориво содржи:

$$1 \text{ [kg] гориво} = \text{согорувачка супстанца (C, H, S, O, N)} + \text{влага (W)} + \text{пепел (A)}.$$

За време на загревањето на горивото без присуство на воздух тоа се распаѓа на два дела: на испарувачки (гасен) и на неиспарувачки (цврст остаток).

Испарувачки делови на горивото се влагата (груба и хидро), водородот, кислородот, азотот и дел од јаглеродот.

Доколку јагленот содржи поголем процент на испарувачки делови, дотолку полесно се пали, побргу согорува и поголема му е должината на пламенот.

Неиспарувачки делови на горивото се преостанатиот јаглерод, хемиски врзаниот и неврзаниот сулфур и пепелот.

Чисто гориво се нарекува онаа гориво кое во себе не содржи ни вода ни пепел, тоа всушност е основна согорувачка супстанца.

Табела 5.2 го дава просечниот процентуален состав на еден килограм чисто гориво.

Табела 5.2 Просечен процентуален состав на 1 [kg] чисто гориво

Вид на гориво	C%	H%	O%
дрво	50	6	44
тресет	60	6	34
кафеав јаглен	65	6	29
камен јаглен	85	5	10
антрацит	95	2	3

Од табелата се гледа дека доколку видот на јагленот се доближува до антрацитот дотолку е поголем процентот на јаглерод, а се помал е процентот на водород и кислород.

5.2 КАЛОРИЧНА ВРЕДНОСТ (ТОПЛОТНА МОЌ) НА ГОРИВАТА

Топлотната моќ на горивата ја изразуваме во џули [J] или килоџули [kJ].

Кај цврстите и течните горива ја изразуваме топлотната моќ по единица тежина изразена во килограми, или по единица волумен на гасното гориво. За единица волумен кај гасните горива се зема кубен метар (m^3) или нормален кубен метар (m_n^3).

Според тоа, топлотната моќ на горивата се изразува во килоџули по килограм цврсто (течно) гориво [kJ/kg] или по метар кубен на гасното гориво [kJ/ m^3]. Додека претворањето на килоџули во kWh е дадено со следнава релација:

$$1[kJ] = \frac{1}{3600} [kWh]$$

Топлотната моќ на горивото е она количина на топлина која се ослободува при потполно согорување на единица тежина [kg] за цврсти и течни горива, или единица волумен [m^3], за гасни горива, при што настанатите продукти на согорување мораат да се изладат на почетната температура при согорувањето. Постојат два поима на топлотна моќ: горна и долна топлотна моќ. Кога горивото кое содржи во себе одреден процент на влага (W) и одреден процент на водород (H), при согорување во продуктите на согорување образуваат вода (H_2O). Не е сеедно дали целата ова вода во продуктите на согорување се наоѓа во парна или течна состојба. Што значи, 1 [kg] водена пареа на $100^\circ C$ има поголема количина на топлина за околу 2500 [kJ] отколку 1 [kg] вода на $20^\circ C$. За загревање на 1 [kg] вода од 20° до $100^\circ C$ потребно е 335 [kJ]. За промена на агрегатната состојба во парна, т.е. за претворање на водата $100^\circ C$ во пареа со иста температура потребно е да се потрошат уште 2255 [kJ] за секој килограм вода. Значи вкупната потрошена количина на топлина во [kJ] за испарување на 1 [kg] на вода изнесува:

$$335 [kJ] + 2255 [kJ] = 2590 [kJ].$$

Горната топлотна моќ на горивата (H_g) е онаа количина на топлина изразена во [kJ/kg] која се ослободува при потполно согорување на единица тежина [kg] или изразена во [kJ/ m^3] која се ослободува при потполно согорување на единица волумен [m^3] на некое гориво, но со тоа водата во продуктите на согорување треба да се наоѓа во течна состојба.

Долна топлотна моќ (H_d) е онаа количина на топлина изразена во [kJ/kg] која се ослободува при потполно согорување на единица тежина [kg] или изразена во [kJ/ m^3] која се ослободува при потполно согорување на

единица волумен [m^3] на некое гориво, но со тоа водата во продуктите на согорување треба да се наоѓа во парна состојба.

Според тоа, горната топлотна моќ на некое гориво секогаш е поголема од долната. Вистинската разлика помеѓу горната и долната топлотна моќ изразена со големината на скриената (латентна) топлина на водата во парна состојба. Оваа разлика се јавува само кога содржи влага и водород, т.е. долната топлотна моќ се разликува од горната топлотна моќ на горивото за количината на топлина која е потребна за потполно испарување на водата која ја содржи горивото како негов составен дел, или пак водата добиена при негово согорување.

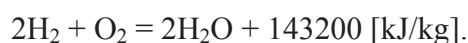
За нас веродостојна е долната топлотна моќ на горивото, бидејќи при вистинското согорување на горивото во ложиштата на парните котли производите на согорување (чадните гасови) одат во оцакот со температура нешто поголема од $100^{\circ}C$, така што водата се наоѓа во производите на согорување во парна состојба, одејќи со чадните гасови низ оцакот.

Табелата 5.3 ги прикажува просечните вредности на долната топлотна моќ на горивата.

Табела 5.3 Просечни вредности на долната топлотна моќ на горивата

Вид на гориво	Просечна долна топлотна моќ на горивото [kJ/kg]
дрво (сушено на воздух)	12000-17000
тресет (сушен на воздух)	6000-9000
лигнит	7000-12000
кафеав јаглен	13000-24000
камен јаглен	25000-33500
антрацит	33500-35500
дрвен јаглен	31500-33500
полукокс на кафеавиот јаглен	24500-25000
кокс на кафеавиот јаглен	24500-29000
полукокс на камениот јаглен	27500-28000
кокс на камениот јаглен	29500-30000
брикет од кафеав јаглен	22000-23000
брикет од камен јаглен	30500-31500
берцит	21000-26000
карбурит	27500-32000
нафта	40000-46000
петролеум	околу 46000
моторно (гасно) масло	околу 42000
мазут	до 40000
бензин	до 45500
вештачко течено гориво од кафеав јаглен	39500-41000
вештачко течено гориво од камен јаглен	38000-40500
етил-алкохол	околу 29000
природен земен гас	31000-42000

Согорувањето на водородот (H) во водата (H_2O) може да се прикаже соследната хемиска равенка:



Од овој израз гледаме дека 4 масени делови на водородот се врзуваат со 32 масени дела на кислородот (молекулската маса на водородот приближно е $H_2 = 2$, а на кислородот $O_2 = 32$). Така се прават 36 масени делови на водата (молекуларна маса на водата е $H_2O = 18$). Ако за масена единица усвоиме 1 [kg], тогаш 1 [kg] на водород при своето согорување ќе врзува 8 [kg] на кислород образувајќи 9 [kg] на вода, со истовремено ослободување на 143200 [kJ/kg] (во случај водата во прдуктите на согорување да се наоѓа во течна состојба), што претставува горна вредност на топлотната моќ на 1 [kg] водород. Сега е лесно да се најде долната топлотна моќ на водородот, притоа земајќи ја во обзир потребната количина на топлина за претворање на 1 [kg] вода од 0°C во водена пареа од 100°C , а која, како што е познато, изнесува

$$100 + 2255 = 2355 \approx 2500 \text{ [kJ/kg]}.$$

Според тоа:

$$143200 - 9 \times 2500 = 143200 - 22600 = 120600 \text{ [kJ/kg]}.$$

Од претходнонаведеното се гледа дека горната топлотна моќ H_g на водородот е поголема од долната H_d за:

$$H_g - H_d = 143200 - 120600 = 22600 \text{ [kJ/kg]}.$$

Водородот кој се наоѓа во горивото и кој не е врзан со кислородот во водата се вика слободен или активен водород. Неговата процентуална содржина во горивото е прикажана со изразот $H - \frac{0}{8}$.

Од хемиските равенки за согорување на водородот во водата гледаме дека четири масени делови на водородот се врзува на 32 масени делови на кислородот за да образуваат 36 масени делови на водата. Според тоа, еден масен дел на водородот се врзува со осум масени делови на кислородот. Значи, ако целокупната количина на кислород која се наоѓа во горивото ја поделиме со 8 ќе ја добиеме количината на водород која е врзана со кислородот.

5.3 ОДРЕДУВАЊЕ НА КАЛОРИЧНАТА ВРЕДНОСТ (ТОПЛОТНАТА МОЌ) НА ГОРИВАТА

Самото одредување на топлотната моќ на горивата може да се изврши на два начина, и тоа: од податоците на хемиските анализи на горивата или по калориметарски (експериментален) пат. Вториот начин е многу поточен од првиот.

Како што е познато, хемиската анализа, содржината на поединечните елементи ги дава во проценти по маса. За да ја одредиме топлотната моќ на некое гориво кое се состои од следниве елементи: јаглерод (C)%, водород (H)%, кислород (O)%, азот (N)%, сулфур (S)%, влага (W)% и пепел (A)%, потребно е да ги познаваме, покрај процентуалното учество на секој поединечен елемент во составот на горивото, уште и топлината која ја оддава секој килограм на согорувачкиот елемент при своето целосно согорување. Од сите споменати елементи,

добие ни со хемиска анализа на горивото, топлина при согорување произведуваат само јаглеродот, водородот и сулфурот. Поради тоа, сега сме во состојба да ја најдеме количината на топлина која при согорување ја произведуваат елементите јаглерод, водород и сулфур, кои се содржат во 1 [kg] или во 1 [m³] гориво, но притоа треба да имаме во предвид дека елементот водород само со еден свој дел (слободен водород) согорува, додека другиот дел е врзан за кислородот.

За одредување на горната топлотна моќ на цврстите и течните горива служи таканаречената “Сојузна VDI равенка” (поставена од страна на Друштвото на германските инженери), во која се земени следниве просечни заокружени вредности на топлотната моќ на согорувачките елементи:

- ❖ јаглерод (C) 33400 [kJ/kg];
- ❖ водород (H) 143200 [kJ/kg] горна топлотна моќ;
- ❖ водород (H) 120600 [kJ/kg] долна топлотна моќ;
- ❖ сулфур (S) 10500 [kJ/kg] средна топлотна моќ.

Самата “Сојузна VDI равенка” за одредување на горната топлотна моќ на цврстите и течните горива е дадена со следниов израз:

$$H_g \text{ [kJ/kg]} = 340 \cdot C + 1420 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 105 \cdot S$$

Овде ознаките C, H, O и S процентуално ги прикажуваат содржините на јаглерод (C), водород (H), кислородот (O) и сулфур (S) (согорувачкиот, а не несогорувачкиот дел), добиена со хемиска анализа на горивото. Коефициентот пред овие големини претставува топлина добиена со согорување на тежинските единици од 1 [kg] од горните елементи, само сведени на 1% маса.

Одредување на големините на долната топлотна моќ на горивата се врши со помош на следниов израз:

$$H_d \text{ [kJ/kg]} = 340 \cdot C + 1200 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 105 \cdot S - 25 \cdot W$$

Во овој израз големината W претставува процентуална содржина на влага во горивото, додека пак коефициентот пред неа ја покажува потребната количина на топлина за загревање на масената единица од 1 [kg] вода од 20° C на температура од 100° C и за нејзино испарување во пареа од 100° C, сведено на 1% маса.

Одредување на топлотната моќ на гасното гориво се врши со едноставно собирање на топлотната моќ на поединечните составни делови на горивото. Самите вредности на топлотната моќ на поединечните составни делови, кои учествуваат во согорување на горивото, се однесуваат на зафатнинска единица [m³]. Според тоа, за одредување на вредностите на топлотната моќ на гасното гориво потребно е да се познава процентуалниот состав, како и топлотната моќ на поединечните составни делови, односно количина на топлина произведена со согорување на 1% на волумен на секоја поединечна состојка на гасното гориво.

Горната топлотна моќ за 1 [m³] на гасното гориво со процентуален состав: јаглеродмоноксид (CO)%, водород (H₂)%, метан (CH₄)%, ацетилен (C₂H₂)%, етилен (C₂H₄)%, е дадена со следниов израз:

$$H_g [kJ/m^3] = 126 \cdot CO + 128 \cdot H_2 + 398 \cdot CH_4 + 621 \cdot C_2H_2 + 665 \cdot C_2H_4$$

Во овој израз коефициентите претставуваат произведени количини на топлина со согорување на 1 волуменски процент на согорувачките елементи: јаглеродмоноксид, водород, метан, ацетилен и етилен, додека големините CO, H₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, претставуваат волуменски проценти добиени со хемиска анализа на гасното гориво.

Изразот за одредување на долната топлотна моќ на гасното гориво со ист состав гласи:

$$H_d [kJ/m^3] = 126 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 358 \cdot CH_4 + 600 \cdot C_2H_2 + 643 \cdot C_2H_4$$

Точното одредување на вредноста на топлотната моќ на горивата се врши со помош на специјален уред, наречен калориметар, и тоа за цврсти и течни горива со помош на т.н. кречерова бомба, при константен волумен (V-const.), а за гасови со калориметар кој функционира при константен притисок (p-const.) т.н. Јункерсов калориметар.

Кај двете постапки при одредувањето на топлотната моќ на горивото, продуктите на согорување се сведуваат на иста состојба, т.е., на температура која горивото со воздухот ја имало пред самиот почеток на согорување.

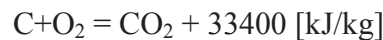
5.4 ОСНОВНИ СТЕХИОМЕТРИСКИ РАВЕНКИ ЗА СОГОРУВАЊЕ

Стехиометриските равенки ќе бидат изразени во следниве единици: маса [kg], молови [kmol] и нормални кубни метри [m_n³], каде што

$$m_n^3 = \frac{1}{22,4} [kmol] \text{ или } m_n^3 = \frac{M}{22,4} [kg].$$

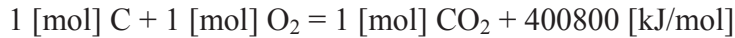
5.4.1 ПОТПОЛНО СОГОРУВАЊЕ НА ЈАГЛЕРОДОТ

Процесот на хемиска реакција на потполно согорување на јаглеродот е прикажан со следнава стехиометриска равенка:



Како што од горниот израз се гледа, на еден атом односно молекула на јаглерод потребни се два атома на кислородот за да согори во јаглероддиоксид ослободувајќи истовремено топлина од 33400 [kJ/kg], што значи дека оваа реакција е егзотермна. Од горнава равенка понатаму се гледа дека бројот на молекулите на левата страна од равенката не останува еднаков на бројот на молекулите од десната страна, т.е се променил, постанувајќи од две молекули на една молекула. Меѓутоа, бројот на атомите на десната страна од равенката останува непроменет во однос на

левата страна, додека се променува само нивниот распоред во молекулите, што е битно кај хемиските равенки за нивно лесно и брзо контролирање. Имајќи ја во предвид молекуларната маса на јаглеродот ($C=12$), кислородот ($O_2=2 \times 16=32$) истата равенка со примена на молови ќе го добие следниов облик:



При согорување на еден 1 [mol] јаглерод во јаглероддиоксид се добива 400800 [kJ], а бидејќи 1 [mol] јаглерод има маса од 12 [kg], при согорување на 1 [kg] јаглерод ќе се добие $400800 : 12 = 33400$ [kJ/kg].

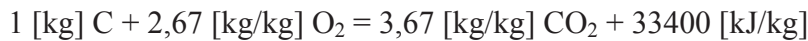
Кога во горната равенка изразена во молови, се прикаже во масената единица [kg] ќе се добие изразот:



Бидејќи се бара онаа количина на кислород, која е потребна за согорување на 1 [kg] јаглерод, ќе имаме нов израз добиен со делење на горната равенка со 12:



Од овој израз се гледа дека за потполно согорување на 1 [kg] јаглерод во јаглероддиоксидот потребно е кислород од $32/12 = 2,67$ [kg/kg]. На тој начин се добива количината на јаглероддиоксид $1 + 2,67 = 3,67$ [kg/kg]. Исто ова може да го изразиме со следнава стехиометриска равенка:

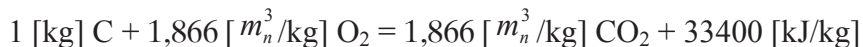


Ако во горната почетна равенка количината на јаглерод ја изразиме во масена единица [kg], а количината на кислород и јаглероддиоксид во зафатнинска единица [m_n^3], ќе го добиеме следниов израз:



Од кој можеме да го добиеме волуменот на кислород односно волумен на образуваниот јаглероддиоксид: $22,4/12 \text{ [} m_n^3 \text{/kg]} = 1,866 \text{ [} m_n^3 \text{/kg]}$, а што претставува волумен на кислородот потребен за потполно согорување на 1 [kg] јаглерод, односно волумен образуван од јаглероддиоксид настанат од потполно согорување на 1 [kg] јаглерод.

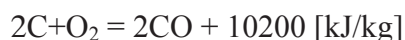
Исто ова можеме да го изразиме со следнава стехиометриска равенка:



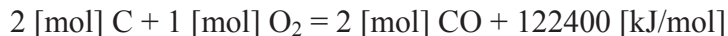
Од горната равенка произлегува дека при согорување на 1 [kg] јаглерод се образуваат 3,67 [kg] јаглероддиоксид, а кој зафаќа простор од $1,866 \text{ [} m_n^3 \text{]}$.

5.4.2 НЕПОТПОЛНО СОГОРУВАЊЕ НА ЈАГЛЕРОДОТ

Стехиометриската равенка за процесот на непотполно согорување на јаглеродот, т.е. согорување на јаглеродот во јаглеродмоноксид CO гласи:



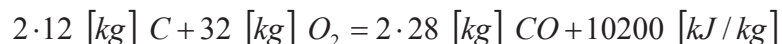
Како што од овој израз се гледа, за непотполно согорување на еден атом на јаглерод потребен е еден атом на кислород за да се добие јаглеродмоноксид со истовремено ослободување на значително помала количина на топлина од 10200 [kJ/kg] што значи дека и во овој случај реакцијата егзотермна. Ако горниот израз го прикажеме во молови ќе биде:



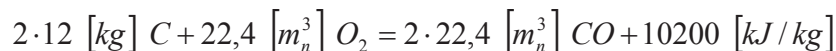
Како што гледаме, при согорување на 1 [mol] јаглерод во јаглеродмоноксидот се добива топлина од 122400 [kJ/mol], па бидејќи 1 [mol] јаглерод има маса 12 [kg] при непотполно согорување на 1 [kg] јаглерод ќе се добие количина на топлина:

$$122400/12 = 10200 \text{ [kJ/kg]}$$

Ако горната почетна равенка ја изразиме во масена единица [kg], ќе добиеме:



Меѓутоа, ако го изразиме јаглеродот во масената единица [kg], а кислородот и јаглероддиоксидот во зафатнинска единица [m_n^3] ќе се добие:



Од горниот израз гледаме дека, за непотполно согорување на 1 [kg] јаглерод во јаглеродмоноксидот потребна количина на кислород е:

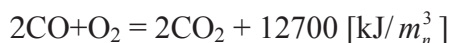
$$\frac{32}{2 \cdot 12} = \frac{32}{24} = 1,33 \text{ [kg/kg]} \text{ или } \frac{22,4}{2 \cdot 12} = \frac{22,4}{24} = 0,93 \text{ [m}_n^3\text{/kg]}$$

Според тоа, при непотполно согорување на 1 [kg] јаглерод ќе се добие зафатнинска количина јаглеродмоноксид:

$$\frac{2 \cdot 22,4}{2 \cdot 12} = \frac{44,8}{24} = 1,866 \text{ [m}_n^3\text{/kg]}$$

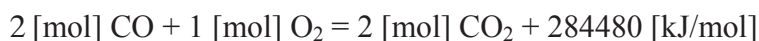
чија маса ќе изнесува: $1 + 1,33 = 2,33 \text{ [kg/kg]}$.

Согурувањето на јаглеродмоноксидот во јаглероддиоксидот, т.е. хемиската реакција на согорување на јаглеродмоноксидот во јаглероддиоксидот е прикажан со следниов стехиометриски израз:



Според горниот израз на една молекула јаглероддиоксид потребен е еден атом кислород за да согори во јаглероддиоксидот, при што се ослободува само 12700 [kJ/ m_n^3], што значи дека реакцијата е егзотермна.

Ако примениме молови ќе добиеме:



Како што гледаме при согорување на 1 [mol] јаглеродмоноксид во јаглероддиоксид се ослободува 284480 [kJ/mol], па поради тоа што волуменот на 1 [mol] изнесува 22,4 [m_n^3], при согорувањето на 1 [m_n^3]

јаглеродмоноксид во јаглероддиоксид се развива следнава количина на топлина:

$$284480/22,4 = 12700 \text{ [kJ/m}_n^3 \text{]}$$

Ако горниот израз е прикажан во зафатнинска единица ќе го има следниов облик:

$$2 \cdot 22,4 \text{ [m}_n^3 \text{]} \text{ CO} + 22,4 \text{ [m}_n^3 \text{]} \text{ O}_2 = 2 \cdot 22,4 \text{ [m}_n^3 \text{]} \text{ CO}_2 + 12700 \text{ [kJ/m}_n^3 \text{]}$$

Бидејќи обично е потребно да се знае количината на кислород, која е потребна за согорување на 1 [m_n³] јаглеродмоноксид CO, можеме горниот израз да го промениме во:

$$1 \text{ [m}_n^3 \text{]} \text{ CO} + \frac{1}{2} \text{ [m}_n^3 \text{]} \text{ O}_2 = 1 \text{ [m}_n^3 \text{]} \text{ CO}_2 + 12700 \text{ [kJ/m}_n^3 \text{]}$$

Според тоа, за согорување на 1 [m_n³] јаглерод моноксид потребно е 0,5 [m_n³] кислород, при што се создава, како продукт на согорување 1 [m_n³] јаглероддиоксид. Од порано изложеното гледаме дека за непотполно согорување на 1 [kg] јаглерод во јаглеродмоноксидот се развива 1,866 [m_n³/kg] јаглеродмоноксид со ослободување на топлина од 10200 [kJ/kg]. Со понатамошно согорување на 1,866 [m_n³/kg] јаглеродмоноксид во јаглероддиоксидот се ослободува следнава топлина:

$$1,866 \text{ [m}_n^3 \text{/kg]} \cdot 12700 \text{ [kJ/m}_n^3 \text{]} = 23700 \text{ [kJ/kg]}$$

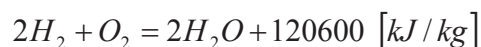
Како што гледаме вкупната количина на топлина, која се развива од почетокот на согорување на 1 [kg] јаглерод C најпрво во јаглеродмоноксидот CO, па на него во јаглероддиоксидот CO₂, ќе изнесува:

$$10200 + 23700 = 33900 \text{ [kJ/kg]},$$

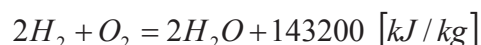
а волуменот на настантиот јаглероддиоксид е 1,866 [m_n³/kg], што е исто со резултатите добиени ако 1 [kg] јаглерод директно потполно би согорел во јаглероддиоксидот како што тоа порано го видовме.

5.4.3 СОГОРУВАЊЕ НА ВОДОРОД

Хемискиот израз за согорување на водородот H₂ во водата H₂O, при што водата на крајот на согорувањето ќе се јави во состојба на пареа и на температура над 100°C, а при атмосферски притисок можеме да биде прикажан со следнава стехиометриска равенка:

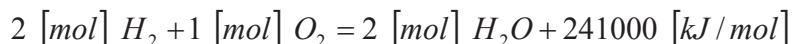


ако пак водата во продуктите на согорување е во течна состојба изразот би бил:



Како што е познато, во пракса сè уште се применува првиот израз, бидејќи водата е во состојба на пареа поради високите температури на

продуктите на согорување. Од споменатиот израз гледаме дека за согорувањето на 1 молекула на водород H_2 потребен е 1 атом на кислород O при што се добива вода H_2O и се ослободува количина на топлина од 120600 [kJ/kg], што значи дека оваа реакција е егзотермна. Познавајќи ја молекуларната маса на водородот ($H_2=2$), водата ($H_2O=18$), ќе го имаме изразот прикажан во молони:



Како што се гледа, при согорување на 1 [mol] на водород во водата се ослободуваат 241000 [kJ/mol], па бидејќи 1 [mol] на водород има маса од 2 [kg], па при согорување на 1 [kg] водород во водата ќе се добие количина на топлина од: $241000/2 = 120500$ [kJ/kg]. Во случај кога водата е во состојба на пара, прикажано во масена единица, ќе добиеме:

$$2 \cdot 2 [kg] H_2 + 22,4 [m_n^3] O_2 = 2 \cdot 22,4 [m_n^3] H_2O + 120600 [kJ/kg]$$

Од ова гледаме дека за согорување на 1 [kg] водород H_2 во водата H_2O потребно е кислород O_2 во износ од:

$$\frac{32}{2 \cdot 2} = 8 [kg/kg] \text{ или } \frac{22,4}{2 \cdot 2} = 5,6 [m_n^3/kg]$$

при што се добива количина на водена пара:

$$\frac{2 \cdot 22,4}{2 \cdot 2} = 11,2 [m_n^3/kg] \text{ или } \frac{2 \cdot 18}{2 \cdot 2} = 9 [kg/kg]$$

Ако пак се воведат зафатнинската единица [m_n^3] ќе го добиеме изразот:

$$2 \cdot 22,4 [m_n^3] H_2 + 22,4 [m_n^3] O_2 = 2 \cdot 22,4 [m_n^3] H_2O + 10500 [kJ/m_n^3]$$

Бидејќи од порано знаеме дека при согорување на 1 [mol] водород во вода (во состојба на пара) се развива топлина од 241000 [kJ/mol], односно за случај да добиеме вода во продуктите на согорување во течна состојба се развива топлина од 286500 [kJ/mol], а знаејќи дека волуменот на 1 [mol] е 22,4 [m_n^3], ја добиваме количината на топлина која се развива при согорување на 1 [m_n^3] водород: $241000/22,4=10500$ [kJ/ m_n^3], односно: $286500/22,4=12800$ [kJ/ m_n^3] што претставува долна, односно горна топлотна моќ на водородот. Покрај тоа, од истата равенка гледаме дека за согорување на 1 [m_n^3] водород потребна е следнава количина на кислород:

$$\frac{22,4}{2 \cdot 22,4} = 0,5 [m_n^3]$$

при што се добива следнава количина на пара:

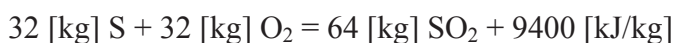
$$\frac{2 \cdot 22,4}{2 \cdot 22,4} = 1 [m_n^3].$$

5.4.4 СОГОРУВАЊЕ НА СУЛФУР

Согорувањето на сулфурот во сулфурдиоксидот може да се прикаже со следнава стехиометриска равенка: $S + O_2 = SO_2 + 9400 \text{ [kJ/kg]}$ од која се гледа дека за согорување на една молекула сулфур во сулфур диоксидот потребна е една молекула на кислород, при што се ослободува 9400 [kJ/kg], што значи дека и оваа реакција е егзотермна. Знаејќи ја молекуларната маса на сулфурот ($S=32$) и сулфурдиоксидот ($SO_2=64$), ќе го добиеме изразот за согорување на сулфурот во сулфурдиоксидот во кој количината ќе ја изразиме во молови:

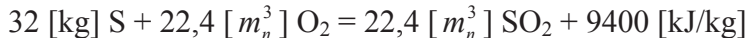


Ако во горната равенка место моларни воведеме масени единици [kg] ќе го добиеме изразот:



Како што гледаме, при согорување на 1 [mol] сулфур во сулфурдиоксидот се развива 300800 [kJ/mol], па поради тоа што масата на 1 [mol] сулфур е 32 [kg] при согорување на 1 [kg] сулфур ќе биде развиена топлина од $300800/32=9400$ [kJ/kg].

Ако во горниот израз ја прикажеме количината на сулфурот S во масени единици [kg] а количината на кислородот O_2 и сулфурдиоксидот во волуменски единици [m_n^3] ќе го добиеме изразот:



Од горната равенка се гледа дека, за согорување на 1 [kg] сулфур во сулфурдиоксидот потребна е следнава количина на кислород:

$$32/32 = 1 \text{ [kg/kg]} \text{ или } 22,4/32 = 0,7 \text{ [m}_n^3\text{/kg]}$$

Притоа се добива следнава количина на сулфурдиоксид:

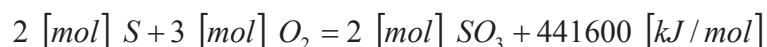
$$64/32 = 2 \text{ [kg/kg]} \text{ или } 22,4/32 = 0,7 \text{ [m}_n^3\text{/kg]}$$

Хемиската равенка на согорување на сулфурот S во сулфур триоксидот SO_3 гласи:



од каде се гледа дека за согорување на две молекули на сулфур потребни се три молекули на кислород, при што се добиваат 2 молекула на сулфуртриоксид со ослободување на топлина од 13800 [kJ/kg], што значи дека и оваа реакција е егзотермна. Бидејќи во пракса дел од сулфурот согорува во сулфуртриоксид, за топлотна моќ на сулфурот се усвојува средната вредност која изнесува приближно 10500 [kJ/kg].

Познавајќи ја молекуларната маса на сулфурот и сулфуртриоксидот ($SO_3=80$) ќе добиеме израз за согорување на сулфурот во сулфуртриоксидот во кој количината ќе ја изразиме во молови:



Ако во горната равенка место моларни воведеме масени единици, ќе го добиеме следниов израз:

$$2 \cdot 32 \text{ [kg]} S + 3 \cdot 32 \text{ [kg]} O_2 = 2 \cdot 80 \text{ [kg]} SO_3 + 13800 \text{ [kJ/kg]}$$

Како што гледаме, при согорување на 1 [mol] сулфур во сулфуртриоксид се ослободува 441600 [kJ/mol], па поради тоа што масата на 1 [mol] сулфур е 32 [kg], при согорување на 1 [kg] сулфур во сулфур триоксидот ќе биде ослободена топлина од 441600/32=13800 [kJ/kg].

Ако во горниот почетен израз ја прикажеме количината на сулфурот S во масени единици [kg], а количината на кислородот O₂ и сулфуртриоксидот SO₃ во волуменски единици [m³] ќе добиеме:

$$2 \cdot 32 \text{ [kg]} S + 3 \cdot 22,4 \text{ [m}^3\text{]} O_2 = 2 \cdot 22,4 \text{ [m}^3\text{]} SO_3 + 13800 \text{ [kJ/kg]}$$

Од горната равенка се гледа дека за согорување на 1 [kg] сулфур во сулфуртриоксидот потребна е следнава количина на кислород:

$$\frac{3 \cdot 32}{2 \cdot 32} = 1,5 \text{ [kg/kg]} \text{ или } \frac{1 \cdot 22,4}{2 \cdot 32} = 1,05 \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

при што се добива количина на сулфуртриоксид:

$$\frac{2 \cdot 80}{2 \cdot 32} = 2,5 \text{ [kg/kg]} \text{ или } \frac{2 \cdot 22,4}{2 \cdot 32} = 0,7 \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

И покрај тоа што сулфурот при своето согорување ослободува одредена количина на топлина, сепак тој се смета за штетна состојка на горивото, па затоа неговата развиена топлина се занемарува со обзир на неговата негативна страна.

5.4.5 СОГОРУВАЊЕ НА ЈАГЛЕВОДОРОДИ

За да се добие израз за согорување на тешките јаглеводороди C_mH_n потребни се две стехиометриски равенки и тоа: за согорување на јаглеродот C_m во јаглероддиоксидот CO₂ и за согорување на водородот H_n во водата H₂O.

Согорувањето на јаглеродот C_m во јаглероддиоксидот CO₂, при што количините се изразуваат во масени единици [kg], може да се прикаже на следниов начин:

$$12 \cdot m \text{ [kg]} C + 32 \cdot m \text{ [kg]} O_2 = 44 \cdot m \text{ [kg]} CO_2 + H_{dc} \text{ [kJ/kg]}$$

Согорувањето на водородот H_n во водата H₂O, при што количините се изразени во масени единици [kg], е прикажано со следниов израз:

$$2 \cdot 2 \cdot n \text{ [kg]} H_2 + 32 \cdot n \text{ [kg]} O_2 = 2 \cdot 18 \cdot n \text{ [kg]} H_2O + H_{dH_2} \text{ [kJ/kg]} \text{ од каде,}$$

$$n \text{ [kg]} H_2 + 32 \frac{n}{4} \text{ [kg]} O_2 = 18 \frac{n}{2} \text{ [kg]} H_2O + H_{dH_2} \text{ [kJ/kg]}$$

Со собирање на овие две стехиометриски равенки ќе го добиеме следниов израз:

$$(12 \cdot m + 1 \cdot n) [\text{kg}] C_m H_n + 32(m + n/4) [\text{kg}] O_2 = \\ = 44 \cdot m [\text{kg}] CO_2 + 18 \cdot n/2 [\text{kg}] H_2O + (H_{dc} + H_{dH_2}) [\text{kJ/kg}]$$

Ако количините се изразат во молови, равенката го добива следниов облик:

$$1 [\text{mol}] C_m H_n + (m + n/4) [\text{mol}] O_2 = \\ = m [\text{mol}] CO_2 + n/2 [\text{mol}] H_2O + (H_{dc} + H_{dH_2}) [\text{kJ/mol}]$$

Ако пак оваа равенка ја прикажеме со зафатнинска единица [m_n^3] ќе го добиеме следниов израз:

$$22,4 [m_n^3] C_m H_n + 22,4(m + n/4) [m_n^3] O_2 = \\ = 22,4 \cdot m [m_n^3] CO_2 + 22,4 \cdot n/2 [m_n^3] H_2O + (H_{dc} + H_{dH_2}) [kJ/m_n^3]$$

Ако целата равенка ја скратиме со 22,4 ќе добиеме:

$$1 [m_n^3] C_m H_n + (m + n/4) [m_n^3/m_n^3] O_2 = \\ = m [m_n^3/m_n^3] CO_2 + n/2 [m_n^3/m_n^3] H_2O + (H_{dc} + H_{dH_2}) [kJ/m_n^3]$$

Според тоа за потполно согорување на 1 [m_n^3] $C_m H_n$ потребно е: $(m + n/4) [m_n^3/m_n^3] O_2$, при што се добива $m [m_n^3/m_n^3] CO_2$ јаглероддиоксид и $n/2 [m_n^3/m_n^3] H_2O$ вода.

5.5 ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА ПОТРЕБНОТО КОЛИЧЕСТВО КИСЛОРОД ЗА СОГОРУВАЊЕ

Количината на воздух која е потребна за потполно идеално согорување на одредена количина на гориво се нарекува минимална и се бележи со L_{\min} .

За да се добие најмала (теоретска) количина на воздух која е потребна за потполно согорување на некое гориво, мора најпрво да се најде L_{\min} за 1 [kg] од тоа гориво со помош на неговиот хемиски состав. Како што е познато, со хемиска анализа можеме да го одредиме составот на горивото, односно да ги одредиме елементите кои го сочинуваат разгледуваното гориво. Според тоа, за да се најде количина L_{\min} за 1 [kg] гориво, потребно е да ја најдеме точно одредената количина кислород која е доволна за потполно согорување на секој поединечен елемент кој се содржи во горивото.

За цврсти и течни горива, чиј состав (по маса) е добиен со хемиска анализа на горивото: С% јаглерод, Н% водород, О% кислород, и S% сулфур, најмалата количина на воздух (теоретска) - L_{\min} се добива на основа на најдените количини на кислород потребни за потполно согорување на секој поединечен елемент на анализираното гориво; притоа мораме да ги земеме во обзир количините на слободниот водород во горивото $\left(H - \frac{O}{8}\right)$.

Според тоа, дали работиме со масени или волуменски единици ќе имаме L_{ming} , односно L_{minv} . За да ја најдеме најмалата количина на воздух изразена во масени единици - L_{ming} , мораме претходно да ја одредиме минималната количина на кислород O_{ming} во масени единици според следниов израз:

$$O_{\text{ming}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg gorivo}} \right] = \frac{1}{100} \left[2,67 \cdot C + 8 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 1 \cdot S \right]$$

Во овој израз коефициентите 2,67, 8 и 1 претставуваат минимална количина на кислород во масени единици потребни за согорување на 1 масен процент на согорувачките елементи: јаглерод, водород и сулфур, додека големините C, $(H-O/8)$, S претставуваат масени проценти добиени со хемиска анализа на даденото гориво. За да ја најдеме најмалата количина на воздух изразена во волуменски единици - L_{minv} , мораме претходно да ја одредиме минималната количина на кислород O_{minv} во волуменски единици според следниов израз:

$$O_{\text{minv}} \left[\frac{m^3}{\text{kg gorivo}} \right] = \frac{1}{100} \left[1,87 \cdot C + 5,6 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 0,7 \cdot S \right]$$

Во овој израз коефициентите 1,87, 5,6 и 0,7 претставуваат минимална количина на кислород во волуменски единици потребна за согорување на 1 масен процент на согорувачките елементи: јаглерод, водород и сулфур, додека големините C, $(H-O/8)$, S претставуваат масени проценти добиени со хемиска анализа на даденото гориво.

Бидејќи во единица количина на атмосферскиот воздух се наоѓа 23% кислород по маса или 21% по волумен, ќе имаме два израза за минимална количина на воздух изразени во масени и волуменски единици.

Според тоа, за да ја најдеме најмалата количина на воздух (по маса), потребно е најмалата количина на кислород O_{ming} да ја поделиме со 0,23, значи:

$$L_{\text{ming}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg gorivo}} \right] = \frac{1}{0,23 \cdot 100} \left[2,67 \cdot C + 8 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 1 \cdot S \right]$$

А најмалата количина на воздух (по волумен) ја добиваме O_{minv} со делење со 0,21, значи:

$$L_{\text{minv}} \left[\frac{m^3}{\text{kg gorivo}} \right] = \frac{1}{0,21 \cdot 100} \left[1,87 \cdot C + 5,6 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 0,7 \cdot S \right]$$

Онаа количина на воздух со која обично се работи се нарекува вистинска количина на воздух и се обележува со L. Ова количина на воздух е поголема од најмалата количина L_{min} , бидејќи при согорувањето на горивото потребно е на секоја негова честица да се обезбеди потребна количина на кислород за оксидација, а за да се постигне ова потребно е покрај минималната количина да се додаде нешто поголема количина на воздух. Покрај овој вишок на воздух за согорување, со цел да се постигне потполно согорување потребно е да се изврши добро мешање на горивото и воздухот, бидејќи еден дел од воздухот нема да стапи во хемиска реакција со честичките на горивото.

Од претходно кажаното се доаѓа до заклучок дека за потполно согорување на било кое гориво треба да се додаде поголема количина на воздух од минималната. За согорување на гориво во ложиштата на парниот котел обично се доведува количина на воздух која е 1,1 до 2,0 пати поголема од L_{\min} .

5.6 ЗАГУБИ ПРИ НЕПОТПОЛНО СОГОРУВАЊЕ

Непотполното согорување на горивата настапува во случај на недоволна количина на воздух, т.е. кислород во текот на согорувањето, во тој случај во производите на согорување се јавуваат производи на непотполна оксидација на јаглеродот, т.е. јаглеродмоноксид, и други несогорени состојки, односно соединенија (јаглеводороди), како на пример метан итн.

Така на пример при непотполно согорување на еден килограм јаглерод се ослободува само 10200 [kJ]. Од ова се забележува дека, при непотполното согорување на 1 [kg] јаглерод се ослободува само 30% од онаа топлина која би се ослободила при потполно согорување.

За таа цел ќе ги разгледаме загубите кои се јавуваат при непотполното согорување кај парните котли. Големината на загубите зависи најмногу од видот на употребеното гориво и типот на парниот котел. Одделни загуби можат да се пресметаат, а за останатите постојат податоци добиени врз искуство со изведени парни котли.

Постојат вкупно осум загуби што се јавуваат во работата на парните котли. Во нив не се вбројани загубите при стартување и престанок на работа на парниот котел, бидејќи се јавуваат повремено.

U_1 - загуба поради пропаѓање на гориво низ решетката која се јавува исклучиво при согорување на цврсто гориво на решетка. Загубата е поголема ако асортиманот на горивото не е сообразен со големината на отворите на решетката, а исто така поголем е кај решетки со релативно движење на горивото по решетката.

U_2 - загуба поради несогорено гориво во пепелта, која постои при согорување на цврсто гориво на решетка и цврсто сомелено гориво во лет. Може да се намали со добро мешање на горивото на решетката, а исто така пожелно е решетката да има посебен дел за догорување (целосно извршување на четвртата фаза).

U_3 - загуба поради летечки кокс што се јавува при согорување на цврсто гориво, а и при согорување на течно гориво, но во тој случај е незначителна. Загубата е всушност појава на несогорени честички во излезните димни гасови.

Овие три загуби претставуваат механички загуби на гориво. Останатото гориво ќе согори и ќе даде како продукт чадни гасови, односно поедноставно речено ќе се гасифицира. Врз основа на овие загуби се одредува коефициентот на гасификација на горивото во ложиштето η_g :

$$\eta_g = \frac{100 - (U_1 + U_2 + U_3)}{100}$$

каде U_1 , U_2 , и U_3 се изразени во проценти %.

Спомнатите загуби не се јавуваат при согорување на гасни горива, т.е. кај нив коефициентот на гасификација е 1. Ова е нормално, бидејќи ова гориво се уфрлува во ложиштето во гасна состојба.

U_4 - загуба поради хемиска непотполност на согорувањето која е карактеристична за согорување на сите видови горива. Се манифестира со појава на горливи гасови (CO , H_2 , C_mH_n) во излезните чадни гасови. За разни пресметки неговата големина се усвојува. При работа на изведен парен котел може со анализа на излезните димни гасови точно да се одреди. Загубата најмногу зависи од вишокот на воздухот и добрата конструкција на ложиштето.

U_5 - загуба поради таложеење на саѓи претставува всушност таложеење на јаглерод на ладните места во ложиштето и гасниот дел на котелот. Се јавува при согорување на сите видови горива, но по својата големина е незначителна.

U_6 - загуба поради физичка топлина на згурата го следи согорувањето на цврстите горива, кај кои како спореден продукт на согорувањето се јавува пепелта (згурата). Со нејзино отстранување од ложиштето се губи одредено количество топлина што таа го содржи. Најчесто таа загуба е незначителна и во пресметките не се зема во предвид. Но ако режимот на согорување е таков што пепелта се отстранува од ложиштето во течна состојба (згура) во тој случај ова загуба е значителна и не смее да се занемари. Големината на загубата зависи од процентот на пепел во горивото. Ако се познати сите хемиско-физички карактеристики на пепелта загубата може и пресметковно да се одреди.

Наведените шест загуби се директно врзани со успешноста на горивата во ложиштата. Со помош на нив може да се пресмета коефициентот на корисно дејство на ложиштето η_L :

$$\eta_L = \frac{100 - (U_1 + U_2 + \dots + U_6)}{100}$$

каде се U_1, U_2, \dots и U_6 дадени во проценти %.

U_7 - загуба на топлина со излезните гасови е најголема и најзначајна кај парните котли. Всушност, претставува загуба на топлина која се губи во околината со загреаните излезни гасови. Загубата е поголема колку што поголеми се коефициентот на вишок на воздух и температурата на излезните димни гасови.

Поради тоа температурата на излезните гасови се стреми да биде што пониска (со тоа и нивната енталпија) т.е. тие да изнесат што помалку топлина надвор од котелот. Вишокот на воздух исто така треба да биде што е можно помал (при поголем вишок на воздух се добива поголемо количество димни гасови за секој kg гориво), но при тоа секако да не се доведе во опасност успешноста на согорувањето.

Загубата со излезните гасови за секој парен котел и соодветно употребено гориво редовно се пресметува:

$$U_7 = 100 \cdot \frac{\eta_g}{H_d} \cdot (I_g - I_l) [\%]$$

каде е:

H_d [kJ/kg] долна топлотна моќ на горивата;

I_g [kJ/kg] енталпија на димните гасови на излез од котелот за соодветна излезна температура и коефициентот на вишок на воздух;

$I_l = \lambda_{iz} \cdot V_{L, \min} \cdot i_l$ [kJ/kg] енталпија на надворешниот воздух сведена на 1 kg гориво, а која се пресметува за температура на околината (обично 20°C);

i_l [kJ/m³] енталпија на воздух за усвоена надворешна температура.

U_8 - загуба со надворешно ладење на котелот која неизбежно се јавува кај сите парни котли (во принцип кај секоја топлинска машина). Тоа е загуба на топлина што се оддава низ ѕидовите на котелот во околината. Покрај низа фактори, најмногу зависи од дебелината и квалитетот на ѕидот и изолацијата на котелот. За нејзината големина постојат искусвени податоци, а начелно е помала за котли со поголеми капацитети и обратно. Врз основа на оваа загуба може да се пресмета коефициентот на изолираност на котелот η_z :

$$\eta_z = \frac{100 - U_8}{100}$$

каде е U_8 изразна во проценти %.

Збирот на сите загуби што се јавуваат во работата на парниот котел го одредуваат коефициентот на корисно дејство на котелот η_k кој што се пресметува со следнава формула:

$$\eta_k = \frac{100 - (U_1 + U_2 \dots + U_8)}{100}$$

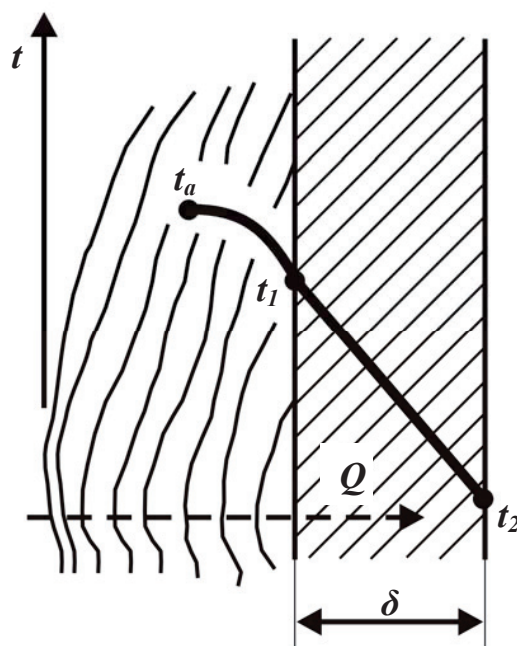
Контролни прашања:

1. Како се делат горивата според агрегативната состојба?
2. Кои се главни состојки на горивата?
3. Што претставува долна топлинска моќ на горивата?
4. Што е потребно за топлинно согорување на 1 [m³] C_mH_n?
5. Како се пресметува минималната количина на кислород за согорување?
6. Што претставува коефициентот η_k ?

6. ПРЕНОС НА ТОПЛИНА

6.1 ПРЕНОС НА ТОПЛИНА СО КОНВЕКЦИЈА

Пренесување на топлината со струење (конвекција) се појавува при мешање на топлите со ладните маси на некој флуид (течност или гас). При конвекција топлите честици, кои имаат поголема брзина на движење, пробивајќи се во поладните слоеви на флуидот се судираат со побавните (поладните) и при тоа предаваат топлина (вршат пренесување на топлината). Струењето или конвекцијата на флуидот може да биде природно, заради разликата на густината на топлиот и ладниот флуид или принудно предизвикано со пумпа, вентилатор, мешалка или др. Количината на разменетата топлина при конвекцијата е зависна од интензитетот на мешањето, специфичната топлина на честиците и од многу други фактори.



Слика 6.1 Пренесување на топлина со конвекција

Да разгледаме еден рамен ѕид (сл.6.1) кој од едната страна е **под влијание** со некој флуид (гас или течност) со температура t_a . Поради конвекција ќе настане пренесување на топлината од честиците на флуидот на честиците на ѕидот, и на површината на ѕидот ќе се постигне температура t_1 . Топлотниот проток кој со конвекција ќе се пренесе од флуидот на

површината на сидот, (сл.б.1) според експерименталниот закон на Њутн изнесува:

$$\Phi = \alpha \cdot A(t_a - t_1) [W]$$

каде што:

$\alpha [W/m^2K]$ – конвективен коефициент на пренос на топлината,

$A [m^2]$ – површина на која се пренесува топлината,

или за $1m^2$:

$$q = \alpha(t_a - t_1) \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Топлотниот проток што се пренесува низ цилиндричниот сид на цевката изнесува:

$$\Phi = l \frac{t_a - t_1}{\frac{1}{d\pi\alpha}} \text{ или за } 1m \text{ должина на цевката:}$$

$$q = \frac{t_a - t_1}{\frac{1}{d\pi\alpha}}$$

каде што:

l – должина на цевката;

d – дијаметар на цевката.

Коефициентот на конвективен пренос на топлина $\alpha [W/m^2K]$ зависи

од:

- ❖ брзината на струењето на флуидот покрај сидот;
- ❖ температурната разлика меѓу флуидот и сидот;
- ❖ физичките особини на флуидот: специфичната топлина, густината, вискозитетот, коефициентот на спроведување на топлината;
- ❖ обликот на површината на сидот;
- ❖ начинот на струење (природно или принудно);
- ❖ обликот на струење (ламинарно или турбулентно);
- ❖ дали при преносот на топлината се менува агрегатната состојба, како и од други посебни услови на конкретниот случај на пренесување на топлината.

Поради прегледност ќе ги наведеме просечните големини на коефициентот на конвективен пренос на топлина $\alpha [W/m^2K]$ за некои карактеристични случаи:

- ❖ $2 \div 80$ при загревање или ладење на воздухот при атмосферски притисок.
- ❖ $500 \div 3500$ при загревање на прегреана пара во прегрејач при високи притисоци,
- ❖ $200 \div 20000$ при загревање или ладење на водата,
- ❖ $600 \div 50000$ при вриење на вода на атмосферски притисок,
- ❖ $5000 \div 16000$ при кондензација на водена пара.

Меѓутоа, овие големини се ориентациони и можат многу да се разликуваат.

6.2 ПРЕНОС НА ТОПЛИНАТА НИЗ РАМЕН СИД

Ќе разгледаме премин на топлина од жешки гасови на вода (сл.6.2). Топлината од жешките гасови со температура t_a , по пат на конвекција се пренесува на површината од сидот, која има температура t_1 , а низ него се спроведува до неговата друга површина до температура t_2 , од каде пак по пат на конвекција преминува на водата која има температура t_b . При ова преминување топлината ги совладува следниве топлотни отпори:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_a} \text{ - отпор при пренесување на топлината од жешките гасови на}$$

површината на сидот;

$$R_2 = \frac{\delta}{\lambda} \text{ - отпор при спроведување на топлината низ сидот;}$$

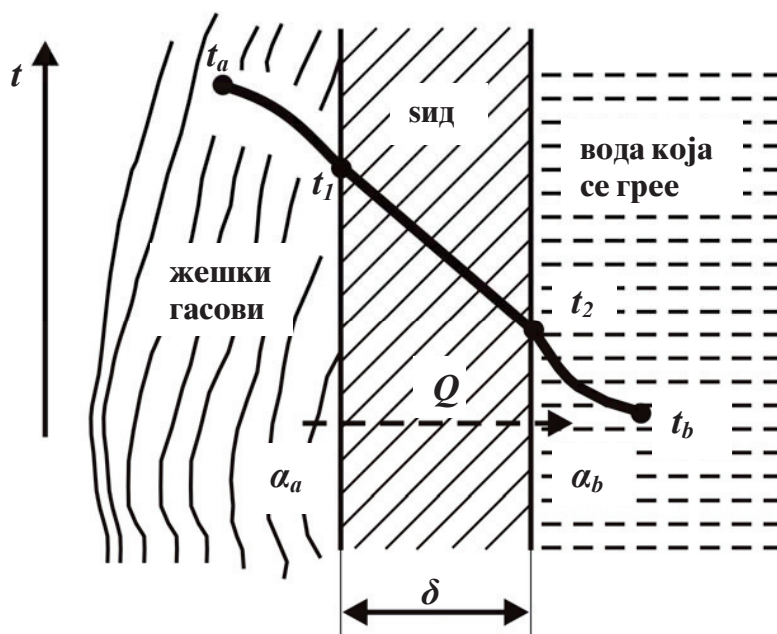
$$R_3 = \frac{1}{\alpha_b} \text{ - отпор при пренесување на топлината од површината на}$$

сидот на водата;

каде α_a и α_b се коефициенти на конвективен пренос на топлината; δ дебелина на сидот, а λ топлино спроводливост на сидот.

Вкупниот топлотен отпор при преминот на топлината од жешките гасови низ сидот до водата ќе биде:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_b} \text{ [m}^2\text{K /W]}$$



Слика 6.2 Преминување на топлина низ рамен сид

Реципрочната вредност на вкупниот топлотен отпор го дава **вкупниот коефициент на премин на топлината**, кој го означуваме со K и е даден со:

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_b}} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Топлотниот проток што ќе премине низ рамниот ѕид (сл.6.2) ќе изнесува:

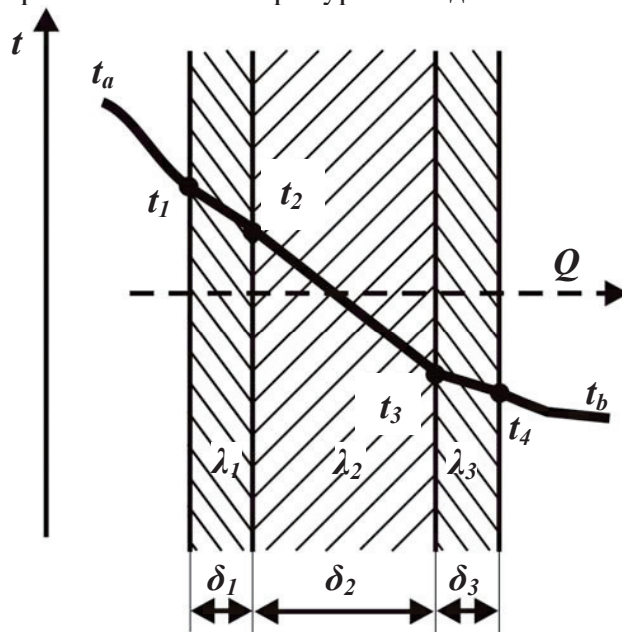
$$\Phi = K \cdot A(t_a - t_b) \text{ или за } 1m^2 \text{ од ѕидот:}$$

$$q = K(t_a - t_b)$$

Коефициентот на премин на топлина K [W/m^2K], главно, зависи од коефициентите на пренесување на топлината α_a , α_b и λ . При различни коефициенти α_a и α_b , коефициентот на премин на топлината K приближно е рамен на помалиот α . Зголемување на преминот на топлината со зголемување на коефициентот K , може да се постигне со подобрување на условите за премин на топлината од страната каде α е помал. Така кај парните котли тоа е страната на жешките гасови, кај грејачите на вода страната на водата и сл., бидејќи на тие страни коефициентите α се помали.

6.3 ПРЕНОС НА ТОПЛИНАТА НИЗ ПОВЕЌЕСЛОЕН СИД

Со помош на коефициентот K може да се пресмета преминувањето на топлина низ трослоен ѕид (види слика 6.3) со дебелина δ ($\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = \delta$), ако се познати температурите на флуидите, коефициентите α_a и α_b , топлиноспроводливоста на ѕидот λ ($\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = \lambda$), без да располагаме со податоците за површинските температури на ѕидот.



Слика 6.3 Спроведување на топлина низ трислоен рамни ѕид

За тослојниот сид, вкупниот коефициент K би се добил на следниов начин:

$$q = \alpha_a (t_a - t_1), \text{ или } q = \frac{(t_a - t_1)}{\frac{1}{\alpha_a}}$$

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_1 - t_2), \text{ или } q = \frac{(t_1 - t_2)}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}}$$

$$q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t_2 - t_3), \text{ или } q = \frac{(t_2 - t_3)}{\frac{\delta_2}{\lambda_2}}$$

$$q = \frac{\lambda_3}{\delta_3} (t_3 - t_4), \text{ или } q = \frac{(t_3 - t_4)}{\frac{\delta_3}{\lambda_3}}$$

$$q = \alpha_b (t_b - t_4), \text{ или } q = \frac{(t_b - t_4)}{\frac{1}{\alpha_b}}.$$

Со собирање на овие изрази се добива:

$$q = \frac{t_a - t_b}{\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_b}} = \frac{t_a - t_b}{\frac{1}{K}} = K \cdot (t_a - t_b) = \frac{1}{R} \cdot (t_a - t_b),$$

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_b},$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_b}} = \frac{1}{R} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

или:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_b}} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

6.4 ПРЕНОС НА ТОПЛИНАТА НИЗ ЦИЛИНДРИЧЕН СИД

Да го разгледаме пренесувањето на топлината од флуид на флуид низ еднослојна (види слика 6.4) и повеќеслојна цилиндрична (види слика 6.5) плоча.

Специфичниот топлински ток од флуид на флуид се изразува по еден метар должина на цевката. Тој не може да се менува за време на одделни етапи на топлинопренесувањето и се изразува:

- ❖ за конвективно пренесување на топлината од потоплиот флуид во цевката со температура t_a на внатрешната површина на цевката со равенката:

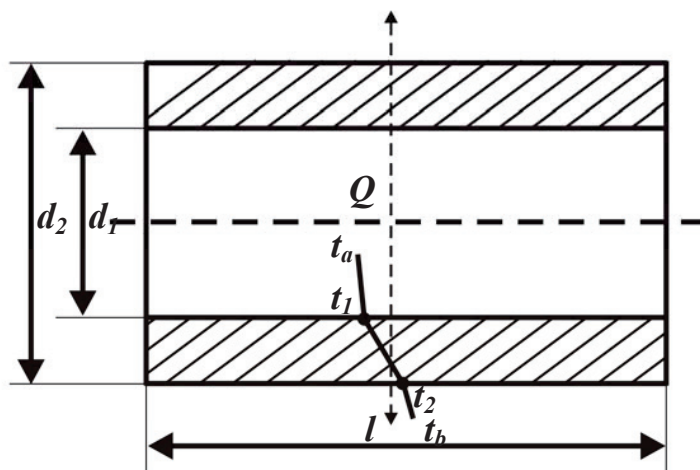
$$q = 2\pi r_1 \cdot \alpha_a (t_a - t_1) = 2\pi \frac{t_a - t_1}{\frac{1}{r_1 \alpha_a}},$$

- ❖ за пренос на топлина низ ѕидот со равенката:

$$q = 2\pi \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}},$$

- ❖ за пренос на топлината од надворешната површина на цевката на поладниот флуид со температура t_b со равенката:

$$q = 2\pi r_2 \cdot \alpha_b (t_2 - t_b) = 2\pi \frac{t_2 - t_b}{\frac{1}{r_2 \alpha_b}}.$$



Слика 6.4 Сироведување на топлина низ еднослоен цилиндричен рамен ѕид

Со собирање на трите равенки за q за еден метар должина на цевката се добива:

$$\begin{aligned} q &= 2\pi \frac{t_a - t_b}{\frac{1}{r_1 \alpha_a} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{r_2 \alpha_b}} = \frac{t_a - t_b}{\frac{1}{2\pi r_1 \alpha_a} + \frac{1}{2\pi \lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2\pi r_2 \alpha_b}} = \\ &= \frac{t_a - t_b}{\frac{1}{\pi d_1 \alpha_a} + \frac{1}{2\pi \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi d_2 \alpha_b}}. \end{aligned}$$

Ако равенката се напише со следниов начин:

$$q = K(t_a - t_b) = \frac{t_a - t_b}{\frac{1}{K}},$$

произлегува дека:

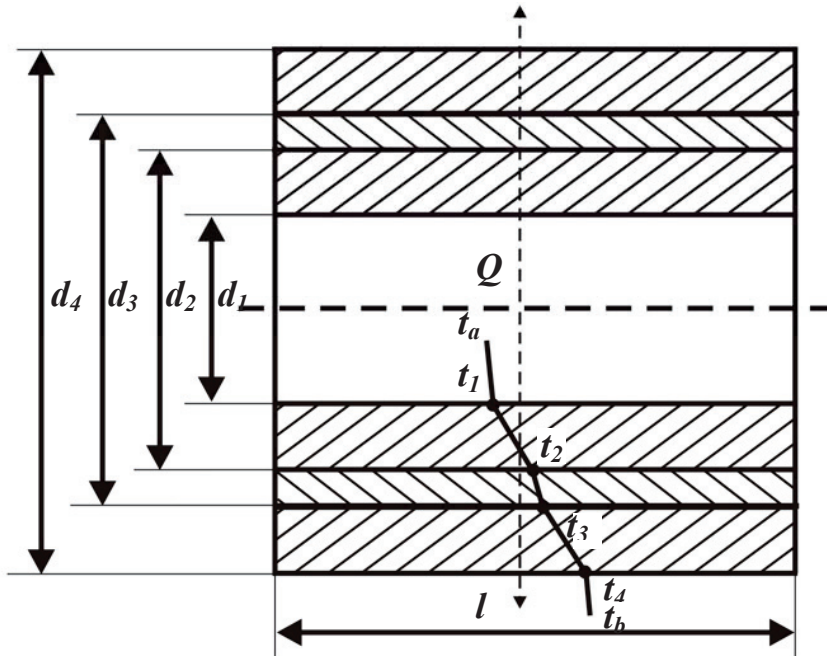
$$\frac{1}{K} = R = \frac{1}{\pi\alpha_a d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi\alpha_b d_2},$$

а оттука:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\pi\alpha_a d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi\alpha_b d_2}}.$$

Вкупниот топлотниот проток кој преминува низ еднослоен цилиндричен сид, изнесува:

$$\Phi = l \cdot q = l \cdot K(t_a - t_b) = l \frac{t_a - t_b}{\frac{1}{d_1 \pi \alpha_a} + \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_2 \pi \alpha_b}} = l \frac{t_a - t_b}{\frac{1}{K}}$$



Слика 6.5 Сїроведување на топлотина низ повеќеслоен цилиндричен рамен сид

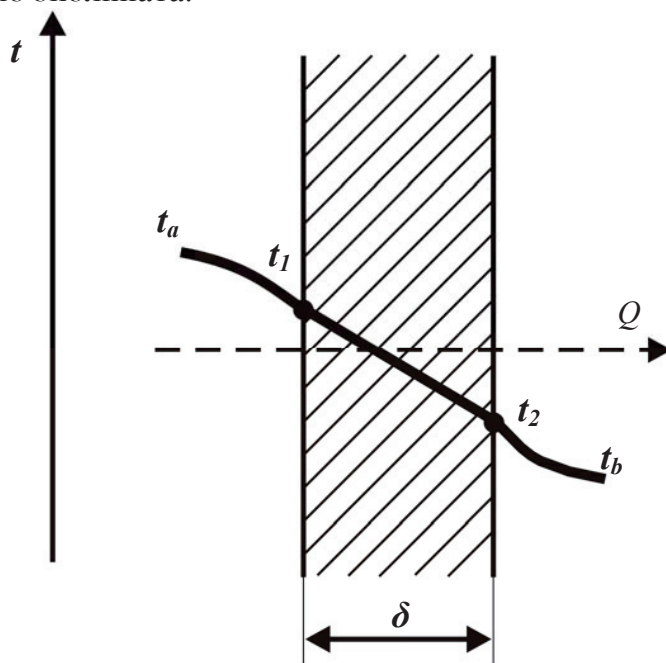
За повеќеслоен цилиндричен сид, изнесува:

$$\Phi = l \frac{t_a - t_b}{\frac{1}{d_1 \pi \alpha_a} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n} + \frac{1}{d_{n+1} \pi \alpha_b}} = l \frac{t_a - t_b}{\frac{1}{K}}$$

6.5 ПРЕНОС НА ТОПЛИНА СО КОНДУКЦИЈА

Спроведување на топлината (кондукција) се појавува кај хомогени непроводни тврди тела, а се врши со предавање на топлината од едни честици на други, без ниедно видливо поместување. Исто такво спроведување се појавува и кај хомогени, провидни тврди тела, како на пример кај стаклото и кварцот, со забелашка дека кај нив дел од топлината се спроведува и со зрачење. Според молекуларно-кинетичката теорија овој начин на спроведување на топлина се врши со судирање, односно меѓусебно дејство на молекулите во телото. Брзината на движењето на молекулите во секое тело е функција од температурата. Молекулите во потоплиот дел на телото имаат поголема брзина, и при судирите им се намалува брзината, односно им се намалува температурата, за чија сметка побавните (поладни) молекули добиваат поголема брзина, односно им расте температурата. Овој процес на судирање на молекулите води кон изедначување на нивните температури. Така се објаснува спроведувањето на топлината од потоплиот дел на телото кон поладниот, без видливи поместувања на честиците.

Да разгледаме еден рамен сид со дебелина δ (сл.6.6). Температурата што владее од едната страна на околината е t_a , а на самиот сид од истата страна е t_1 . Од другата страна на сидот има температура t_2 , а околината t_b , при што е $t_1 > t_2$. Како што објаснивме претходно, потоплите молекули во сидот со судирање со поладните им ја предаваат својата енергија (топлина), а овие на соседните, така што ако имаме непресушен извор на топлина, ќе имаме постојано **спроведување на топлина** од левата на десната страна на сидот, односно околината.



Слика 6.6 Спроведување на топлината со кондукција

Според експерименталниот закон на Фурие, низ ѕидот во единица време (сл.6.6) ќе преминува топлина - топлотен проток (топлотна моќност

$$\Phi = \frac{Q}{\tau} \left[\frac{J}{s} = W \right]:$$

$$\Phi = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} \cdot A \quad [W]$$

каде:

λ [W/mK] – коефициент на кондуктивна топлотна спроводливост на материјалот од кој е направен ѕидот (види табела бр.1);

$(t_1 - t_2)$ - температурна разлика меѓу надворешните површини на ѕидот;

δ [m] - дебелина на ѕидот;

A [m²] - површина на ѕидот низ која преминува топлината, земена нормално на насоката на преминувањето на топлината.

Табела 6.1 Големини на коефициентите на топлотна спроводливост (λ) за различни материји [W/mK] (при 20°C)

Материја	λ [W/mK]
сребро	417
бакар (во трговијата)	372
алуминиум	229
цинк	113
калај	65
месинг	112
бронза	42
железо, ковано	58
челик (0,2 C)	45
олово	35
бетон (1500 kg/m ³)	0,58
сува тула	0,38 ÷ 0,52
шуплива тула	0,23 ÷ 0,35
шамотна тула, од внатре	0,70
шамотна тула, од надвор	0,87
котелски камен	~ 1,18
стакло	0,81 ÷ 0,93
дрво, со нормални влакненца на спроведувањето	0,13 ÷ 0,21
дрво, со паралелни влакненца на спроведувањето	0,26 ÷ 0,37
хартија	0,14
азбест, влакна	0,15
азбест, волна	0,06 ÷ 0,20
стаклена волна	~ 0,038
минерална волна	0,035
плута, плоча	~ 0,052
дрвена пилевина	0,064
масло, мазиво	0,13
вода	0,58
воздух, кој мирува	0,023

Од изразот се гледа дека зависноста на топлотниот проток, што преминува низ ѕидот, е правопрпорционална со коефициентот на топлотно спроведување λ , температурната разлика $(t_1 - t_2)$, и површината на ѕидот A , а обратнопрпорционална со дебелината δ . Веднаш треба да се нагласи дека единствено λ е зависна од видот на материјата од која е произведен ѕидот.

Големината на коефициентот на топлотна спроводливост λ зависи од видот на материјата, температурата, притисокот, влажноста и структурата. Тој е дефиниран како количина топлина која за единица време преминува низ слој од материја со дебелина од 1m нормално на неговата површина од 1[m²] при температурна разлика помеѓу двете површини во стационарна состојба од 1 [K].

Во табелата 6.1 се дадени големините на коефициентите на топлотна спроводливост за различни материи. Од табелата се гледа дека металите добро ја спроведуваат топлината. Најдобри спроводници на топлината се: среброт, бакарот, месингот, железото итн. Како лоши спроводници на топлината се јавуваат стаклената волна, азбестот, дрвената пилевина, односно шупливи материи со ситни шуплини исполнети со воздух, при што воздухот при мирување е најлош спроводник на топлината ($\lambda_{\text{воздух}} = 0,0023$ [W/mK], во споредба со $\lambda_{\text{сребро}} = 417$ [W/mK]). Лошите спроводници на топлина уште се нарекуваат топлотни изолатори. Течностите во мирување, како воздухот, исто така се топлотни изолатори. Доколку пак им се овозможи циркулација, тие се јавуваат како релативно добри спроводници на топлина.

Топлотните изолатори наоѓаат голема примена во топлотехниката. Секој производствен процес во кој се искористува топлотната енергија е незамислив без примена на топлотни изолатори. Со нив се овозможува смалување на загубите на енергијата, поголема ефикасност на процесите, како и постигнување на подобри услови за работа. Затоа се јавува потреба од соодветно точно избирање на видот на топлотната изолација, како и точно пресметување на нејзините димензии.

6.6 ПРЕНОС НА ТОПЛИНАТА СО КОНДУКЦИЈА НИЗ РАМЕН И ПОВЕЌЕСЛОЕН СИД

Во практиката се среќаваме со спроведување на топлината на еднослоен или повеќеслоен рамен ѕид.

При разгледувањето на примерот на спроведувањето на топлината на сл.б.6 каде имаме еднослоен рамен ѕид топлотниот проток што преминуваше низ ѕидот беше:

$$\Phi = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} \cdot A \quad [W]$$

Во случајов температурната разлика $(t_1 - t_2)$ се јавува како главен иницијатор за спроведување на топлината, додека големината

$$\frac{\delta}{\lambda \cdot A} = R$$

се противставува на предавањето на топлината и се нарекува топлотен отпор.

Според тоа топлотниот проток што се спроведува може да се изрази и вака:

$$\Phi = \frac{t_1 - t_2}{R}$$

Топлотниот проток што се спроведува низ 1m^2 на ѕидот изнесува:

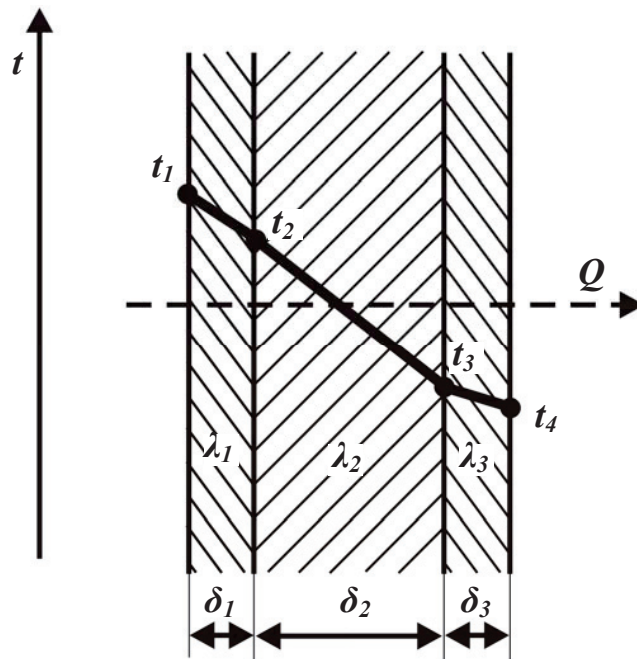
$$q = \frac{\Phi}{A} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda}}$$

а односот δ / λ се нарекува специфичен топлотен отпор.

Да разгледаме спроведување на топлината низ трислоен ѕид (сл.6.7). Топлотниот проток Φ со спроведување поминува прво низ слојот со δ_1 и λ_1 при температурна разлика $(t_1 - t_2)$, потоа низ слојот со δ_2 и λ_2 итн. совладувајќи ги топлотните отпори на слоевите.

Вкупниот отпор што треба да го совлада топлотниот проток ќе биде:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{\delta_1}{\lambda_1 \cdot A} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 \cdot A} + \frac{\delta_3}{\lambda_3 \cdot A} = \frac{1}{A} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)$$



Слика 6.7 Спроведување на топлината со кондукција низ трислоен рамен ѕид

Топлотниот проток ќе биде:

$$\Phi = \frac{t_1 - t_4}{R} = \frac{t_1 - t_4}{\frac{1}{A} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)} = A \frac{t_1 - t_4}{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)}$$

или за n - слоја:

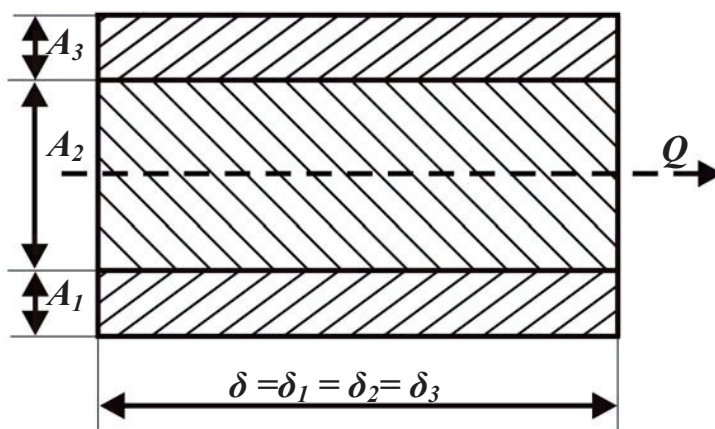
$$R = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}$$

$$\Phi = A \frac{t_1 - t_n}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$$

или за 1m^2 :

$$q = \frac{t_1 - t_n}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$$

Честопати во практиката се среќаваме со повеќеслојни ѕидови нормално (сл.6.7) или надолжно поставени во насоката на спроведувањето на топлината (сл.6.8), како на пр:



Слика 6.8 Спроведување на топлината со кондукција низ надолжно поставен трислоен рамен ѕид

Спроведувањето на топлината низ ѕид според сл.6.8 се разликува од претходното, и во овој случај вкупниот топлотен отпор ќе биде:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

бидејќи:

$$R_1 = \frac{\delta_1}{A_1 \cdot \lambda_1}; R_2 = \frac{\delta_2}{A_2 \cdot \lambda_2}; R_3 = \frac{\delta_3}{A_3 \cdot \lambda_3},$$

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta$$

тогаш:

$$R = \frac{1}{\frac{A_1 \cdot \lambda_1}{\delta_1} + \frac{A_2 \cdot \lambda_2}{\delta_2} + \frac{A_3 \cdot \lambda_3}{\delta_3}} = \frac{\delta}{A_1 \cdot \lambda_1 + A_2 \cdot \lambda_2 + A_3 \cdot \lambda_3}$$

6.7 ПРЕНОС НА ТОПЛИНАТА СО КОНДУКЦИЈА НИЗ ЕДНОСЛОЕН И ПОВЕЌЕСЛОЕН ЦИЛИНДРИЧЕН СИД

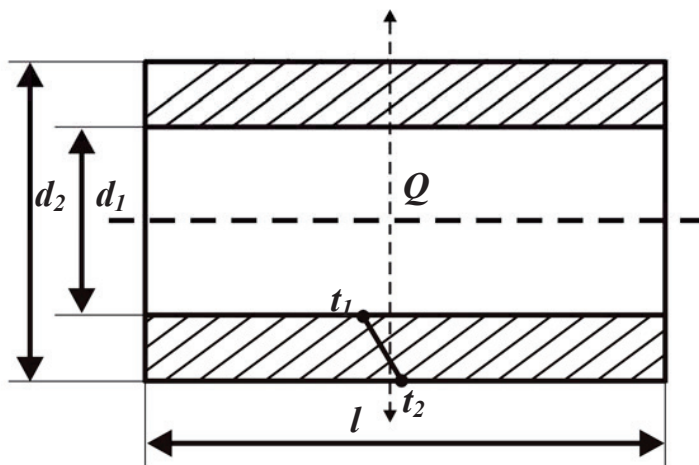
Во топлотехниката честопати се среќаваме со спроведување на топлината низ цилиндрични површини, како што се цевките, тапаните и сл, кои можат да бидат од еден или повеќе слоеви.

Да разгледаме спроведување топлина низ сидот на една цевка (сл.6.9). Во принцип тоа не се разликува од спроведувањето низ рамен сид. Разликата се јавува поради нееднаквоста на површината на внатрешниот со површината на надворешниот сид на цевката. Значи, при совладување на отпорот кога се спроведува од внатре кон надвор, топлината наидува на сè поголеми површини. Поради тоа падот на температурата ($t_1 - t_2$) е нелинеарен (крива линија). Топлотниот проток, што се спроведува низ сидот на цевка со должина l (сл.6.9), изнесува:

$$\Phi = 2\pi l \lambda \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{d_2}{d_1}}$$

или:

$$\Phi = 2,721 l \lambda \frac{t_1 - t_2}{\log \frac{d_2}{d_1}}$$



Слика 6.9 Спроведување на топлината со кондукција низ еднослоен цилиндричен сид

Во овој случај топлотниот отпор ќе биде:

$$R = \frac{1}{2\pi l \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} \approx \frac{1}{2,721 l \lambda} \log \frac{d_2}{d_1}$$

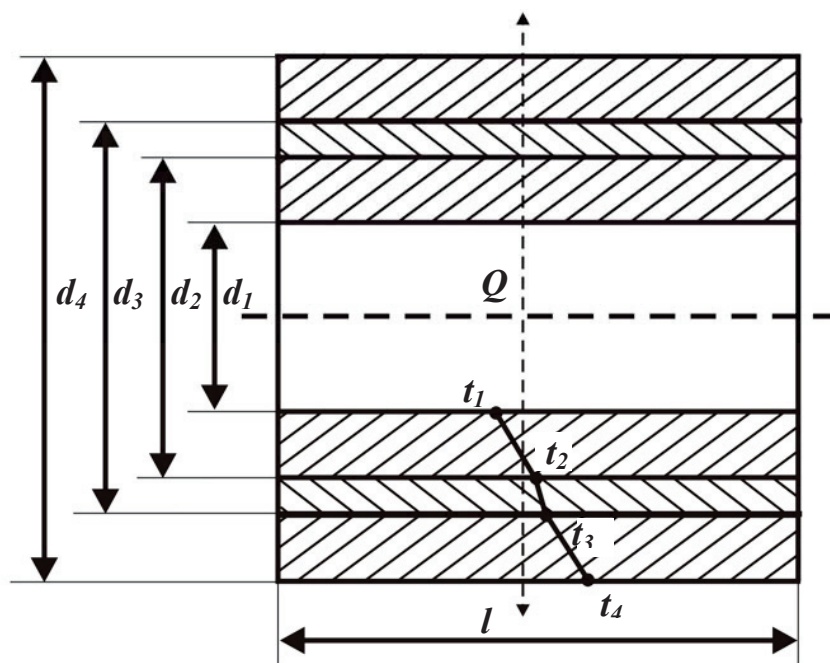
Овие равенки се земени како готови.

Да разгледаме спроведување на топлина низ трислоен ѕид на цевка (сл.6.10). Во овој случај топлината при спроведувањето низ повеќеслоен ѕид ќе најдува на следниов топлотен отпор:

$$R = \frac{1}{2\pi l} \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3} \right)$$

или n - слоен ѕид на цевката:

$$R = \frac{1}{2\pi l} \left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n} \right)$$



Слика 6.10 Спроведување на топлина низ повеќеслоен цилиндричен ѕид

Тогаш топлотниот проток ќе биде:

$$\Phi = 2\pi l \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n}}$$

или:

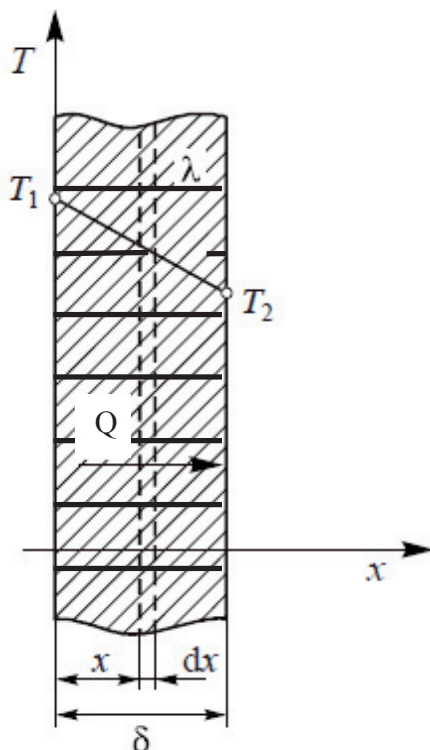
$$\Phi = 2,72l \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\lambda_1} \log \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \log \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \log \frac{d_{n+1}}{d_n}}$$

6.7 ПРЕНОС НА ТОПЛИНА НИЗ СИДОВИТЕ НА ПЕЧКИТЕ

Од искуство ни е познато дека топлината секогаш преминува од потоплите кон поладните тела сè додека не дојде до изедначување на температурите помеѓу овие две тела. Во техничката практика, а и во животот воопшто, се наметнува потребата оваа природна тенденција на преминот на топлина или да се потпомага или да се спречува.

Металите најдобро ја пренесуваат топлината. Кај нив топлината се пренесува главно со слободни електрони. Топлинската спроводливост на металите е речиси пропорционална со нивната електрична спроводливост. Ако во металите се наоѓаат некакви примеси, спроводливоста се намалува значително.

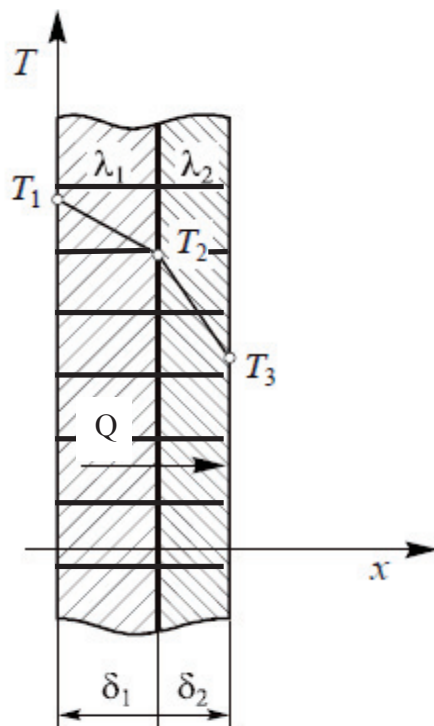
За другите цврсти материјали спроводливоста се должи повеќе на термичката активност на молекулите и атомите. Цврстите неметални супстанции имаат мала спроводливост, па служат како термоизолациони материјали, а пред сè за изградба на сидовите на печките.



Слика 6.11 Сид на печка

До пренос на топлина во принцип низ сидовите на печките доаѓа само тогаш кога во различни делови на овие печки владеат различни температури и преносот на топлина секогаш е од потоплите кон поладните делови на самите печки. За да се запознаеме со оваа проблематика подетално односно за да го објасниме подетално и поедноставно овој природен феномен може да го споменеме примерот со

сид од хомоген материјал (шамот тула) со константен напречен пресек δ . Температурата која е постигната во печката е T_1 . Другиот крај на сидот ќе има температура од T_2 .



Слика 6.12 Двослоен сид на печка

Во почетокот температурите се различни, но по извесно време ќе дојде до изедначување на температурите помеѓу овие два краја од сидот којшто е споен челно. Во зависност од тоа од какви сидови се состои самата печка, преносот на топлина низ сидовите на овие печки се дели на две групи и тоа:

- ❖ спроведување на топлина низ рамни сидови на печки и
- ❖ спроведување на топлина низ цилиндрични сидови на печки.

Во првата група на спроведување на топлина низ рамни сидови на печки од друга страна пак се дели на следниве две подгрупи :

- ❖ спроведување на топлина низ еднослојни сидови на печки и
- ❖ спроведување на топлина низ повеќеслојни рамни сидови на печки

На слика 6.11 ни е прикажано пренос на топлина низ еднослојни сидови на печки со рамни сидови, каде што ни е преставен рамен хомоген сид чии страни се со изотермни површини, со различни температури, постојани со времето. Како што се гледа на сликата и од кажаното до сега, топлината што се пренесува низ сидовите на печките оди од потоплиот кон поладниот дел сè додека не дојде изедначување на температурите помеѓу овие два дела односно површини.

На слика 6.12 преставено ни е спроведување на топлина низ двослојни рамни сидови на печки, преставено со два слоја δ_1 и δ_2 , од материјали со различни коефициенти на спроведување, а воедно и со

различна дебелина на сидовите. Тогаш при стационарна состојба во граничните површини на сидовите ќе се воспостават различни температури кои што ни се преставени на сликата.

Во втората група на спроведување на топлина низ цилиндрични сидови на печки спаѓаат следниве два вида:

- ❖ спроведување на топлина низ еднослојни цилиндрични сидови на печки и
- ❖ спроведување на топлина низ повеќеслојни цилиндрични сидови на печки.

Преносот на топлина се врши на истиов начин како и кај претходните видови само што овде имаме цилиндричен сид.

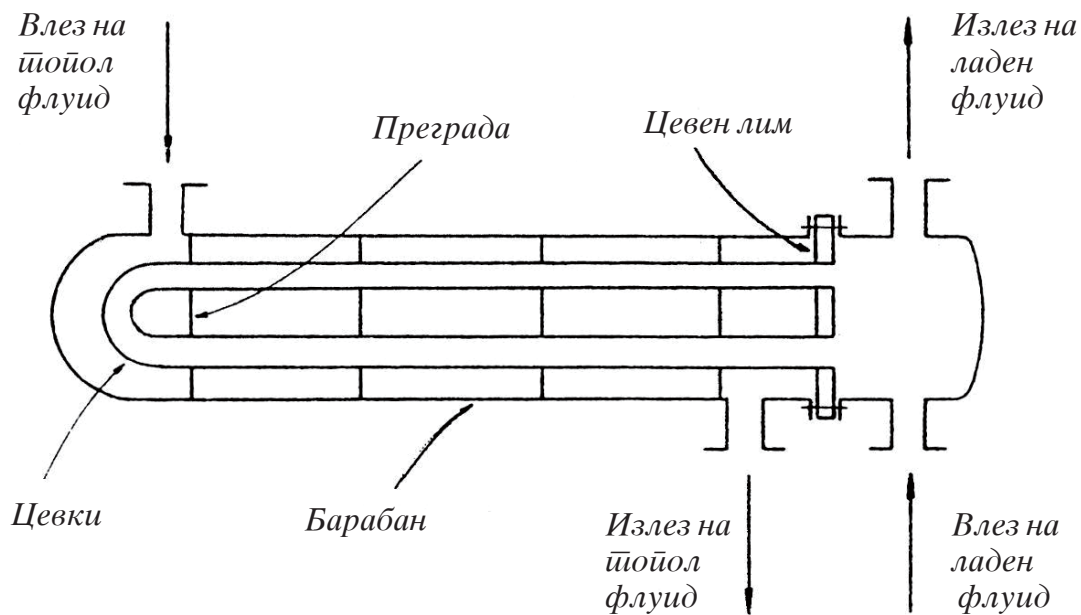
6.9 РЕКУПЕРАТОРИ

Кај овој тип на топлиноизменувачи се реализира континуиран пренос на топлина помеѓу флуидите. Претставници на рекуператорите се цевните топлиноизменувачи и плочестите топлиноизменувачи. Повеќе од вкупно изведените топлиноизменувачи се рекуператори.

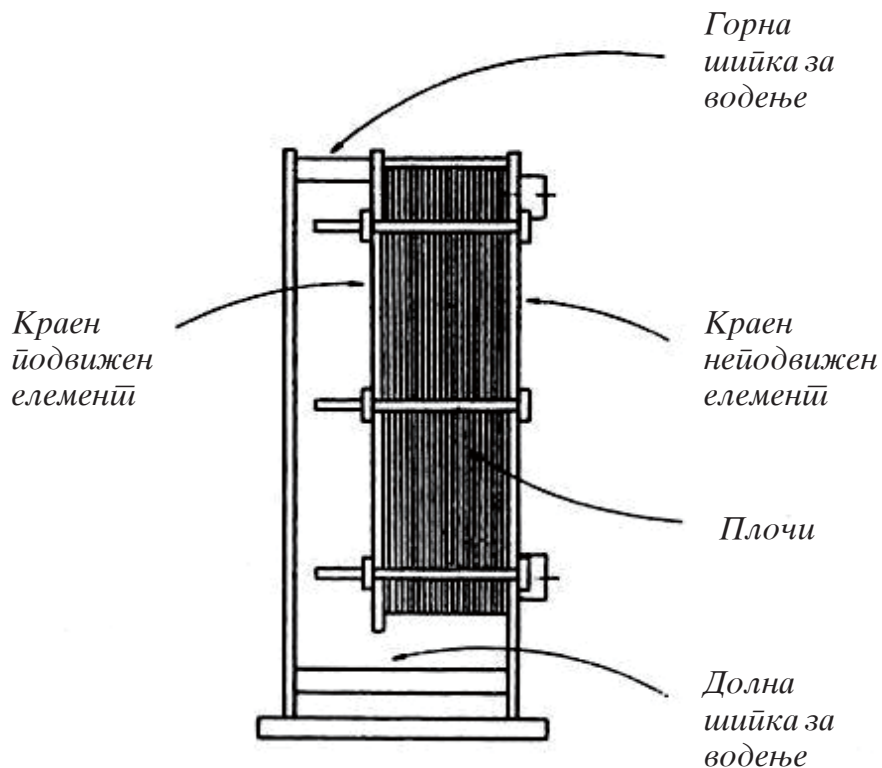
Цевните топлиноизменувачи се изработени од кружни цевки, а ретко и за посебни примени од елиптични и правоаголни цевки. Во нивните проектирања е можна голема еластичност бидејќи геометријата може да им се менува лесно со промена на дијаметарот, должината и поставеноста на цевките. Цевните топлоизменувачи може да се проектираат за висок притисок во однос на околината како и за висока притисна разлика помеѓу флуидите. Тие се употребуваат пред сè во системите течност-течност и течност-двофазен флуид (кондензација или испарување). Се користат и во системот гас-гас особено во оние случаи кога работната температура или притисокот се многу високи или кога чистењето е посебен проблем и не може да се примени друг тип на топлоизменувач. Овие топлоизменувачи може да се класифицираат како **барабанестоцевни, двојно цевни и спирални топлоизменувачи.**

Барабанестоцевниот топлоизменувач (слика 6.13) се изработува од цевки кои се аксијално поставени во барабанот. Едниот флуид струи внатре во цевките, а другиот минува попречно и долж цевките. Главни елементи на овој топлиноизменувач се цевките, барабанот, предната глава, задната глава, преградите и цевните лимови. Широка примена имаат како испарувачи, кондензатори, грејачи, ладилници во енергетските постројки, во инсталациите за кондиционирање, во ладилната техника и сл.

Двојноцевните топлоизменувачи се поставуваат концентрично. Флуидите струјат во внатрешната цевка и во прстенот помеѓу цевките. Конструкцијата е едноставна и дозволува лесно чистење. Оваа конструкција е исто така пожелна кога едниот или двата флуида се на висок притисок, бидејќи сместувањето во цевка со мал дијаметар е поевтино споредено со барабан од голем дијаметар. Двојноцевните топлиноизменувачи се користат за мали капацитети, каде целосната површина на преносот на топлина е до 50 m².



Слика 6.13 Барабанска-цевен топлоизменувач



Слика 6.14 Плочест топлоизменувач

Кај спиралните топлоизменувачи една или повеќе спирали се сместуваат во барабан. Виткањето овозможува во одреден простор да се

смести голема површина. Топлинското ширење не е проблем, но чистењето е скоро невозможно.

Кај **топлиноизменувачите од плочи** основен елемент на градбата им е тенка плоча која е рамна или има некоја набрана форма. Плочите се прават како рамни или свиткани во топлиноизменувачот. Општо кажано, овие топлиноизменувачи не поднесуваат висок притисок или температурна разлика, како цевните топлиноизменувачи. Може да се поделат на плочести, спирално плочести, ламелно плочести и калемно плочести топлиноизменувачи. Овде ќе го разгледаме само плочестиот топлиноизменувач (слика 6.14).

Паќет од правоаголни тенки метални плочи со отвори на аглите се монтира помеѓу горната и долната шипка за водење. Плочите се поставени вертикално и притегнати со странични држачи помеѓу фиксен краен елемент и подвижен краен елемент.

Секоја плоча е изработена со пресување од метален лим и претставува набрана површина. Кога група од плочи се поврзани заедно, каналите на соседните плочи оформуваат мали проточни водови. Растојанието помеѓу плочите е одредено со геометријата на печатените жлебови. Специјални вдлабнатини се предвидени околу отворите за протек и долж рабовите на плочите, во кои се монтираат затинки со карактеристична дебелина од 5 mm. Затинките имаат двојна улога: да го спречат истекувањето од топлиноизменувачот и да ги упатат флуидите во саканата насока.

Кога плочите се соединети, низ отворите се создаваат протечни водови за двата флуида. Влезниот и излезниот приклучок за флуидите, предвидени на крајните елементи, се вклопуваат со отворотите на топлиноизменувачот и со надворешните приклучни цевководи. Флуидот влегува во аголот од едниот краен елемент и минува низ сериски или паралелно поврзани премини. Во една група од канали затинката не го опфаќа влезниот дел помеѓу две плочи, флуидот влегува низ тој дел, струи помеѓу плочите и излегува на другиот крај. Секоја плоча има затинка само на едната страна и тие навлегуваат во жлебовите на задната страна од соседната плоча. Најчесто се изведуваат со едноминувачко спротивно струење преку сите влезови и излези кои се вклучени за фиксираниот краен елемент. Со блокирање на текот низ некои отвори и со комбинирање на поставеноста на затинките, може да се спроведе повеќе од едно минување.

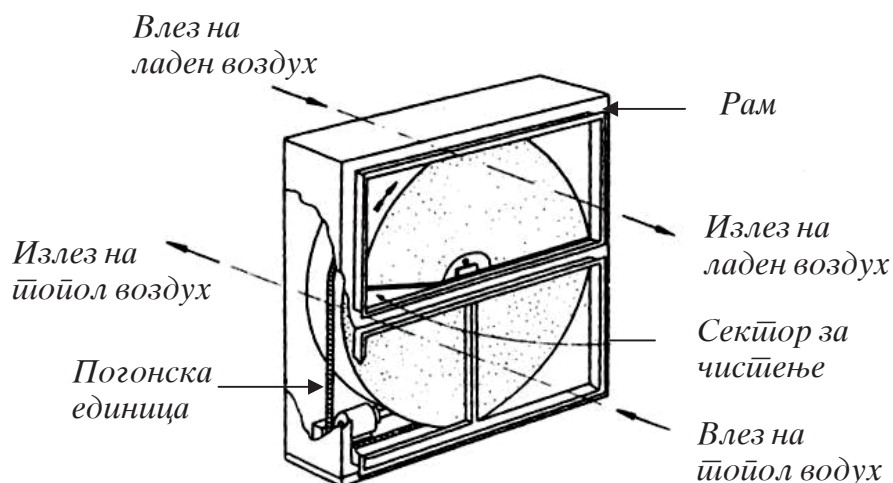
Во една рамка може да се сместат и повеќе топлиноизменувачи. Површината на преносот на топлина по единица волумен за плочестите топлиноизменувачи се наоѓа помеѓу 100 и 660 m²/m³. Плочестите топлиноизменувачи се применуваат за максимален притисок од околу 2500000 Pa. Издржливоста на материјалот на затинките ја ограничува работната температура на 300°C, но обично таа е под 150°C, за да се избегне употреба на скапи затинки.

Плочестите топлиноизменувачи широко се употребувани во индустриите за млеко, пијалоци, храна, лекарства, гума, хартија и сл. Тие се користат и како грејачи, ладилници, кондензатори во многу индустриски постројки.

6.10 РЕГЕНЕРАТОРИ

Второто име на регенераторите е “акумулациони топлино-изменувачи”. Преносот на топлина се одвива со прекини, наизменично. Просторот со способност за акумулација на топлина прво се полни со топлиот флуид и се загрева, а потоа се полни со ладниот флуид кој прима дел од акумулираната топлина. Вообичаено е и двата флуиди да бидат во гасна состојба. Се изработуваат како регенеративни топлиноизменувачи со ротациона матрица и како регенеративни топлиноизменувачи со неподвижна матрица.

Во ротационите регенератори дел од подвижната матрица континуирано се наоѓа во топлиот флуиден тек, а дел во ладниот (види слика 6.15).



Слика 6.15 Регенеративен топлиноизменувач со подвижна матрица

Регенеративниот топлиноизменувач се состои од рам (со или без сектор за чистење), приклучоци за канали, ротор (хидроскопен или обичен) и погонска единица.

Секторот за чистење спречува да се внесе отпаден воздух во зоната на свежиот воздух. Во него роторот се чисти со дување, а неговата големина обично е прилагодлива во опсегот од 0 до 6 степени.

Хидроскопен ротор се вградува кога треба да се одземе и влагата од струјниот тек.

Погонската единица содржи електромотор и синџир за движење на роторот. Типични брзини на вртење се од 0 до 10 вртежи во минута.

Кај регенераторите со неподвижна матрица топлиот и ладниот флуид се насочувани со употреба на вентили.

Како модификација на регенераторите со неподвижна матрица се користи регенератор во којшто насочувањето на гасовите се врши преку подвижни распределители.

За акумулационите топлиноизменувачи секогаш се применува термодинамички поповолното противнасочно струење на флуидите. Со зголемување на брзината на вртењето, односно со зголемувањето на фреквенцијата на пренасочувањето, термичките перформанси на регенераторот се доближуваат до оние на чисто противструјните

топлиноизменувачи. За некои специјални примени има изведби и со паралелно струење на флуидите.

Пред ротационите регенератори се поставуваат две задачи за решавање: оневозможување на мешањето на двата флуида и користење на подвижни делови.

Регенераторите имаат многу поголема густина на преносната површина m^2/m^3 , во однос на рекуператорите. Во зависност од примената се изработуваат од метали, керамика, пластика или хартија.

Поради компактоста и противструјната изведба, регенеративните топлиноизменувачи се изведуваат како гас-гас топлиноизменувачи и се со висока ефективност која надминува 85%.

Може да се вградуваат во хоризонтална или вертикална положба, а типичните капацитети им се движат до околу $80000 m^3/h$.

Контролни прашања:

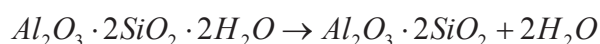
1. Кога се јавува пренесување на топлина со струење (конвекција)?
2. Од што зависи коефициентот на пренос на топлина α при конвекцијата?
3. Како се пресметува коефициентот K при преминувањето на топлина низ прослоен ѕид?
4. Кога се јавува спроведувањето на топлина со кондукција?
5. Што претставуваат рекуператорите?
6. Које е второто име на регенераторите?

7. ОГНООТПОРНИ МАТЕРИЈАЛИ

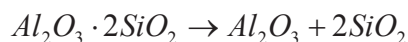
7.1 СУРОВИНИ ЗА ИЗРАБОТКА НА ОГНООТПОРНИ МАТЕРИЈАЛИ

Глината по хемиски состав е хидросиликат на алуминиумот и многу е распространета во природата во фино распределен облик. Таа во влажна состојба е пластична, додека исушена е кршлива, а печена на доволно високи температури е стаклеста. Се мисли дека глината настанала со природно разлагање (со дејство на атмосферата) на фелдспатските карпи и според тоа е од седиментно потекло. Обичните видови на глина содржат големи количини на вода, а и други примеси, кои можат до толку да се изменат во составот стануваат неупотребливи за изработка на огноотпорни материјали. Како примеси во глината се јавуваат алкалиите (од нераспаднатиот фелдспат), SiO_2 и TiO_2 , потоа соединенијата на железото, калциум и магнезиум, а и органски материи од различно потекло. Алкалиите, соединенијата на железото, калциумот и магнезиумот, како и извесните количини на силициумдиоксидот, негативно влијаат на огноотпорните карактеристики на глината, т.е. ја намалуваат нејзината температура на омекнување.

Како суровина за производство се користи глината и каолинот кој содржи повеќе од 30% Al_2O_3 и имаат поголема огноотпорност (температура на омекнување од 1580°C). Природната глина е пластична и со додавање на вода лесно се обликува. Основен составен дел во глината и каолинот е каолинитот ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). При загревањето на глината доаѓа до следниве промени: најпрво на 450 до 500° од каолинитот се формира метакаолин на основа на ендотермна реакција:



Потоа на 930 до 960°C метакаолинот се разложува на слободни оксиди:



и конечно на 1200 до 1300°C се образува мулит на основа на егзотермна реакција:



Образуваниот мулит е главната компонента на огноотпорните материјали на база на глина. Чистиот мулит содржи 71,8% Al_2O_3 и 28,2% SiO_2 и има температура на топење 1810°C.

Современото производство на огноотпорни материјали на база на глина се базира на долгогодишно проучување на оваа суровина, што подеднакво важи и за суровините од кои се изработуваат огноотпорните материјали од останатите групи. Резултатите од истражувањата, кои и денес се прават со ненамален интерес, овозможуваат квалитетот на огноотпорните материјали значително да се подобри и бројот на видовите да се зголеми.

Природните **кварцни** карпи биле едни од најрано употребувани видови на огноотпорни материјали, а се користеле со груб делкан облик. Меѓутоа, вообичаена суровина за изработка на огноотпорни материјали од оваа група (чија основа е кварц) е кварцит, цементен или кристалиничен, кој содржи 95% SiO_2 . Цементниот кварцит се состои од заоблени кварцни зрна кои се поврзани со базалтен цемент. Овој цемент обично се состои од зрна на секундарен кварц во криптокристаличен облик, во извесни случаи може тоа да биде калцедон или опал. Количината на цемент секогаш изнесува под 15%, така што промената при печење брзо се завршува со незначително зголемување на волуменот. Тулите произведени од цементен кварцит имаат поголема специфична тежина и по квалитет се подобри од тулите на база на кристалиничен кварцит. Во кварцитот, кој е погоден за изработка на тули, количината на примесите треба да е што помала: максимално 0,5 до 0,8% CaO , 1% Fe_2O_3 , 0,7 до 1% Al_2O_3 .

Кварцот (SiO_2) има повеќе полиморфни модификации кои се случуваат при загревање и со значителни волуменски промени, што е важно за праксата. Основните модификации се: кварц, тридимит и кристобалит. Во природата се јавува бета-кварц кој на повисоки температури може да се преведе во тридимит или кристобалит. Преобразувањето на бета во алфа-кварц се случува со зголемување на волуменот (+0,82%), додека, спротивно на тоа, алфа во бета (при ладење) се одигрува со незначително намалување на волуменот, т.е. 10 пати помалку. Преобразувањето на алфа-кварцот во алфа-тридимитот или алфа-кристобалитот се одвива многу бавно и често дури со помош на минерализатор. Овие полиморфни промени се поврзани со значителни промени на волуменот (алфа-кварц во алфа-тридимит +16,0%, алфа-кварц во алфа-кристобалит +15,4%).

Како суровина за изработка на групата на огноотпорни материјали, чија основа се **карбонати**, се користат природните минерали магнезит (магнезиумкарбонат) и доломит (калциум-магнезиумкарбонат), кои може да содржат во различни односи карбонатот на калциумот и магнезиумот, но за металуршки потреби се користи само доломитот со приближно еквивалентни количини на калциум и магнезиум. Се разбира, во овие суровини присутни се и мали количини на други примеси кои многу влијаат на огноотпорните особини на готовите производи.

Покрај споменатите суровини, во обѕир доаѓа уште и минералот бруцит ($Mg(OH)_2$) како и низа на магнезиумови соединенија, од кои со хемиска обработка се добива MgO .

Минералот **форстерит** припаѓа на форстеритната група на огноотпорни материјали која е некоја преодна група помеѓу карбонатната и

кварцната група на огноотпорни материјали, и е магнезиумортосиликат (Mg_2SiO_4 , односно $2MgO \cdot SiO_2$), кој, ако е чист, содржи 52,7% MgO и 43,8% SiO₂, а има температура на топење на 1910°C. Природни суровини кои доаѓаат во обзир за производство на огноотпорни материјали од овој вид се: природен фостерит, оливин, дунит и серпентин.

Од суровини за изработка на огноотпорни материјали од спинелидната група на огноотпорни материјали се користат таканаречените **спинели**, т.е. минерали од типот $AO \cdot R_2O_3$, во кои A значи било кој двовалентен катјон (обично берилиум, магнезиум, калциум, бариум, железо итн.), додека R е некој тровалентен катјон (обично алуминиум, хром и железо).

Од суровини за изработка на огноотпорните материјали, чија основа е **јаглерод**, се користи природниот и вештачкиот графит, разни видови јаглени, кокс, катран и смола (специјален катран) и дрвен јаглен.

7.2 ПОСТАПКИ ЗА ИЗРАБОТКА НА ОГНООТПОРНИ МАТЕРИЈАЛИ

Луѓето многу одамна, кога користеле оган, упоотребувале по некој огноотпорен материјал во оганот. Археолошките истражувања покажуваат дека во стариот Египет и во Асирија веќе била позната изработката на глинени тули, што сведочи дека тогаш била развиена занаетчиската вештина за изработка на огноотпорни материјали. Но, металурзите од тоа време граделе печки од оној материјал кој им бил при рака. Огноотпорните тули почнале да се изработуваат на индустриска основа дури во XX век. Но нивниот квалитет значително се унапредил особено по 1925 година. Од тогаш, за тоа релативно кратко време, се подобрува не само начинот на изработка, туку се пронајдени и нови суровини и такви огноотпорни материјали кои порано не се познати.

7.2.1 ПРИПРЕМА НА СУРОВИНАТА

Копането на суровината е првата фаза за изработка на огноотпорни материјали. Тоа се врши со рударски методи, кои претежно зависат од локацијата на наоѓалиштето. Суровините обично се вадат со подземно копање, но понекогаш и со методи кои се еднакви на вадењето на камен.

По оваа прва фаза на работа претежно мора да се примени, како посебна фаза на работа, **подготовка на суровината**, која опфаќа: перење на суровината, мокро или суво сепарирање, обогатување или пржење (доколку тоа е потребно итн.) Следниот степен на работа опфаќа **дробење со решетаче**, како и **мелење со просејување** на суровината. Овие операции многу се важни, бидејќи од квалитетот на нивното изведување зависи густината на огноотпорниот материјал, при што треба да се напомене дека **густината** е една од најважните поединечни особини на сите видови огноотпорни материјали. Од густината зависи бројот на останатите за праксата важни особини на огноотпорните материјали, на пример: цврстината, волуменската стабилност, топлотниот капацитет итн.

Најважна пак операција со помош на која се постигнува поголема густина на огноотпорниот материјал е **контрола на зрновитоста на мешавината**, т.е. **гранулометарскиот состав**. Денес се произведуваат различни видови на огноотпорни материјали со големи густини, кои се постигнуваат така што од суровината внимателно се издвојуваат само одредени големини на зрна, кои подоцна меѓусебно се мешат во точно одредени односи. Се открило дека материјалот со најголема густина се добива ако за мешавина се користи приближно бинарен систем од многу груби и многу фини зрна во однос 55:45%, додека суровина со средна големина на зрна веќе и не се користи. При таков начин на работа крупните зрна се вклопени во ситните, како во некоја цементна основа. Финоста на мелење и дробење, како и употребата на поедини големини на зрна во мешавината мора експериментално да се одреди за секој вид на суровина и мешавина, исто така и за секој вид на уред во кој смесата подоцна ќе се преработува. Со други зборови, одбирањето на најпогодна зрновитост исклучиво е работа на искусен поединец на претпријатието.

Следна фаза е **мешање на суровината**. Во принцип оваа операција опфаќа:

- ❖ додавање на фин материјал во грубиот од истиот вид, за да се добие бараниот однос на крупни и ситни зрна во мешавината и
- ❖ додавање на еден вид на материјал во друг, на пример: вар во кварцитот, пластична во кршлива глина, претходно пржен кристаличен материјал во пластичен, магнезит во оливин и тн., за да се промени составот и карактерот на тулата.

Меѓутоа, главна цел на мешањето е што кршливите компоненти се обвиваат со пластични или со некои други врзивни материјали, за да во идната фаза се преработат, т.е. при **обликувањето** мешавината да се однесува пластично, односно за да се поврзат сите честички во маса со минимум шуплини. Во таа смисла се извршени и реконструкции на поединечни уреди за мешање, особено на оние кои го преработуваат материјалот во кој процентуалниот состав на пластичен материјал е мал (суво пресување).

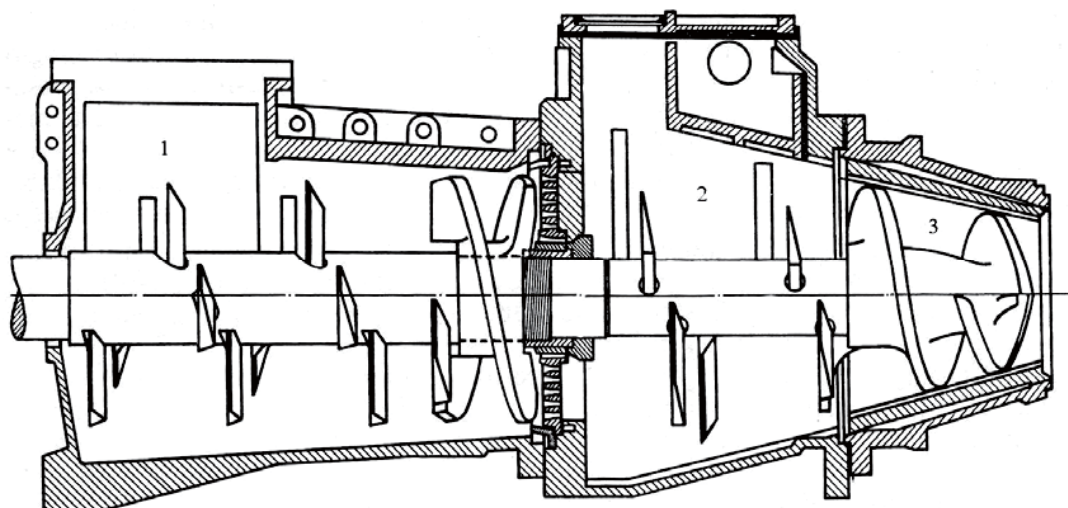
7.2.2 ПРОЦЕСИ НА ОБЛИКУВАЊЕ

Работите во врска со обликувањето главно се исти за сите видови на огноотпорни тули, т.е. тие можат да се изведат на три принципиелно различни начини, а се добиваат печени, непечени или лиени тули.

Порано **печените тули** се изработувани исклучиво **рочно**. Влажната мешавина се набивала во калапите наредени на даски. Потоа калапите се отстранувале, а суровите тули на даската се оставале на топло место за да подеднакво излезе влагата. Потоа тулите се пресувале во конечен облик, се ределе во печка и се печеле. Но, по 1913 година поголем дел на тулите се изработувал со помош на **машина**, т.е. влажната смеса на суровината се истиснувала низ отвор со одреден профил со помош на клип или полжав, а истиснатата маса се сечела со затегнати жици на парчиња со одредена должина. Потоа овие парчиња се оставале да лежат извесно време и дури потоа се пресувале во конечен облик, се сушеле и печеле во печка.

При последното обликување, т.е. при пресувањето, често ќе се случело ваздухот во шуплините на материјалот, поради наглото збивање, и

дополнителното попуштање на притисокот, да се распореди во масата така што го предизвикува таканареченото “**листење на тулата**”. За да се избегне тоа, почнал да се користи вакуум. Обликување на тулата со примена на вакуум ја прикажува познатата машина по Чемберс (види слика 7.1). Влажната и иситнета маса добро се изработува во мешалката, потоа се уфрла во Чемберсовата машина, каде што уште се иситнува со ножевите, добро се меси и конечно се истиснува низ отворот кој го има профилот на тулата. Резултатот на таквиот начин на работа е поголема густина на тулата, а појавата на листање, која порано била типична грешка при изработка на тулата, скоро е исклучена.



Слика 7.1 Пресек на Чемберсова машина
1-влез на глинаџа и дел на аџараџоџи џод обичен џриџисок, 2-дел на аџараџоџи џод вакуум, 3-џолжав за исџиснување на смесаџа

Проблемот на листање се пробало да се реши и на друг начин, т.е со примена на зголемен притисок при обликувањето. Но и со него не се постигнало она што се барало. Дури кога, покрај зголемениот притисок при обликувањето, почнал да се **извлекува и воздухот со помош на вакуум** за време на пресувањето (било низ специјални вентили кои се изработувале на страните на калапот, било низ перфорирани или порозни плочи на дното или врвот на калапот), добиени се тули со одличен квалитет и поевтини од оние изработени од влажна маса.

Обликувањето на големи специјални облици, кои не се погодни за машинско пресување, се подобрило со употреба на **пневматски алатки** за збивање на масата и за истиснување на воздухот. На тој начин денес можат да се изработат облици со многу голема густина и изедначеност, кои по квалитет не заостануваат зад тулите изработени во најјаките преси.

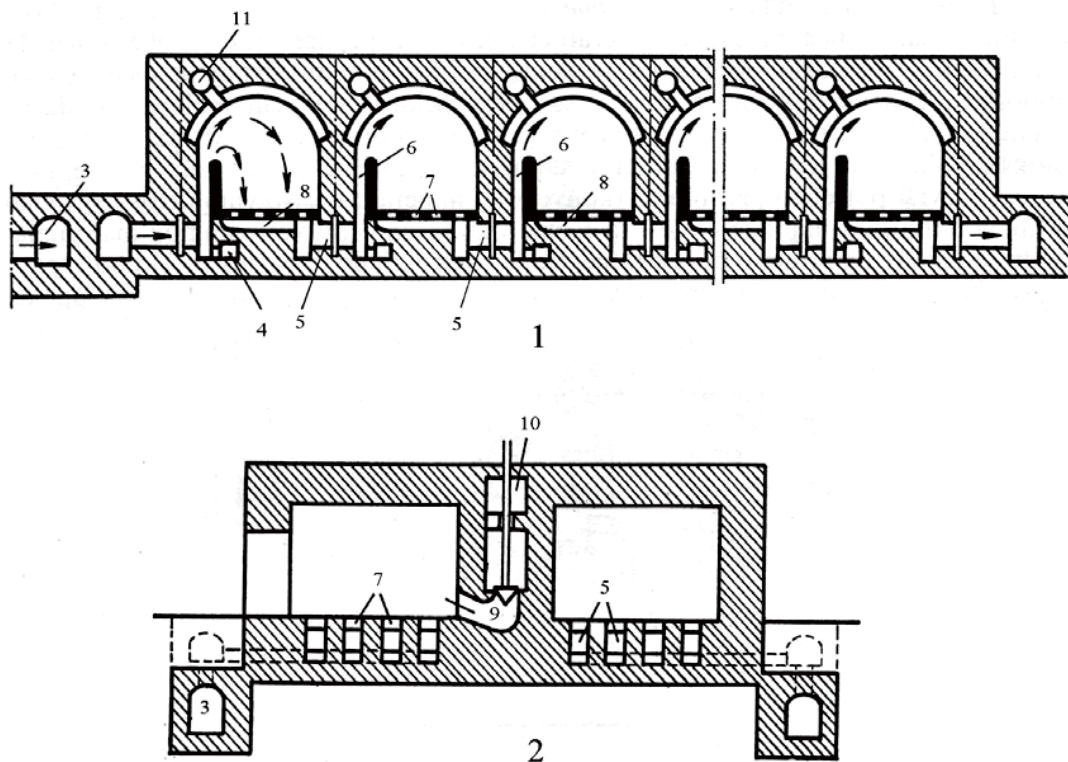
Посебна фаза претставува **процесот на сушење**, првенствено при изработка на тули од влажни смеси. Значи, за да може смесата добро да се обликува, таа мора да содржи и до 15% влага, која може да предизвика деформации и прскање во тулите, ако невнимателно не се исушат. Поради тоа уредите за сушење со време се реконструирани така што од масата од сите страни подеднакво се извлекува влагата, со што се намалуваат внатрешните напрегања, односно деформации. Тулите се сушат на зголемени температури (никогаш над 90°C) и до неколку месеци, што

зависи од влажноста и големината на тулите, потоа од температурата и начинот на сушење итн.

Последната фаза на работата е **печењето на тулата**. Оваа операција мора внимателно да се изведе, бидејќи многу влијае на особините и квалитетот на тулата; на пример, некои тули можат да го променат својот хемиски состав ако се печат, да речеме, во редуктивна или оксидативна атмосфера. Воопштено може да се каже дека тулите се печат од следниве причини:

- ❖ да се извади сета влага;
- ❖ да се извршат бараните хемиски промени, на пример да се отстрани јаглерод-диоксидот, да согорат органските супстанции итн.;
- ❖ да се изврши потребно преобразување (конверзија) на минералните составни делови на суровината во таков облик кој најдобро одговара со обзир на намената на огноотпорните материјали;
- ❖ да се постигне потребно поврзување, т.е. делумно да се образува стакло од разни врзиви средства кои се додадени во мешавината со намера трајно да се стабилизира обликот на тулата.

Тулите во зависност од видот на суровината се печат на различна температура со помош на гасно ложење и тоа на два начина: било **континуирано во тунелски печки**, било периодично во **коморни печки по Мендхајм** (види слика 7.2).



Слика 7.2 Печка со комора по Мендхајм
1-надолжен, 2-најречен пресек

Во принцип, тунелската печка работи многу едноставно. Сировиот материјал влегува од едната страна во печката и се предгрева на сметка на топлината на излезните гасови, додека печениот материјал излегува на

спротивната страна на печката и го грее воздухот кој е потребен за согорување на гасот.

Печката по Мендхајм е некој вид кружна печка која со преградни сидови е поделена на повеќе посебни комори. Обично 8 до 24 такви комори се градат паралелно во два реда и тие сочинуваат една батерија. Печката се ложи со генераторски гас, или некој друг гас за ложење, кој се доведува низ главниот доведен канал кој е положен околу печката (3). Од овој канал гасот може да се воведо во секоја поединечна комора низ споредните канали (4), кои можат да се затворат. При работа на печката само една комора се загрева со согорување на гасот кој се ложи, додека следните две до три комори се загреваат со врелите согорени гасови, кои влегуваат низ посебни канали (5). Гасот кој се ложи од главниот доведен канал (3) се воведува во комората преку каналот (4) и се крева низ просторот за согорување (6), каде што согорува со предгрејаниот воздух, кој доаѓа од соседната комора, т.е. од комората која претходно се загреала со согорување на гасот кој се ложи. Пламенот го загрева материјалот во печката, а согорените гасови се спуштаат низ комората и проаѓаат низ отворите на дното на комората (7), потоа се собираат во собирниот канал (8) и одат во следната комора, а од оваа во другата комора. Согорените гасови може да се одведат од секоја поединечна комора низ одводниот канал (9), кои исто така може да се затворат во оџакот (10). Кога материјалот е доволно печен во комората која се ложи, тогаш доводот на гасот се прекинува, т.е. се затвора каналот (4), а се отвора доводот на свеж воздух (11), кој го лади готовиот производ, а сам се предгрева пред влезот во следната комора, која сега се загрева со согорување на гасот кој се ложи.

Во поново време постојат разни обиди со цел да се забрза работата.

По завршувањето на процесот печење на огноотпорните предмети **полека се ладат** и потоа се пренесуваат во складиштето.

7.3 ПОДЕЛБА НА ОГНООТПОРНИТЕ МАТЕРИЈАЛИ

Огноотпорните материјали се делат на повеќе начини, но ниту еден од нив во потполност не задоволува. На пример, од **минералошко гледиште** огноотпорните материјали можат да се поделат или со обзир на основната суровина или со обзир на минералот кој преовладува во готовиот продукт. Најважни основни суровини за изработка на огноотпорни материјали се: кварц (SiO_2) кој има температура на топење $1728^{\circ}C$, потоа алуминиум-трихидратот (Al_2O_3) со температура на топење од $2050^{\circ}C$, калциумоксид (CaO) и магнезиумоксид (MgO) со температури на топење од 2570 и $2800^{\circ}C$, хромит ($FeO \cdot Cr_2O_3$) со температура на топење на $2250^{\circ}C$, циркониумдиоксид (ZrO_2) со температура на топење од $2715^{\circ}C$ и, да речеме, јаглерод кој сублимира на $3630^{\circ}C$. Но, огноотпорните материјали кои се користат во металургијата претежно се смеси, т.е. немаат температура на топење туку омекнуваат на некое температурно поле. Тие понекогаш се состојат од соединенија, но често содржат и примеси, кои лесно влијаат на разни особини на огноотпорноста на материјалот, особено на температурата на омекнување на материјалот, на големината на температурното поле на омекнување како и на начинот на омекнување.

Од **хемиско гледиште** огноотпорните материјали исто така се делат на кисели, базни, атмосферни и неутрални, односно според оксидот кој во нив преовладува. Според тоа јасно е дека киселиот огноотпорен материјал не може да се користи во допир со базната троска, бидејќи меѓусебно ќе реагираат, т.е. троската ќе го нагризе огноотпорниот материјал. При работа со базна троска, може да се користи како облога на апарати само базен огноотпорен материјал; или обратно, кисела облога на печките може да се користи само ако металуршкиот процес на топење се изведува со кисела троска. Исто правило важи и за случај кога огноотпорните материјали на високи температури доаѓаат во допир со чад, пара или прашина, кои исто така, според тоа што содржат, можат да бидат од кисел, базен или атмосферен карактер, но речиси никогаш од неутрален. Се разбира, сето ова важи само во принцип, бидејќи при работа во пракса, од различни причини многу често не можат да се почитуваат овие правила, туку се прават повеќе компромиси.

Според **начинот на употреба** односно **начинот на добивање** огноотпорните материјали може да се поделат на обликувани и на необликувани огноотпорни материјали.

Обликуваните огноотпорни материјали односно тулите според начинот на добивање можат да се поделат на: печени тули, непечени тули и лиени тули.

Претходно пишувавме за печените тули. Непечените тули се изработуваат од претходно стабилизирана суровина, т.е. на тој начин се изработуваат магнезитните и хром-магнезитните тули, кои воопшто не се печат. Овие таканаречени сурови тули се изработуваат од синтеруван материјал со погодна зрновитост и некое врзивно средство, а се обликуваат во хидраулички преси под висок притисок. Овие тули за 48 часа со одлежување, постигнува иста цврстина како печените тули и можат веднаш да се користат. Тие се помалку порозни од печените тули, не се извиткуваат ниту ги покажуваат останатите грешки карактеристични за печената тула.

Лиените тули се огноотпорни материјали кои се карактеризираат со јака кристализирана структура и со помала порозност. Недостаток на овие тули е нивната висока цена.

Необликуваните огноотпорни материјали според **употребата** можат да бидат во дробена и мелена состојба.

Огноотпорните материјали кои се употребуваат во дробена состојба (како зрна) се користат за набивање на некои делови на металуршките печки, при што ако работната температура е доволно висока тогаш не е потребно врзивно средство туку огноотпорниот материјал просто се заварува, да речеме, на дното на печката и механички добро се набива, а доколку не е висока тогаш суровината со одредена зрновитост се меша со pogodно средство за врзување.

Огноотпорните материјали, кои се употребуваат во мелена состојба (како брашно), се користат за изработка на малтер со кои се поврзуваат огноотпорните тули. Секој малтер мора по својот состав да биде сличен на материјалот кој треба да се поврзе. Во малтерот може како врзивно средство да се додаде глина, натриумсиликат или разни органски врзивни средства. Во хоризонталните слоеви се употребува малтер како ретка каша, додека за вертикалните врски мора да се употреби густа и скоро сува смеса за да не истече малтерот од просторот помеѓу тулите. Се препорачува

тулата да се натопи со малтер и да се намести така што да лепи до соседните тули. Што значи колку помал е слојот на малтерот помеѓу тулите, толку сидот е подобар.

Огноотпорните материјали можат да се поделат и според следнава поделба:

- ❖ Група на огноотпорни материјали чија основа е глина:
 - обичен шамот;
 - шамот со зголемена содржина на Al_2O_3 .
- ❖ Група на огноотпорни материјали чија основа е кварц:
 - силика тули;
 - специјални видови на силика тули;
 - силикатни врзива.
- ❖ Група на огноотпорни материјали чија основа се карбонати:
 - магнезит;
 - синтермагнезит;
 - магнезитни тули;
 - доломит.
- ❖ Форстеритната група на огноотпорни материјали;
- ❖ Спинелна група на огноотпорни материјали:
 - хромит;
 - хромитни тули;
 - хром-магнезитни тули.
- ❖ Огноотпорни материјали чија основа е јаглен;
- ❖ Група на специјални огноотпорни материјали (имаат ограничена примена во металургијата):
 - циркониумова група;
 - карбидна група;
 - оксидна група.

Некои од овие огноотпорни материјали ќе бидат разгледани во следната лекција.

7.4 УПОТРЕБА НА ОГНООТПОРНИТЕ МАТЕРИЈАЛИ ВО МЕТАЛУРШКИТЕ АГРЕГАТИ

Шамотот припаѓа на групата на огноотпорни материјали чија основа е глина. За изработка на обичниот шамот се користат следниве суровини: кршлива глина, врзивна глина и мртвопечена глина.

Се употребува за обложување на високите печки, апаратот за предгреење на воздухот, за изработка на решетките на регенеративните комори на SM-печките, за обложување на лиените казани, за изработка на уредите за разлевање на челикот, и конечно, за обложување на парните котли и на многу други печки.

Тој исто така се употребува, освен во облик на тула, и како дробен шамот, кој служи како дилатациски слој помеѓу надворешните челични конструкции на печката и внатрешните огноотпорни материјали. Шамотот се користи и како брашно и тоа како додаток на малтерот за врзување на шамотните тули. За малтер може да се користи и глина, но само чиста глина со приближно иста огноотпорност како и тулата. Глината се меша во течна

паста и со приближно 180 до 190 kg глина може да се поврзат околу 1000 парчиња тула. При изградбата на сидовите мора да се предвидат дилатациски процепи и да се употреби погоден малтер.

Силика тулата обично се изработува од дробен кварцит кој се поврзува со малку вар. Припаѓа на групата на огноотпорни материјали чија основа е кварцот.

Таа поради своите особини се користи како кисел огноотпорен материјал за обложување на бесемеровите конвертори и киселите SM-печки, потоа за скоро сите видови на лачни сводови на металуршките печки, за изработка на комората на кокните печки (поради добрата топлотна спроводливост) и за такви делови на металуршки конструкции каде температурата не се менува многу, каде што се бара волуменска стабилност на високи температури и потреба за поголеми оптеретувања на тулите, но таму каде што тие не се изложени на корозија од базни оксиди.

Магнезитната тула припаѓа на групата на огноотпорни материјали чија основа се карбонати. Овој вид на тула се изработува како печена или сива, односно непечена тула. Во металургијата сè повеќе се користи вториот тип на тула.

Од магнезитни тули се градат внатрешните сидови на различните уреди и печки за изработка на челик (SM-печки, електронечки, конвертори, мешалки итн.), особено на оние места каде е најголема температурата и каде што сидот е во допир со базната течна троска. Овие тули се користат и за металуршки печки, на пример за топење на бакарни руди, при рафинација на бакарот, за топење и рафинација на оловото итн.

Иако магнезитните тули имаат подобра скоро двојна топлотна спроводливост од силика тулата, тие сепак не се погодни за лачни сводови, освен ако овие не се потпрат на некој специјален начин, бидејќи на високи температури ја губат носивоста.

Магнезитните тули, односно магнезитната маса, многу често се отпорни кон разјаднување на базната троска; тие добро го поднесуваат и краткотрајно дејство на кисели троски. Тие се подеднакво добри и отпорни на дејството на манганот и на неговите оксиди, така што можат да се користат како облога во мешалките кои го прифаќаат течното железо со висока содржина на манган, според тоа тие можат да се користат и за обложување на лиените казани во челичарниците, кои изработуваат високолегирани манганови челици.

Доломитот припаѓа на истата група на огноотпорни материјали како и магнезитната тула. Како суровина за изработка на доломитниот огноотпорен материјал служи природниот доломит. Тој во металургијата се користи во облик на синтердоломит, но неговата употреба е ограничена исклучиво на набивање на дното и крпење на SM-печките и конвертори во кои се изработува челик со базна троска.

Хромитните тули припаѓаат на групата на огноотпорни материјали чија основа се спинелите. Главна суровина за изработка на овие тули е хромитот.

Одлика на овие огноотпорни материјали е извонредната хемиска и физичка стабилност на високи температури, така што овој материјал претежно се користи како неутрален слој помеѓу магнезитното дно и силикатниот свод во металуршките печки. Поради своите одлични особини,

хромитните тули сè повеќе се користат во металургијата наместо магнетитните, кои обично се поскапи.

Контролни прашања:

1. Наброј ги суровините за изработка на огноотпорни материјали?
2. Што претставува фортерио?
3. Како се припремува суровината во постепено за изработка на огноотпорни материјали?
4. Како функционира Чемберсовата машина?
5. Како работи тунелската печка?
6. Како се делат огноотпорните материјали?
7. Каде се употребува шамотот како огноотпорен материјал?
8. Објасни ја примената на магнезитните тули?

КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

1. Славе Арменски - Термотехнички машини и уреди, Скопје 1995
2. Благоје Андрејевски - Термодинамика 1, Скопје 1988
3. Благоје Андрејевски - Термодинамика 2, Скопје 1988
4. Ефто Наумовски, Стојан Пецаков - Термодинамика и термотехника 1, Скопје 1992
5. А. Блажевски, К. Димитров, М. Димитровски, М. Серафимов, В. Максимоски - Термодинамика и термотехника 2, Скопје 1992
6. Иво Вушкович - Основе техника мерења, Београд 1977
7. Недјелјка Петрич, Иво Војновиќ, Ванја Мартинац - Техничка термодинамика, Сплит 2007
8. Ванја Мартинац - Термодинамика и термотехника, Сплит 2008
9. Бранко Божиќ - Металургија гвожђа, Београд 1973
10. Боривоје Чурчиќ, Јован Смиљаниќ - Парни котлови, клипне и турбинске машине, Београд 1959

СОДРЖИНА

Предговор	3
Преглед на ознаките	4
1. Топлина	5
1.1 Температура, топлина и специфична топлина	5
1.2 Сонце, ветер и вода како извори на енергија што се обновуваат	6
1.3 Тврди, течни и гасни горива како извори на енергија	10
1.4 Атомската и геотермалната енергија како извори на енергија	11
1.5 Претворање на енергијата од разни енергетски извори во топлотна	13
1.6 Значење на топлинската и електричната енергија во металургијата	14
2. Гасови и пареи	17
2.1 Бојл-мариотов закон	17
2.2 Геј-лисакон закон	18
2.3 Шарлов закон	20
2.4 Равенка на состојбата на иделните гасови и нејзина примена при решавање на проблеми	20
2.5 Топлотни својства на гасовите	23
2.6 Примена на пареите во металургијата	25
3. Основни термодинамички појави	28
3.1 Закон за одржување на енергијата	28
3.2 Внатрешна енергија, количество топлина, специфичен топлински коефициент	29
3.3 Прв закон на термодинамиката	32
3.4 Промена на состојбата на гасовите на pV дијаграм	33
3.4.1 Промена на состојбата при константен волумен ($V = \text{const}$) - изохора	33
3.4.2 Промена на состојбата при константен притисок ($p = \text{const}$) - изобара	34
3.4.3 Промена на состојбата при константна температура ($t = \text{const}$) - изотерма	36
3.4.4 Промена на состојбата без размена на топлина ($Q = 0$) - адијабата	37
3.4.5 Општа промена на состојбата - политропа	39
3.5 Решавање на проблеми при промена на состојбата на гасовите во p - V дијаграм	40
3.6 Основни принципи на кружните циклуси	43
3.7 Ентропија	46
3.8 Карнотов циклус	49
3.9 Втор главен закон на термодинамиката	51
3.10 Повратни и неповратни процеси	52
3.11 Промени на состојбата во T - s дијаграм	53
3.11.1 Изотерма	53
3.11.2 Изобара и изохора	54

3.11.3 Адијабата	54
3.11.4 Политропа	55
3.12 Примена на Првиот и Вториот закон на термодинамиката во металургијата	56
4. Мерење и регулација	58
4.1 Притисок	58
4.2 Постапки за мерење на притисок	59
4.3 Проток на гасовите	62
4.4 Мерење проток	63
4.5 Мерење на температури со термометри, термоелементи и оптички пирометри	65
4.6 Регулација на температурата во металуршките агрегати	68
5. Горива и согорување	71
5.1 Класификација и состав на горивата	71
5.2 Калорична вредност (топлотна моќ) на горивата	74
5.3 Одредување на калоричната вредност (топлотната моќ) на горивата	76
5.4 Основни стехиометриски равенки за согорување	78
5.4.1 Потполно согорување на јаглеродот	78
5.4.2 Непотполно согорување на јаглеродот	79
5.4.3 Сोगорување на водород	81
5.4.4 Сोगорување на сулфур	83
5.4.5 Сोगорување на јаглеводороди	84
5.5 Определување на потребното количество кислород за согорување	85
5.6 Загуби при непотполно согорување	87
6. Пренос на топлина	90
6.1 Пренос на топлина со конвекција	90
6.2 Пренос на топлината низ рамен сид	92
6.3 Пренос на топлината низ повеќеслоен сид	93
6.4 Пренос на топлината низ цилиндричен сид	94
6.5 Пренос на топлина со кондукција	97
6.6 Пренос на топлината со кондукција низ рамен и повеќеслоен сид	99
6.7 Пренос на топлината со кондукција низ еднослоен и повеќеслоен цилиндричен сид	102
6.8 Пренос на топлината низ сидовите на печките	104
6.9 Рекуператори	106
6.10 Регенератори	109
7. Огноотпорни материјали	111
7.1 Суровини за изработка на огноотпорни материјали	111
7.2 Постапки за изработка на огноотпорни материјали	113
7.2.1 Припрема на суровината	113
7.2.2 Процеси на обликување	114
7.3 Поделба на огноотпорните материјали	117
7.4 Употреба на огноотпорните материјали во металуршките агрегати	119
Користена литература	122