

Филип А. Мојсовски

Т Е Р М О Д И Н А М И К А

Доцент д-р Филип А. Мојсовски
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје
Машински факултет - Скопје

Т Е Р М О Д И Н А М И К А

Универзитетски учебник
Одлука за издавање на учебник број 02-376/4 од 24.04.2014 година,
Машински факултет - Скопје

Рецензенти:

Проф. д-р Марко Серафимов, Машински факултет - Скопје
Проф. Д-р Миле Димитровски, Машински факултет - Скопје
Одлука за определување на рецензенти на Машински факултет - Скопје
број 02-376/1 од 30.01.2014 година (Билтен на Универзитет „Св. Кирил и
Методиј“ во Скопје број 1075 од 15.04.2014 година)

ПРЕДГОВОР

Во периодот од 1959 до 2015 година, на Машинскиот факултет во Скопје, за потребите на наставата, термодинамиката била користена за оформување на повеќе предмети: Термодинамика 1, Термодинамика 2, Пренос на топлина и маса, Техничка термодинамика, Термодинамика (за Факултетот за земјоделски науки и храна), Термодинамика (за Технолошко-металуршкиот факултет), Термодинамика (за тригодишните студии на Машинскиот факултет), Термодинамика - напредно ниво (за студентите од втор степен).

Термодинамиката е воведена во Македонија, на универзитетско ниво, пред 50 години.

Материјалот обработен во учебникот е наменет за студентите од студиските програми: Термичко инженерство, Производно инженерство, Транспорт, механизација и логистика, Хидраулично инженерство и менаџмент на води, Материјали спојување и конструктивно инженерство, Индустриско инженерство и менаџмент, Моторни возила, Енергетика и екологија, Мехатроника и Автоматика и управување со системи на Машинскиот факултет во Скопје, но може да им послужи и на сите заинтересирани за класичната термодинамика.

Овој материјал се однесува на термодинамиката што се предава на машинските факултети кај нас и во светот.

Приодот и стилот на подготвениот текст произлегуваат од искуството што авторот го стекнал како асистент и наставник по термодинамика на Машинскиот факултет во Скопје, во периодот од 2000 до 2015 година.

Однапред се заблагодарувам за евентуалните забелешки или коментари во врска со презентираниот материјал во учебникот.

Скопје, 2015 година

Авторот

СОДРЖИНА:

1. ВОВЕД.....	8
1.1. Постулати на топлинска рамнотежа.....	8
1.2. Температура - дефиниција.....	9
1.3. Мерење на температурата.....	9
1.3.-1. Температурни скали.....	9
1.3.-2. Термометри.....	10
2. ТЕРМИЧКА УДОБНОСТ.....	12
2.1. Термичка удобност во автомобилите.....	14
3. ПРВ ЗАКОН НА ТЕРМОДИНАМИКАТА.....	18
4. ВТОР ЗАКОН НА ТЕРМОДИНАМИКАТА.....	20
5. СОДРЖАНА ТОПЛИНА.....	22
6. ГОЛЕМИНИ И ЗАКОНИ ЗА ИДЕАЛНИ ГАСОВИ.....	24
6.1. Равенка на состојба за идеални гасови.....	24
6.2. Авогадров закон.....	24
6.3. Гасна константа.....	25
6.4. Нормален кубен метар.....	25
6.5. Далтонов закон.....	25
7. ПРОМЕНИ НА СОСТОЈБА ЗА ИДЕАЛНИ ГАСОВИ.....	26
7.1. Политропа.....	26
7.2. Изотерма.....	27
7.3. Изохора.....	28
7.4. Изобара.....	29
7.5. Адијабата.....	30

8. ПРОЦЕСИ СО ГАСОВИ.....	32
8.1. Процес помеѓу константни притисоци.....	32
8.2. Кружни процеси.....	33
9. ВОДНА ПАРА.....	36
9.1. Испарување.....	36
9.2. Парна постројка.....	39
10. ВОЗДУХ.....	42
10.1. Состав и заситување на воздух.....	42
10.1.-1. Стандардна атмосфера.....	42
10.1.-2. Промена на барометарскиот притисок и температура на атмосферскиот воздух.....	43
10.1.-3. Заситување на влажен воздух.....	45
10.2. Основни големини.....	46
10.3. Термодинамички својства на влажен воздух.....	47
10.4. Мерење на влажност на воздух.....	51
10.4.-1. Психрометри.....	55
10.5. Дијаграми за воздух.....	57
10.5.-1. Психрометриски дијаграм.....	57
10.5.-2. Дијаграм содржана топлина - содржана влага... ..	60
10.5.-3. Мешање на воздушни струи.....	63
10.5.-4. Влажење на воздух.....	64
10.5.-5. Греење и ладење на воздух.....	66
10.5.-6. Сушење на воздух.....	67
10.6. Атмосферски воздух.....	67
10.6.-1. Метеорологија.....	67
10.6.-2. Климатски криви.....	70
10.7. Примена на воздухот.....	72
10.7.-1. Кондиционирање на воздух.....	72
10.7.-2. Ладилни кули.....	78
10.7.-3. Сушилници.....	83
11. ВТЕЧНУВАЊЕ НА ГАСОВИ.....	96
11.1. Втечнување на воздух според Linde.....	96

11.2. Придушен ефект.....	98
11.3. Втечнување на воздух со двојна циркулација според Linde.....	99
12. ИЗГОРУВАЊЕ.....	102
12.1. Горива.....	102
12.2. Температура на запалување.....	102
12.3. Стехиометриски односи.....	103
12.4. Минимално количество на воздух.....	103
12.4.-1. Цврсти горива.....	103
12.4.-2. Течни горива.....	105
12.4.-3. Гасни горива.....	105
12.5. Количество на воздух.....	106
12.6. Топлинска моќ на горивото.....	106
13. ПРЕНОС НА ТОПЛИНА.....	108
13.1. Термичка спроводливост.....	108
13.1.-1. Законот на Fourier.....	108
13.1.-2. Коефициент на термичка спроводливост.....	109
13.1.-3. Термичка спроводливост во еден правец.....	111
13.2. Термичка конвекција.....	112
13.2.-1. Коефициент на термичка конвекција.....	114
13.3. Термичко зрачење.....	115
13.3.-1. Зрачни својства.....	116
13.3.-2. Законот на Stefan-Boltzmann.....	118
13.3.-3. Законот на Lambert.....	118
13.3.-4. Зрачење во полупростор.....	119
14. ТОПЛИНОИЗМЕНУВАЧИ.....	120
14.1. Коефициент на пренос на топлина.....	121
14.2. Истонасочни топлиноизменувачи.....	123
14.3. Противнасочни топлиноизменувачи.....	126
14.4. Крстонасочни топлиноизменувачи.....	127

14.5. Единствена пресметка за различни топлиноизменувачи.....	130
14.6. Ефектност на топлиноизменувачот.....	131
14.7. Типови на топлиноизменувачи.....	133
14.7.-1. Цевкасти топлиноизменувачи.....	134
14.7.-2. Плочести топлиноизменувачи.....	136
14.7.-3. Топлиноизменувачи со проширена површина.....	138
14.7.-4. Регенеративни топлиноизменувачи.....	139
ОЗНАКИ.....	142
ЛИТЕРАТУРА.....	146

1. ВОВЕД

Денес постојат повеќе термодинамики развиени за потребите на одредени области во техниката, но предмет на проучување на машинците - термичари е класичната термодинамика. Оваа термодинамика се однесува на доживувањето на топлинските појави во природата од страна на сетилата на човекот. Тоа значи дека термодинамиката се занимава со движењето на топлината, онакво какво што човекот го регистрира.

Класичната термодинамика се потпира на два постулата и важи само за средините во кои важат тие постулати.

Термодинамиката е наука за топлината. Таа е изградена на искуството што човекот го стекнал на макроскопски тела со вообичаени димензии, со умерена густина и при умерени температури. Затоа обидите да се применат термодинамичките закони на простори со многу мали или многу големи димензии, како молекуларните или свемирски простори, се туѓи за класичната термодинамика.

1.1. ПОСТУЛАТИ НА ТОПЛИНСКА РАМНОТЕЖА

Првиот постулат на рамнотежа во термодинамиката гласи:

“Секој состав на природни тела што е препуштен сам на себе, тежи кон состојба на рамнотежа, а кога ќе ја постигне тој веќе не е способен (без надворешно влијание) да ја напушти”.

Овој постулат произлегува од стекнатото искуство на човекот, за материјалната средина со вообичаени размери во која тој живее. Класичната термодинамика во целина се потпира на него. За појавите и подрачјата за кои не важи овој постулат, како на пример за атомите или за свемирот, законите на класичната термодинамика не може да се применат.

За две тела првиот постулат на рамнотежа искажува: “Ако тело 1 и тело 2 со различни топлински состојби се донесат во меѓусебна врска, состојбите ќе им се менуваат додека не се воспостави топлинска рамнотежа”.

Вториот постулат на рамнотежа во термодинамиката гласи: “Ако

тело 1 е во топлинска рамнотежа со тело 2 и со тело 3, тогаш и телата 2 и 3 се во топлинска рамнотежа”.

1.2. ТЕМПЕРАТУРА - ДЕФИНИЦИЈА

Температурата, во класичната термодинамика, се дефинира на следниот начин: “Две тела се наоѓаат на иста температура кога се во топлинска рамнотежа”.

Според тоа, поимот температура во класичната термодинамика е директно поврзан со првиот и вториот постулат на рамнотежа.

Треба да се истакне дека температурата е договорен термин за исти манифестации на топлинската состојба, на која и се припишува некоја вредност на температурата. На пример, живиниот термометар не ја мери температурата, туку го мери ширењето на живата што е предизвикано од топлината.

Директното мерење на температурата не е возможно.

1.3. МЕРЕЊЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА

1.3.-1. ТЕМПЕРАТУРНИ СКАЛИ

Меѓународниот комитет за товари и мерки (International Committee of Weights and Measures) во 1990 година ја поставил Меѓународната температурна скала, (ITS90). Во неа единица за температура е Келвин (K).

Во Табела 1.3.-1. покажани се температурните скали кои ги користат термичарите во светот.

Табела 1.3.-1. Температурни скали

Име	Единица	Број на еднакви делови	Опсег
Celsius	°C	100	0-100
Kelvin	K	100	273-373
Fahrenheit	°F	180	32-212
Rankine	°R	180	492-672

1.3.-2. ТЕРМОМЕТРИ

Термометар е уред кој ја мери температурата со користење на различни принципи.

Денес во практиката се користат повеќе конструкции на термометри.

Во Табела 1.3.-2. даден е преглед на најчесто применуваните термометри.

Температурата на мразот е $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, телесната температура на човекот е $37\text{ }^{\circ}\text{C}$, на димните гасови $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, на пламенот $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температурата на површината на Сонцето е $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Во практиката машинскиот инженер - термичар најчесто не наидува на температури повисоки од $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Термометрите се изработуваат со различен квалитет, од обичните кои по производството одат директно во продажба и чинат неколку евра, до прецизните кои се баждарат и сертифицираат и може да чинат и 1000 евра.

Термометрите од типот “течност во стакло” имаат голема примена во процесите на греење, вентилација и климатизација на стамбени и индустриски објекти.

На пример, живините термометри се вообичаени како мерен инструмент поради нивната релативно висока прецизност во мерењето и ниската цена. Тие работат во температурен опсег од $-38,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура на која живата замрзнува, до околу $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура на која стаклото обично започнува да омекнува. Според регулативата 2007/51/ЕС, во земјите членки на Европската унија, воведена е рестрикција во продажбата на живини термометри со цел заштита на околината и јавното здравје од токсичноста на живата, (-, 2009d).

Кај отпорничките термометри е искористено својството на сензорот, обично метал, да му се менува електричниот отпор при промена на температурата (електричниот отпор се зголемува при зголемување на температурата).

Термисторските термометри, термометрите со термопарови и биметалните термометри исто така ги користат промените на електричните големини за мерење на температурата.

Табела 1.3.-2. Термометри

Тип	Примена	Опсег, °C	Грешка, K	Ограничување
Течност во стакло				
1. Жива	Температура на гасови и течности со допир	- 38 / 550	0,03 - 2	Кај гасовите, на точноста влијае зрачењето
2. Органски флуид	Температура на гасови и течности со допир	- 200 / 200	0,03 - 2	Кај гасовите, на точноста влијае зрачењето
Отпорнички термометри				
1. Платиниум	Точност, далечинско мерење, температура на флуиди и цврсти тела со допир	- 259 / 1000	0,0001 - 0,1	Висока цена, кај гасовите на точноста влијае зрачењето
2. Никел	Далечинско мерење, температура со допир	- 250 / 200	0,01 - 1	Кај гасовите, на точноста влијае зрачењето
3. Германиум	Далечинско мерење, температура со допир	- 273 / - 243	0,00001 - 0,1	
4. Родиум/Железо	За криогени апликации	- 273 / - 243	0,00001 - 0,1	Висока цена
Термистори	Далечинско мерење, температура со допир	До 200	0,00001 - 0,1	
Термопарови				
1. Au/Pt	Референтни термометри за лабораториска намена со висока точност	- 50 / 1000	0,05 - 1	Висока цена
2. Fe/ Constantan	За високи температури и далечинска употреба	До 750	0,1 - 6	Можна појава на оксидација
3. Ni-Cr/Constantan	За високи и ниски температури, за далечинска употреба	До 900	0,1 - 7	
4. Cu/ Constantan	За високи и ниски температури, за далечинска употреба	До 350	0,1 - 3	
Биметални термометри	За приближни температури	- 20 / 660	1 и повеќе	Време на одзив, несоодветни за далечинска употреба

(Според ASHRAE Handbook, Fundamentals, 2009c)

2. ТЕРМИЧКА УДОБНОСТ

Термичката удобност се дефинира како состојба на мозокот со која се изразува задоволство од термичката околина, во која човекот се наоѓа. Свеста за оваква состојба се појавува при резимирање на заклучоците во однос на примените осети за температура и влага на кожата, за температурите во внатрешноста на телото и за напорите потребни за регулирање на температурата на телото. Општо, удобност се постигнува кога телесната температура се одржува во рамките на тесно подрачје, влажноста на кожата е ниска и физиолошките напори за регулирање на температурата се сведени на минимум.

Кога возрасен човек мирува, во удобни услови, температурата на центарот за терморегулација во мозокот (хипоталамусниот дел од мозокот) се наоѓа на температура од $36,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таа се зголемува на $37,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ при пешачење, а на $37,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ при трчање.

Температурите на кожата повисоки од $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ и пониски од $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ предизвикуваат болка. Површинската температура на кожата, кога човекот обавува нормални активности седејќи, изнесува 33 до $34\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Внатрешните температури повисоки од $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ водат до неповратни оштетувања на мозокот, а пониските од $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ до аритмија на срцето и смрт.

Поради метаболизмот се создава топлина која мора континуирано да се отстранува од телото за да тоа остане во опсегот на нормалните температури, односно да не дојде до нарушување, прво на термичката удобност, а подоцна и на здравјето.

Возрасен човек, кога седи и мирува, создава околу 100 W топлински тек. Бидејќи најголемиот дел од топлината се пренесува во околината преку кожата, а земајќи предвид дека просечен човек има површина на кожата $1,7 - 1,8\text{ m}^2$, воведена е основната единица за произведена топлина по единица површина на кожата $1\text{ met} = 58,2\text{ W/m}^2$, која се дефинира како метаболичка вредност на личност која седи и мирува, (според стандардот ASHRAE 55-2010).

За терморегулацијата на човекот е битна регулацијата на протекот на крвта кон кожата за да се контролира преносот на топлината од телото кон кожата.

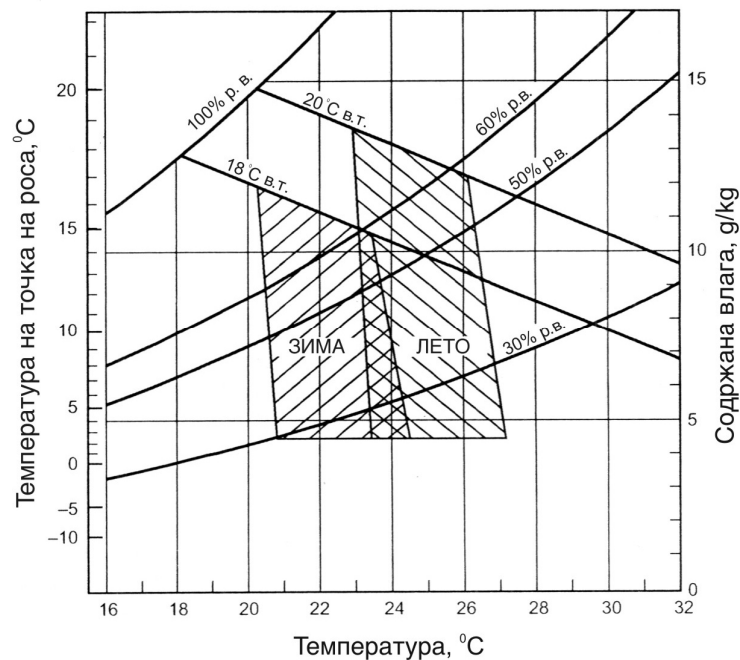
Кога ќе се појават високи внатрешни температури протекот на крвта од телото кон кожата може да се зголеми и до 15 пати.

При повишени внатрешни температури во терморегулацијата се вклучува и процесот на потење. Потните жлезди испуштаат пот на кожата, која потоа исплапува. Ако условите за исплапување се добри кожата останува релативно сува со малку пот на неа. При полоши услови за исплапување, потта се шири по кожата додека не опфати површина доволна за нејзино исплапување.

Во литературата, континуирано се зголемуваат информациите за методологијата на пресметка и за билансирање на пренесената топлина од човекот кон околината, (Fanger, 1967), (Fanger, 1972), (-, 2009b).

За да се постигне унифицирано оценување на нивото на осетливоста, поставена е и скала на термичка осетливост со седум нивоа: “+3” врело, “+2” топло, “+1” млако, “0” неутрално, “-1” свежо, “-2” ладно, “-3” мразно.

Според стандардот ASHRAE 55-2010 облеченоста се мери во однос на стандардната облеченост која што е еквивалентна на костум и кошула.



р.в. - релативна влажност, в.т. - влажен термометар

Слика 2.-1. Зони на термичка удобност во зимски и летен период

Дефинирана е и единица за облеченост, 1 clo. 1 clo е стандардна облеченост потребна да обезбеди термичка удобност на возрасен човек, кој седи и мирува, во нормално проветрувана просторија (брзина на воздухот 0,1 m/s) при температура од 21 °C и релативна влажност помала од 50 %.

Воведен е и стандард кој ги специфицира зоните на термичка удобност. Во него, како критериум се зема, 80 % од луѓето кои учествувале во експериментот, да се изјаснат дека се чувствуваат исто. Зоните на термичка удобност, за зимскиот и летниот период, се покажани на Слика 2.-1..

2.1. ТЕРМИЧКА УДОБНОСТ ВО АВТОМОБИЛИТЕ

Термичката удобност во современите автомобили се обезбедува преку комбинација од три термички системи: (1) систем за греење, (2) систем за вентилација, (3) систем за климатизација.

Првите два система се стандардна опрема. Во Европската унија најголемиот дел од возилата се сервиски опремени и со систем за климатизација, додека во Источна и Југоисточна Европа (каде спаѓа и нашата држава) овие системи се на листата на дополнителна опрема. Цената на системот е уште повисока кога се вградува во автомобили што се купени без систем за климатизација и изнесува околу 10 % од набавната вредност на возилото, (-, 2001b), (-, 2001c), (-, 2001d).

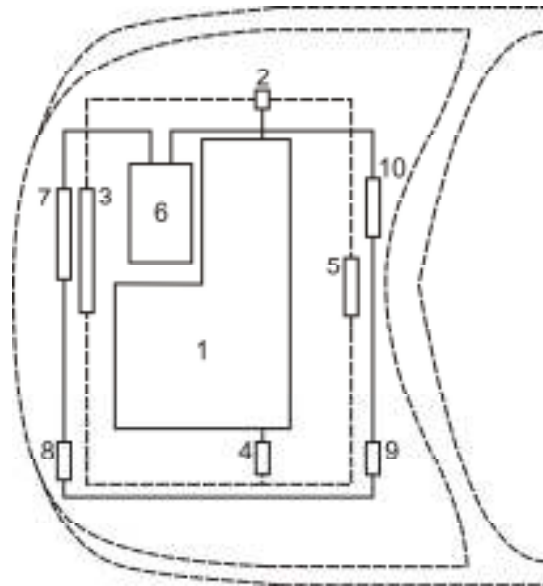
Основните елементи на термичките системи се означени на Слика 2.1.-1..

Во системите за климатизација кај автомобилите се користат два типа на компресори, спирални и клипни.

Се користат компресори со постојан потисок од 0,1 до 0,2 литри по вртеж и компресори со променлив потисок. Кај вториот тип минималниот потисок е 0,016 литри по вртеж, што е околу 10 % од максималниот потисок. Типичен спирален компресор со променлив потисок има максимален потисок од 0,12 литри по вртеж и минимум од 3 % од максималниот.

Кај современите автомобили просторот за вградување на моторот е се помал, бидејќи постојано се зголемува барањето за што е можно по-

голема економичност во потрошувачката на гориво, а тоа значи зголемување на бројот на вградени делови под поклопецот на моторот. Затоа и димензиите на новите типови на компресори, вградени во термичките системи се компактни и со намалени димензии.



- | | |
|----------------|--------------------------|
| 1 - мотор, | 6 - компресор, |
| 2 - термостат, | 7 - кондензатор, |
| 3 - ладилник, | 8 - ресивер-сушач, |
| 4 - пумпа, | 9 - експанзионен вентил, |
| 5 - грејач, | 10 - испарувач. |

Слика 2.1.-1. Елементи на систем за термичка удобност во автомобил

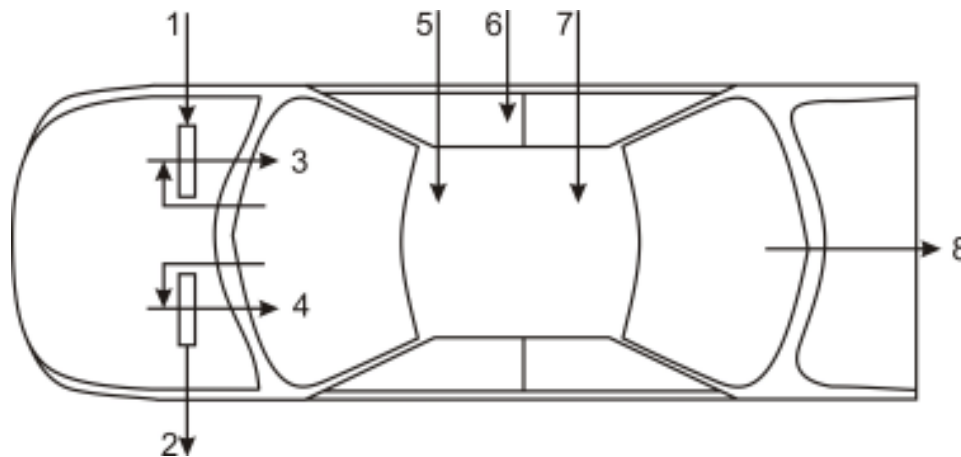
Компресорите се погонувани директно од моторот на возилото со помош на ремен. Поради тоа, тие мора да се предвидени да поднесат брзини од над 100 вртежи во секунда, но и да работат тивко и без потреси при само 8 вртежи во секунда. При постојана брзина на движење на возилото, може да се појави потреба за зголемување на компресорската брзина со цел да се обезбеди потребниот капацитет на испумпување.

Вклучувањето и исклучувањето на компресорот се врши со помош на магнетна спојка. Магнетната спојка се напојува од електричниот систем на возилото. Оваа спојка е исклучена кога клима уредот не работи.

Од ладилните средства, како индустриски стандард е прифатен

R -134a. Тоа значи дека во сите нови автомобили, во системот за климатизација се користи овој ладилен флуид како замена за R-12. Ладилниот флуид R-134a е избран како замена бидејќи неговите физички и термодинамички својства се најблиски до оние на R -12.

Компонентите на енергетскиот биланс се покажани на Слика 2.1.-2. Топлинскиот тек низ грејачот, "1", потекнува од водата што го лади моторот. Надворешниот воздух се грее минувајќи низ грејачот и обезбедува топлина за патниците и елиминација на влагата што се создава со дишењето на патниците и од други извори на влага. Загреаниот воздух ја апсорбира влагата од внатрешната површина на возачкото стакло и ги одржува другите стакла на температура над точка на роса.



- 1 - топлински тек низ грејачот,
- 2 - топлински тек низ испарувачот,
- 3, 4 - топлински тек со влезен воздух или рециркулација,
- 5, 6, 7 - топлински тек кон или од околината,
- 8 - топлински тек со излезен воздух.

Слика 2.1.-2. Компоненти на енергетскиот биланс

Топлинскиот тек низ испарувачот, "2", потекнува од ладилното средство на компресорскиот ладилен циклус. Воздухот минува низ испарувачот и се уфрлува во кабината преку истите решетки што служат и за греење и за вентилација.

Преносот на топлината од возилото кон околината и обратно се состои од три компоненти: "5"- конвективен пренос на топлина од каросеријата, "6" - конвективен пренос на топлина од стаклата, "7" - зрачен

пренос на топлина, "8" - топлинскиот тек содржан во излезниот воздух.

За точни пресметки се зема предвид и топлинскиот тек од патниците и зрачниот топлински тек од моторот.

Во литературата има малку објавени примери за рангот на компонентите на енергетскиот биланс во автомобили и автобуси добиени при компјутерска симулација на термичката удобност, (Ćićuz, 2001), (-, 2003).

Во зимскиот период, за услови на возење на автомобил низ град, надворешна температура $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, внатрешна температура $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура на грејачот $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, пример за вредностите на компонентите на енергетскиот биланс, во одредени стационарни услови, би бил:

$$Q_1 = 7,7\text{ kW}, Q_5 = -1,5\text{ kW}, Q_6 = -2,5\text{ kW}, Q_8 = -3,7\text{ kW}.$$

Во летниот период, за услови на возење на автомобил низ град, надворешна температура $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, внатрешна температура $23\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура на испарувачот $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, пример за вредностите на компонентите на енергетскиот биланс, во одредени стационарни услови, би бил: $Q_2 = -4,5\text{ kW}$, $Q_5 = 0,7\text{ kW}$, $Q_6 = 1,7\text{ kW}$, $Q_7 = 1,6\text{ kW}$, а $0,5\text{ kW}$ ќе внесува свежиот воздух.

Важен показател за перформансите на системот за климатизација се и $t - \tau$ кривите, со кои се изразува намалувањето на температурата на воздухот во тек на време, при стартување на системот, бидејќи првите минути по вклучувањето на системот често се пресудни за термичката удобност.

Компјутерската симулација нуди и визуелизација на температурните и брзинските полиња за воздухот што струи низ кабината.

Грешките на претскажаните во однос на мерените вредности, за денес употребуваните симулациони техники се од рангот 2 до 3 %, (Ćićuz, 2001). Овие резултати го насочуваат развитокот на системите за климатизација. Веќе се применуваат и на пат се за стандардизација двозонски системи за климатизација во кои левата и десната страна на возилото добиваат воздух со различни карактеристики. Како следна етапа се поставува испитувањето на решенија кои ќе обезбедат четирizonски системи за климатизација, односно можност секој патник да одбира свои термички услови.

3. ПРВ ЗАКОН НА ТЕРМОДИНАМИКАТА

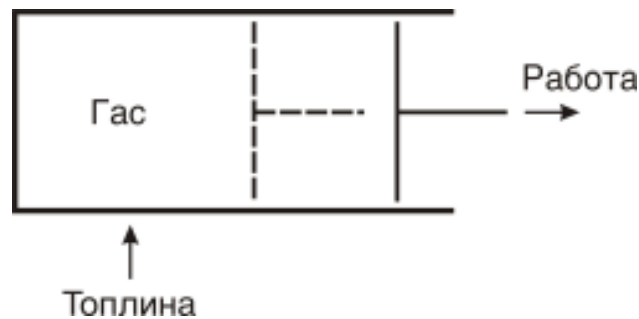
Првиот закон на термодинамиката ги поврзува трите облици на енергија што се од основен интерес за термичарите: топлината, внатрешната енергија и работата.

Тој се изразува со равенката,

$$Q = U_2 - U_1 + W. \quad (3.-1.)$$

Топлината Q внесена во едно тело или систем се користи за зголемување на внатрешната енергија $\Delta U = U_2 - U_1$ на телото или системот и за вршење на работа W .

Греењето на гас, затворен во цилиндер со подвижен клип, се разгледува како пример за билансирање на топлината, внатрешната енергија и работата.



Слика 3.-1. Греење на гас

Греењето на гасот се одвива во две фази. Во првата фаза клипот е неподвижен. Внатрешната енергија на гасот се зголемува како резултат на внесување на топлина во износ,

$$Q_{12} = \Delta U_{12} = U_2 - U_1. \quad (3.-2.)$$

Со 1 и 2 се означени моментите на почеток и крај на греењето. Во втората фаза продолжува греењето на гасот со внесување на топлина во износ Q_{23} . Внатрешната енергија на гасот се зголемува, но тоа зголемување се користи за вршење на работа W , бидејќи е овозможено движење на клипот,

$$Q_{23} = \Delta U_{23} = U_3 - U_2 = W \quad (3.-3.)$$

Со 3 е означен моментот на завршување на греењето во втората фаза.

Вкупната внесена топлина во процесот на греење изнесува,

$$Q = Q_{12} + Q_{23}, \quad (3.-4.)$$

или

$$Q = U_2 - U_1 + W.$$

Внесената топлина ја зголемува внатрешната енергија на гасот, а дел од тоа зголемување може да се искористи за вршење на работа.

Зголемувањето на делот од топлинската енергија што е претворен во работа е трајна задача на термичарите. За оценување на можната големина на тој дел потребно е да се совлада вториот закон на термодинамиката.

4. ВТОР ЗАКОН НА ТЕРМОДИНАМИКАТА

Вториот закон на термодинамиката е поставен врз основа на искуството на човекот дека не е возможно топлината целосно да се претвори во работа.

Додека првиот закон на термодинамиката укажува на еквивалентноста на сите форми на енергија, вториот закон на термодинамиката објаснува дека во термичките процеси енергијата се трансформира во се помалку корисна форма.

Првиот закон на термодинамиката е закон за одржување на енергијата, а вториот закон на термодинамиката е закон за деградација на енергијата.

Процесот на пренос на топлина при конечна температурна разлика е неповратлив процес. Во него топлината се движи во насока на пониската температура. Таа топлина не може да се врати назад на висока температура без надворешни влијанија. Значи, не може да се воспостават истите топлински состојби што владееле пред одвивањето на процесот на пренос на топлина.

Неповратлив процес е оној, по чие одвивање сите учесници би можеле да се вратат во почетната состојба само со помош на дополнителни процеси, поради кои во природата останува трајна промена.

Почетната состојба на неповратливиот процес е неповторлива.

Природни се само неповратливите процеси.

Барајќи начин за пресметување на загубите во неповратливите процеси воведена е големината ентропија.

Преку промената на ентропијата може да се оцени колку е некој процес неповратлив. Ентропијата се именува и “големина на преобразба”.

Равенките,

$$dQ \leq TdS, \quad dS \geq \frac{dQ}{T} \quad (4.-1.)$$

$$Q_{12} \leq \int_1^2 TdS, \quad S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{dQ}{T} \quad (4.-2.)$$

претставуваат аналитичка формулација на вториот закон на термодинамиката во диференцијална и интегрална форма.

Изразувајќи го отстапувањето на реалните процеси од совршените процеси, тие го изразуваат и степенот на совршенство во претворањето на расположивата енергија во работа.

Од Равенка (4.-1.) и Равенка (4.-2.) произлегуваат и димензиите на ентропијата,

$$S \text{ (J/K),}$$

$$s \text{ (J/kgK).}$$

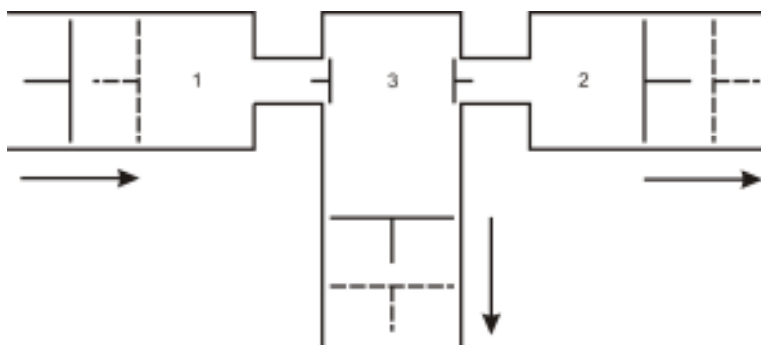
Ентропија или “големина на преобразба” е мерка за оценка на совршеноста на претворање на топлината во механичка работа.

5. СОДРЖАНА ТОПЛИНА

Збирот на внатрешната енергија и производот од притисокот и волуменот на флуид, во термодинамиката се именува “содржана топлина” или “енталпија”,

$$I = U + pV . \quad (5.-1.)$$

До Равенката (5.-1.) може да се дојде ако се посматра процес помеѓу константни притисоци во отворен систем, Слика 5.-1..



- 1 - цилиндер со гас на состојба 1 (p_1, T_1, V_1),
- 2 - цилиндер со гас на состојба 2 (p_2, T_2, V_2),
- 3 - цилиндер на работна машина.

Слика 5.-1. Процес помеѓу константни притисоци

Цилиндерот 1 се полни со гас на висок притисок p_1 , во цилиндерот 3 се врши работа, а во цилиндерот 2 гасот излегува со намален притисок p_2 .

Во цилиндерот 1 се вложува работа на втиснување $W_1 = p_1 V_1$, а во цилиндерот 2 се добива работа на истиснување $W_2 = p_2 V_2$. Нивната разлика е работата на струење $W_s = p_2 V_2 - p_1 V_1$.

Во цилиндерот 3 се добива работа при процес помеѓу константни притисоци p_1 и p_2 , која се именува техничка работа, W_T .

Вкупната работа е,

$$W = W_T + W_s . \quad (5.-2.)$$

Ако се искористи првиот закон на термодинамиката и ако систе-

мот е добро изолиран така што нема измена на топлина со околната средина ($Q = 0$),

$$Q = U_2 - U_1 + W,$$

се добива,

$$0 = U_2 - U_1 + W_T + p_2 V_2 - p_1 V_1, \quad (5-3.)$$

или,

$$W_T = (U_1 + p_1 V_1) - (U_2 + p_2 V_2). \quad (5-4.)$$

Големината што е запишана во заградите на Равенка (5-4.) е содржаната топлина или енталпијата.

Сега,

$$W_T = I_1 - I_2. \quad (5-5.)$$

Техничката работа се изразува како разлика на енталпиите.

6. ГОЛЕМИНИ И ЗАКОНИ ЗА ИДЕАЛНИ ГАСОВИ

6.1. РАВЕНКА НА СОСТОЈБА ЗА ИДЕАЛНИ ГАСОВИ

Равенката на состојба претставува математички однос помеѓу притисокот, специфичниот волумен и температурата.

Кога еден хомоген систем се наоѓа во термодинамичка рамнотежа, тогаш важи,

$$f(p, v, t) = 0. \quad (6.1.-1.)$$

Равенката на состојба за идеалните гасови се изразува,

$$pV = mRT, \quad (6.1.-2.)$$

или за 1 kg,

$$pv = RT, \quad (6.1.-3.)$$

односно,

$$\frac{pv}{RT} = 1.$$

За состојбите во кои владее зголемен притисок,

$$\frac{pv}{RT} > 1,$$

што значи дека се појавуваат отстапувања од равенката на состојба за идеалните гасови.

Равенките што ги изразуваат тие отстапувања, имаат во себе повеќе членови за притисокот или за специфичниот волумен.

6.2. АВОГАДРОВ ЗАКОН

Авогадровиот закон гласи,

“При исти температури и притисоци, во еднакви волумени, идеалните гасови содржат ист број на молекули“.

За

$$t_1 = t_2, \quad p_1 = p_2, \quad V_1 = V_2,$$

следува,

$$N_1 = N_2,$$

каде N_1 и N_2 се бројот на молекулите на двата гаса.

6.3. ГАСНА КОНСТАНТА

Секој гас има своја карактеристична гасна константа. Тоа е вредност што се добива од равенката на состојба за идеален гас.

Ако во равенката на состојба за идеален гас се заменат вредностите за воздух, за нормална физичка состојба, $p = 101325 \text{ Pa}$, $T = 273,15 \text{ K}$ ($t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$), $v = 1/\rho = 1/1,29 \text{ m}^3/\text{kg}$, се добива вредноста на гасната константа за воздух,

$$R_{\text{VOZDUH}} = \frac{pv}{T} = \frac{101325}{273,15 \cdot 1,29} = 287,041 \text{ J/kgK},$$

каде $\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$ е густина на воздух.

Покрај гасната константа се користи и општа гасна константа. Производот од гасната константа и молската маса е именуван општа гасна константа, и за сите гасови има иста вредност,

$$R_{\mu} = 8314 \text{ J/kmolK}.$$

6.4. НОРМАЛЕН КУБЕН МЕТАР

Нормален кубен метар (m_n^3) е она количество од некој гас кое при нормални услови ($p = 101325 \text{ Pa}$, $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$) би завземало волумен од 1 m^3 .

6.5. ДАЛТОНОВ ЗАКОН

За гасните смеси важи Далтоновиот закон,

“Целосниот притисок на гасната смеса е еднаков на збирот од парцијалните притисоци на компонентите”.

За смеса од две компоненти,

$$p = p_1 + p_2. \quad (6.5.-1.)$$

За смеса од n компоненти Далтоновиот закон го добива обликот,

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i. \quad (6.5.-2.)$$

7. ПРОМЕНИ НА СОСТОЈБА ЗА ИДЕАЛНИ ГАСОВИ

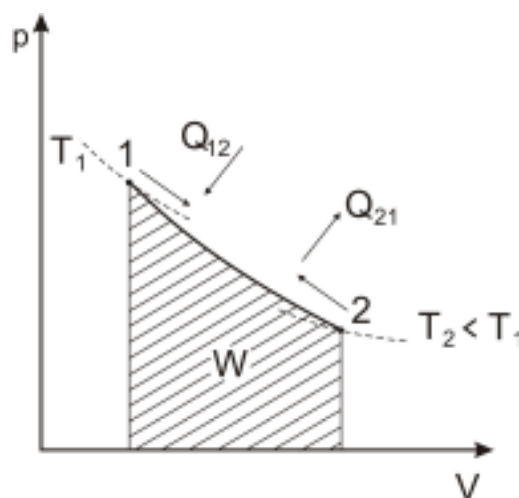
7.1. ПОЛИТРОПА

Во термодинамиката, за основни промени на идеален гас се сметаат: (1) при константна температура - изотерма, (2) при константен волумен - изохора, (3) при константен притисок - изобара, (4) промена без примање или оддавање на топлина - адијабата.

Со овие четири промени на состојба термодинамичарите го претставуваат однесувањето на работното средство во топлинските процеси.

Изотермата, изохората, изобарата и адијабатата може да се разгледуваат како специјални случаи на општа промена на состојба, именувана политропа.

Политропската промена на состојба е графички претставена на Слика 7.1.-1..



1 - 2 Политропска експанзија,
2 - 1 Политропска компресија.

Слика 7.1.-1. Политропа

Политропата се изразува со равенката,

$$pV^n = \text{konst} . \quad (7.1.-1.)$$

Односите помеѓу големините на состојба p , V , T се добиваат со

помош на Равенката (7.1.-1.) и Равенката (6.1.-3.).

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_2^{n-1}}{V_1^{n-1}}, \quad (7.1.-2)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{p_1^{\frac{n-1}{n}}}{p_2^{\frac{n-1}{n}}}, \quad (7.1.-3.)$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2^n}{V_1^n}, \quad (7.1.-4)$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1^{\frac{n}{n-1}}}{T_2^{\frac{n}{n-1}}}, \quad (7.1.-5)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_1^{\frac{1}{n-1}}}{T_2^{\frac{1}{n-1}}}, \quad (7.1.-6)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1^{\frac{1}{n}}}{p_2^{\frac{1}{n}}}. \quad (7.1.-7)$$

7.2. ИЗОТЕРМА

Промената на состојба при константна температура претставува една хипотетичка промена. Теоретски претпоставки за настанување на таква промена се бесконечно малата брзина на ширењето на гасот, што овозможува внесување на топлина од околината на гасот при температурна разлика која се стреми кон нула и константна температура на околината што овозможува и температурата на гасот при ширењето да остане константна.

Изотермата се изразува со равенката,

$$pV = \text{konst}. \quad (7.2.-1.)$$

Изотермата е графички претставена на Слика 7.2.-1.. Таа е крива симетрично поставена во однос на координатните оски.

Бидејќи при изотермна промена температурата не се менува, внатрешната енергија останува иста.

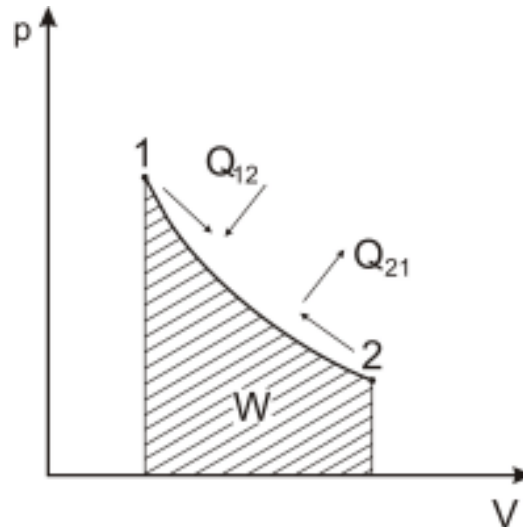
Од првиот закон на термодинамиката,

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + W_{12},$$

се добива,

$$Q_{12} = W_{12}. \quad (7.2.-2.)$$

а тоа значи дека целото количество на топлина се користи за вршење на работа.



1 - 2 Изотермна експанзија,
2 -1 Изотермна компресија.

Слика 7.2.-1. Изотерма

7.3. ИЗОХОРА

Изохора е промена на состојба при константен волумен.

Таа се изразува со равенката,

$$V = \text{konst}. \quad (7.3.-1.)$$

Промената на состојба при константен волумен графички е претставена на Слика 7.3.-1..

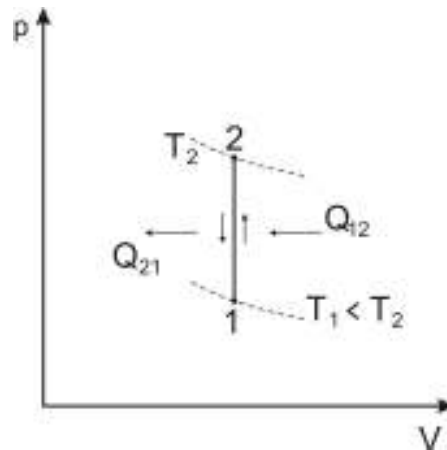
Ако не се менува волуменот не се врши работа. Тогаш, од првиот закон на термодинамиката,

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + W_{12},$$

се добива,

$$Q_{12} = U_2 - U_1 = mc_v(T_2 - T_1). \quad (7.3.-2.)$$

При изохорна промена на состојба целото количество на топлина се користи за промена на внатрешната енергија.



- 1 - 2 Изохорно зголемување на внатрешната енергија,
 2 - 1 Изохорно намалување на внатрешната енергија.

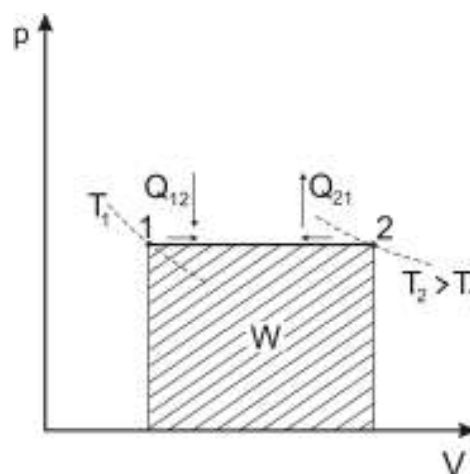
Слика 7.3.-1. Изохора

7.4. ИЗОБАРА

Промената на состојба при константен притисок се именува изобара. Таа се претставува со равенката,

$$p = \text{konst} . \quad (7.4.-1.)$$

Изобарата е графички покажана на Слика 7.4.-1.



- 1 - 2 Изобарна експанзија,
 2 - 1 Изобарна компресија.

Слика 7.4.-1. Изобара

Од првиот закон на термодинамиката,

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + W_{12},$$

се добива,

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + p(V_2 - V_1), \quad (7.4.-2.)$$

или,

$$Q_{12} = I_2 - I_1 = mc_p(T_2 - T_1). \quad (7.4.-3.)$$

При изобарната експанзија еден дел од донесената топлина се троши за зголемување на внатрешната енергија, а другиот дел за вршење на работа.

7.5. АДИЈАБАТА

Промената на состојба без пренос на топлина помеѓу гасот и околината се именува адијабата.

Адијабатата е хипотетична промена на состојба.

За да нема пренос на топлина кон или од околината треба или изолацијата да е совршена или преносот на топлината да се одвива со голема брзина, за да нема време за негово одвивање. И двата случаја се теоретски, но адијабатата се користи како граничен случај.

Адијабатата се претставува со изразот,

$$pV^\kappa = \text{konst}. \quad (7.5.-1.)$$

Графички израз на адијабатската промена е даден на Слика 7.5.-1..

Од првиот закон на термодинамиката,

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + W_{12},$$

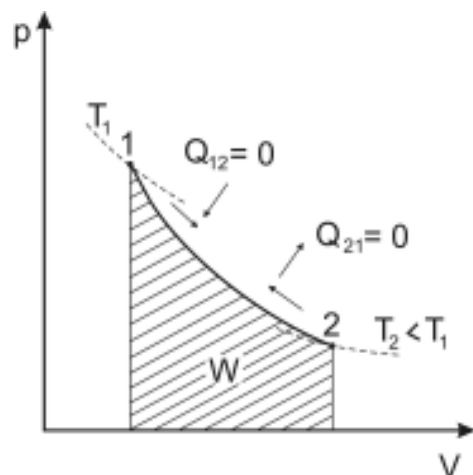
за адијабатската промена се добива,

$$W_{12} = U_1 - U_2. \quad (7.5.-2.)$$

При адијабатската експанзија работата се добива само од внатрешната енергија.

Добиената работа при адијабатска експанзија се изразува преку равенката,

$$W_{12} = \frac{p_1 V_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]. \quad (7.5.-3.)$$



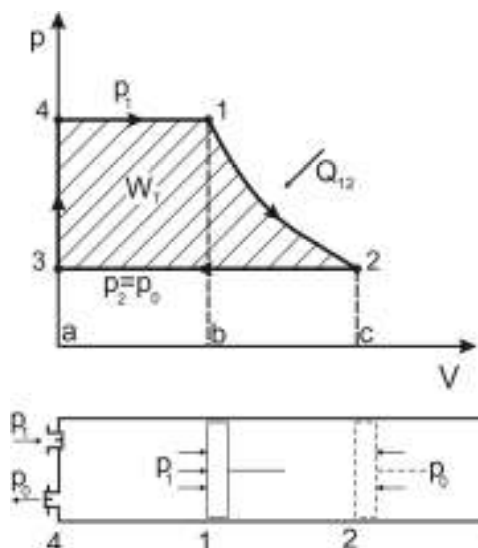
1 - 2 Адијабатска експанзија,
2 - 1 Адијабатска компресија.

Слика 7.5.-1. Адијабата

8. ПРОЦЕСИ СО ГАСОВИ

8.1. ПРОЦЕС ПОМЕЃУ КОНСТАНТНИ ПРИТИСОЦИ

Процесот помеѓу константни притисоци, за отворен систем, е претставен на Слика 8.1.-1..



Слика 8.1.-1. Процес помеѓу константни притисоци (отворен систем)

Гас се внесува при константен висок притисок, се искористува со изотермна експанзија и на атмосферски притисок се исфрлува во околината.

Цилиндарот се полни со компримиран воздух на притисок p_1 , од точка 1 до точка 2 се добива работа на експанзија, а потоа воздухот се исфрлува во атмосферата.

Добиената работа е претставена со површините 41ba и 12cb, а потрошената работа со површината 32ca.

Нето добиената работа во еден циклус е 4123.

Оваа работа помеѓу два константни притисоци е именувана "техничка работа",

$$W_T = p_1 V_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = W_{12}. \quad (8.1.-1.)$$

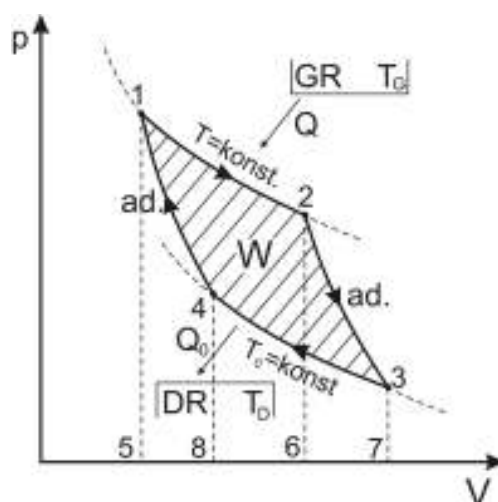
За изотермната експанзија работата е еднаква на техничката ра-

бота (изотермата е симетрична крива во однос на координатните оски p и V).

8.2. КРУЖНИ ПРОЦЕСИ

Процес што е добиен со комбинирање на неколку промени на состојби, така што системот има идентична почетна и крајна состојба се именува "кружен процес".

На Слика 8.2.-1. е покажан Карнотовиот кружен процес.



Слика 8.2.-1. Карнотов кружен процес

Тоа е идеален процес кој не може да се реализира, но нуди најголема термичка ефикасност при претворувањето на топлината во работа, кога се реализира помеѓу два топлински резервоари со одредени температури.

Тој е составен од две изотерми и две адијабати.

Како работно средство се употребува идеален гас.

При изотермната експанзија од состојба 1 до состојба 2, од горниот топлински резервоар се зема топлината Q која се внесува во работното средство. Константната температура на горниот резервоар на топлина, T_G , е бесконечно малку повисока од температурата на работното средство, T .

Од состојба 2 до состојба 3, при адијабатска експанзија се добива

работа, а температурата на работното средство се намалува од T на T_0 .

Третата промена на состојба е изотермната компресија од состојба 3 до состојба 4, при која долниот топлински резервоар ја прима топлината Q_0 .

Температурата на долниот топлински резервоар T_0 е бесконечно малку пониска од температурата на работното средство T_0 .

Со адијабатска компресија од состојба 4 до состојба 1 се затвора кружниот процес.

Во кружниот процес се добива работа W , претставена со површината 1234.

Графички илустрирано, од добиената работа при изотермната експанзија, површина 1265, и адијабатската експанзија, површина 2376, се одзема изгубената работа за изотермната компресија, површина 4378, и за адијабатската компресија, површина 1485.

Работата W се добива како разлика на внесената топлина во работното средство Q и изнесената топлина Q_0 ,

$$\begin{aligned} W &= Q - Q_0 = \\ &= mR(T \ln \frac{V_2}{V_1} - T_0 \ln \frac{V_3}{V_4}) \end{aligned} \quad (8.2.-1.)$$

За топлинска машина термичкиот коефициент на корисно дејство е,

$$\eta_t = \frac{W}{Q} = \frac{Q - Q_0}{Q} = \frac{T - T_0}{T} = 1 - \frac{T_0}{T} \quad (8.2.-2.)$$

Следува дека термичката ефикасност на Карнотовиот кружен процес зависи само од температурите на двата топлински резервоара. Тоа значи дека термичарот треба да се стреми кон повисока температура на горниот топлински резервоар и кон пониска температура на долниот топлински резервоар.

Бидејќи долен топлински резервоар обично е околината, чија температура е одредена, поголема термичка ефикасност треба да се бара со зголемување на температурата на топлинскиот извор.

Но, во примената на високи температури, термичарот е ограничен со нивното поднесување од страна на конструктивните материјали.

Карнотовиот кружен процес не може да се изведе бидејќи кај ре-

алните кружни процеси преносот на топлина се одвива при конечни температурни разлики, а не при бесконечно мали, и второ, работното средство е реален, а не идеален гас.

Други кружни процеси, што се познати во термиката се кружните процеси именувани по нивните автори: Joule, Otto, Diesel, Ericsson и Sabathé. Тие се составени од следните промени на состојба:

Joule - изобара, адијабата, изобара, адијабата,

Otto - изохора, адијабата, изохора, адијабата,

Diesel - изобара, адијабата, изохора, адијабата,

Ericsson - изобара, изотерма, изобара, изотерма,

Sabathé - изохора, изобара, адијабата, изохора, адијабата.

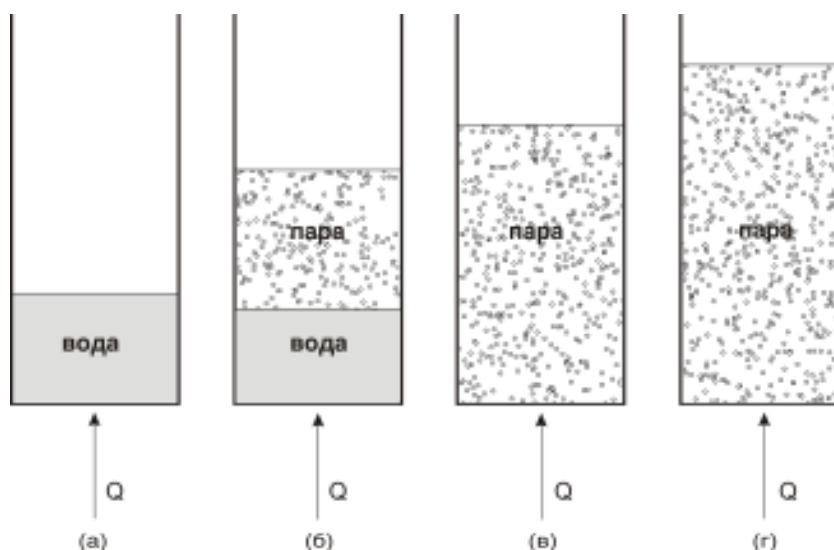
Ако промените на состојба во Карнотовиот кружен процес од Слика 8.2.-1. се одвиваат во обратна насока се добива Карнотовиот кружен процес на топлинска пумпа.

9. ВОДНА ПАРА

9.1. ИСПАРУВАЊЕ

Испарувањето е процес на создавање на водна пара од вода под влијание на топлина.

На Слика 9.1.-1. покажано е испарувањето на водата во четири состојби.



Слика 9.1.-1. Испарување на вода

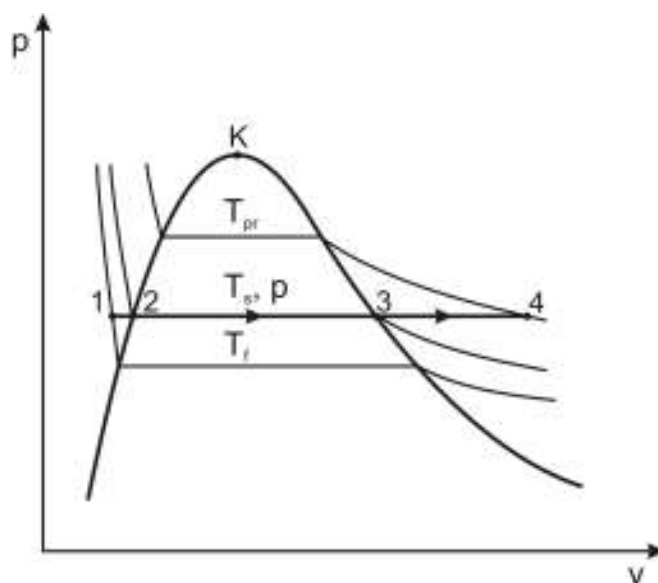
Во отворен сад се грее вода. Во почетната состојба (а) во садот има само вода, во состојбата (б) еден дел од водата е испарен, во состојбата (в) целата вода е испарена, а во состојбата (г) водната пара се грее и шири како и секој друг гас.

Мерењето на температурата покажува дека од моментот на започнување на испарувањето до моментот кога ќе испари и последната капка вода, таа изнесува 100 °C.

Во состојбата (в) водната пара се именува “сувозаситена водна пара”, а во состојбата (г) “прегреана водна пара”.

Кога испарувањето се врши во затворен сад на повисок притисок од атмосферскиот и температурата на испарување е повисока од 100 °C.

Процесот на испарување при константен притисок покажан е на Слика 9.1.-2., во $p-v$ дијаграм.



1 - вода, 3 - сувозаситена водна пара,
2 - врела вода, 4 - прегреана водна пара.

Слика 9.1.-2. Испарување на вода при константен притисок

Кривата лево од точката К се именува “долна гранична крива”, а кривата десно од точката К се именува “горна гранична крива”. Помеѓу долната и горната гранична крива се наоѓа течно-парното подрачје.

Сите големини на состојба на врелата вода се означуваат како примарни: u' , i' , s' , а сите големини на состојба на сувозаситената водна пара се означуваат како секундарни: u'' , i'' , s'' .

Ладната вода од состојба 1, се грее до врела вода, состојба 2. Тука водата ќе постигне температура од $100\text{ }^\circ\text{C}$ и истата температура ќе ја задржи до крајот на испарувањето. Во состојба 3 нема вода. Таа е целосно испарена, а добиената водна пара е сувозаситена водна пара на $100\text{ }^\circ\text{C}$. Во состојба 4 прегреаната водна пара има повисока температура од $100\text{ }^\circ\text{C}$.

Подрачјето помеѓу состојбите 2 и 3 е течно-парно. Тоа е смеса од вода и пара на константна температура и константен притисок.

Топлината што е потребна за испарување на водата, од врела вода до сувозаситена водена пара е,

$$r = i'' - i'. \quad (9.1.-1.)$$

Оваа топлина на испарување е помала за повисоки притисоци на испарување. Таа се одредува со помош на табелите за водна пара.

Како критична точка (К) е означена состојбата во која сите својства на врелата вода и сувозаситената водна пара се еднакви. Таа се означува со критична температура t_k , критичен притисок p_k и критичен волумен v_k .

За температури повисоки од t_k воопшто не може да се означат граница помеѓу течната и гасната фаза на водата.

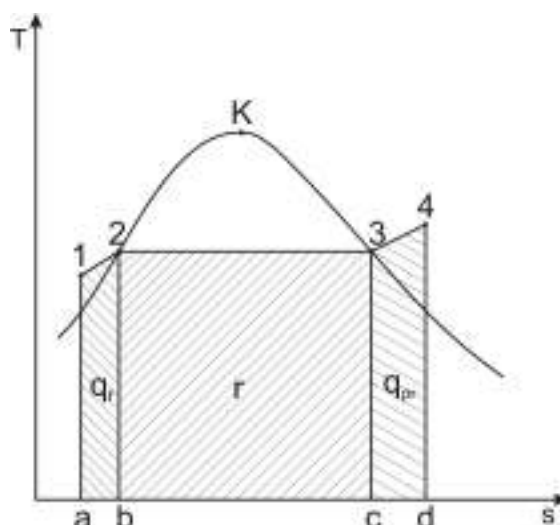
За температури пониски од t_k се појавува течно-парно подрачје помеѓу долната и горната гранична крива.

Критичната состојба е посебно важна за втечнувањето на гасовите. За да се втечни некој гас, тој мора да се олади на температура пониска од критичната.

Термодинамичките својства на водата и водната пара во течно-парното подрачје дадени се во Табела 9.1.-1..

Термодинамичките промени на водната пара се следат во $p-v$, $T-s$ и $i-s$ дијаграм.

Во $T-s$ дијаграм површините под кривата на испарување ги претставуваат топлините, Слика 9.1.-3..



Слика 9.1.-3. $T-s$ дијаграм за испарување

Површината 12ba ја претставува топлината на загревање на водата (q_f), површината 23cb ја претставува топлината на испарување (r), а површината 34dc ја претставува топлината на прегревање на водната пара (q_{pr}).

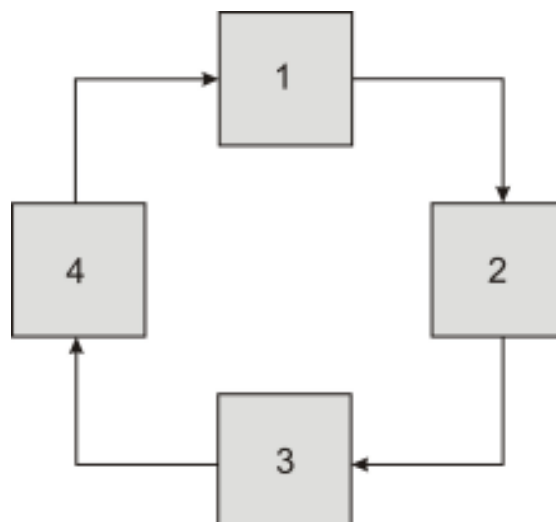
Вкупната донесена топлина е,

$$q = q_f + r + q_{pr} . \quad (9.1.-2.)$$

$i-s$ дијаграмот е основниот дијаграм за пресметките на промените на состојбите на водната пара. Со него во практиката се решаваат сите задачи што се поставуваат пред термичарите. Овој дијаграм се именува “Молиеров дијаграм” по неговиот автор Mollier, кој прв го поставил во 1904 година.

9.2. ПАРНА ПОСТРОЈКА

Парната постројка има четири основни елементи: котел, турбина, кондензатор и напојна пумпа, Слика 9.2.-1..



1 - парен котел, 2 - парна турбина, 3 - кондензатор, 4 - напојна пумпа

Слика 9.2.-1. Парна постројка

Произведената водна пара од котелот (1) се искористува во турбината (2), потоа во кондензаторот (3) кондензира, односно се враќа во течна состојба и се внесува во котелот со помош на напојна пумпа (4).

Табела 9.1.-1. Термодинамички својства на вода и водна пара

t, °C	p _{s,t} , kPa	Специфичен волумен, m ³ /kg _w			Специфична енталпија, kJ/kg _w			Специфична ентропија, kJ/(kg _w , K)		
		v'	v _{lg}	v''	i'	г	i''	s'	s _{lg}	s''
0	0,6112	0,001000	206,141	206,143	- 0,04	2500,81	2500,77	- 0,0002	9,1555	9,1553
1	0,6571	0,001000	192,455	192,456	4,18	2498,43	2502,61	0,0153	9,1134	9,1286
2	0,7060	0,001000	179,769	179,770	8,39	2496,05	2504,45	0,0306	9,0716	9,1022
3	0,7580	0,001000	168,026	168,027	12,60	2493,68	2506,28	0,0459	9,0302	9,0761
4	0,8135	0,001000	157,137	157,138	16,81	2491,31	2508,12	0,0611	8,9890	9,0501
5	0,8725	0,001000	147,032	147,033	21,02	2488,94	2509,96	0,0763	8,9482	9,0244
6	0,9373	0,001000	137,653	137,654	25,22	2486,57	2511,79	0,0913	8,9077	8,9990
7	1,0020	0,001000	128,947	128,948	29,42	2484,20	2513,62	0,1064	8,8674	8,9738
8	1,0728	0,001000	120,850	120,851	33,62	2481,84	2515,46	0,1213	8,8273	8,9488
9	1,1481	0,001000	113,326	113,327	37,82	2479,47	2517,29	0,1362	8,7878	8,9240
10	1,2280	0,001000	106,328	106,329	42,01	2477,11	2519,12	0,1511	8,7484	8,8995
11	1,3127	0,001001	99,812	99,813	46,21	2474,74	2520,95	0,1659	8,7093	8,8752
12	1,4026	0,001001	93,743	93,744	50,40	2472,38	2522,78	0,1806	8,6705	8,8511
13	1,4978	0,001001	88,088	88,089	54,59	2470,02	2524,61	0,1953	8,6319	8,8272
14	1,5987	0,001001	82,815	82,816	58,78	2467,66	2526,44	0,2099	8,5936	8,8035
15	1,7055	0,001001	77,897	77,898	62,97	2465,30	2528,26	0,2244	8,5556	8,7801
16	1,8184	0,001001	73,307	73,308	67,16	2462,93	2530,09	0,2389	8,5178	8,7568
17	1,9380	0,001001	69,021	69,022	71,34	2460,57	2531,92	0,2534	8,4804	8,7338
18	2,0643	0,001002	65,017	65,018	75,53	2458,21	2533,74	0,2678	8,4431	8,7109
19	2,1978	0,001002	61,272	61,273	79,72	2455,85	2535,56	0,2821	8,4061	8,6883
20	2,3388	0,001002	57,774	57,773	83,90	2453,48	2537,38	0,2964	8,3694	8,6658
21	2,4877	0,001002	54,499	54,500	88,08	2451,12	2539,20	0,3107	8,3329	8,6436
22	2,6448	0,001002	51,433	51,434	92,27	2448,75	2541,02	0,3249	8,2967	8,6215
23	2,8104	0,001003	48,562	48,563	96,45	2446,39	2542,84	0,3390	8,2607	8,5996
24	2,9851	0,001003	45,872	45,873	100,63	2444,02	2544,65	0,3531	8,2249	8,5780
25	3,1692	0,001003	43,350	43,351	104,81	2441,66	2546,47	0,3672	8,1894	8,5565
26	3,3631	0,001003	40,985	40,986	108,99	2439,29	2548,28	0,3812	8,1541	8,5352
27	3,5673	0,001004	38,766	38,767	113,18	2436,92	2550,09	0,3951	8,1190	8,5141
28	3,7822	0,001004	36,682	36,683	117,36	2434,55	2551,90	0,4090	8,0842	8,4932
29	4,0083	0,001004	34,726	34,727	121,54	2432,17	2553,71	0,4229	8,0496	8,4724
30	4,2460	0,001004	32,889	32,889	125,72	2429,80	2555,52	0,4367	8,0152	8,4519
31	4,4959	0,001005	31,160	31,161	129,90	2427,43	2557,32	0,4505	7,9810	8,4315
32	4,7585	0,001005	29,535	29,536	134,08	2425,05	2559,13	0,4642	7,9471	8,4112
33	5,0343	0,001005	28,006	28,007	138,26	2422,67	2560,93	0,4779	7,9133	8,3912
34	5,3239	0,001006	26,567	26,568	142,44	2420,29	2562,73	0,4915	7,8790	8,3713
35	5,6278	0,001006	25,212	25,213	146,62	2417,91	2564,53	0,5051	7,8465	8,3516
36	5,9466	0,001006	23,935	23,936	150,80	2415,53	2566,33	0,5186	7,8134	8,3320
37	6,2810	0,001007	22,733	22,734	154,98	2413,14	2568,12	0,5321	7,7805	8,3127
38	6,6315	0,001007	21,599	21,600	159,16	2410,76	2569,91	0,5456	7,7479	8,2934
39	6,9987	0,001008	20,529	20,530	163,34	2408,37	2571,71	0,5590	7,7154	8,2744
40	7,3835	0,001008	19,520	19,521	167,52	2405,98	2573,50	0,5724	7,6831	8,2555
41	7,7863	0,001008	18,567	18,568	171,70	2403,58	2575,28	0,5857	7,6510	8,2367
42	8,2080	0,001009	17,667	17,668	175,88	2401,19	2577,07	0,5990	7,6191	8,2181
43	8,6492	0,001009	16,818	16,819	180,06	2398,79	2578,85	0,6122	7,5875	8,1997
44	9,1107	0,001010	16,014	16,015	184,24	2396,39	2580,63	0,6254	7,5560	8,1814
45	9,5932	0,001010	15,255	15,256	188,42	2393,99	2582,41	0,6386	7,5247	8,1632
46	10,0976	0,001010	14,537	14,538	192,60	2391,59	2584,19	0,6517	7,4936	8,1452
47	10,6246	0,001011	13,858	13,859	196,78	2389,18	2585,96	0,6648	7,4626	8,1274
48	11,1751	0,001011	13,214	13,215	200,97	2386,77	2587,74	0,6778	7,4319	8,1097
49	11,7500	0,001012	12,606	12,607	205,15	2384,36	2589,51	0,6908	7,4013	8,0921
50	12,3499	0,001012	12,029	12,029	209,33	2381,94	2591,27	0,7038	7,3709	8,0747
51	12,9759	0,001013	11,482	11,483	213,51	2379,53	2593,04	0,7167	7,3407	8,0574
52	13,6290	0,001013	10,964	10,965	217,70	2377,10	2594,80	0,7296	7,3107	8,0403
53	14,3100	0,001014	10,473	10,474	221,88	2374,68	2596,56	0,7424	7,2809	8,0233
54	15,0200	0,001014	10,007	10,008	226,06	2372,26	2598,32	0,7552	7,2512	8,0064
55	15,7597	0,001015	9,563	9,563	230,25	2369,83	2600,07	0,7680	7,2217	7,9897
56	16,5304	0,001015	9,147	9,1468	234,43	2367,39	2601,82	0,7807	7,1924	7,9731
57	17,3331	0,001016	8,748	8,7489	238,61	2364,96	2603,57	0,7934	7,1632	7,9566
58	18,1690	0,001016	8,3690	8,3700	242,80	2362,52	2605,32	0,8061	7,1342	7,9403
59	19,0387	0,001017	8,0094	8,0114	246,99	2360,08	2607,06	0,8187	7,1054	7,9240
60	19,944	0,001017	7,6677	7,6697	251,17	2357,63	2608,80	0,8313	7,0767	7,9079
61	20,885	0,001018	7,3428	7,3438	255,36	2355,19	2610,54	0,8438	7,0482	7,8920
62	21,864	0,001018	7,0337	7,0347	259,54	2352,73	2612,28	0,8563	7,0198	7,8761
63	22,882	0,001019	6,7397	6,7407	263,73	2350,28	2614,01	0,8688	6,9916	7,8604
64	23,940	0,001019	6,4599	6,4609	267,92	2347,82	2615,74	0,8812	6,9636	7,8448
65	25,040	0,001020	6,1935	6,1946	272,11	2345,36	2617,46	0,8936	6,9357	7,8293
66	26,180	0,001020	5,9397	5,9409	276,30	2342,89	2619,19	0,9060	6,9080	7,8140
67	27,366	0,001021	5,6982	5,6992	280,49	2340,42	2620,90	0,9183	6,8804	7,7987
68	28,596	0,001022	5,4680	5,4690	284,68	2337,95	2622,62	0,9306	6,8530	7,7836
69	29,873	0,001022	5,2485	5,2495	288,87	2335,47	2624,33	0,9429	6,8257	7,7686

70	31,198	0,001023	5,0392	5,0402	293,06	2332,99	2626,04	0,9551	6,7986	7,7537
71	32,572	0,001023	4,8396	4,8407	297,25	2330,50	2627,75	0,9673	6,7716	7,7389
72	33,997	0,001024	4,6492	4,6502	301,44	2328,01	2629,45	0,9795	6,7448	7,7242
73	35,475	0,001025	4,4675	4,4685	305,63	2325,51	2631,15	0,9916	6,7181	7,7097
74	37,006	0,001025	4,2940	4,2951	309,83	2323,02	2632,84	1,0037	6,6915	7,6952
75	38,592	0,001026	4,1284	4,1294	314,02	2320,51	2634,53	1,0157	6,6651	7,6809
76	40,236	0,001026	3,9702	3,9712	318,22	2318,01	2636,22	1,0278	6,6389	7,6666
77	41,938	0,001027	3,8190	3,8201	322,41	2315,49	2637,90	1,0398	6,6127	7,6525
78	43,700	0,001028	3,6746	3,6756	326,61	2312,98	2639,58	1,0517	6,5867	7,6384
79	45,524	0,001028	3,5365	3,5375	330,81	2310,46	2641,26	1,0636	6,5609	7,6245
80	47,412	0,001029	3,4044	3,4055	335,00	2307,93	2642,93	1,0755	6,5351	7,6107
81	49,364	0,001030	3,2781	3,2792	339,20	2305,40	2644,60	1,0874	6,5095	7,5969
82	51,384	0,001030	3,1573	3,1583	343,40	2302,86	2646,26	1,0993	6,4841	7,5833
83	53,473	0,001031	3,0417	3,0427	347,60	2300,32	2647,92	1,1111	6,4587	7,5698
84	55,633	0,001032	2,9310	2,9320	351,80	2297,78	2649,58	1,1228	6,4335	7,5563
85	57,865	0,001032	2,8250	2,8260	356,01	2295,22	2651,23	1,1346	6,4084	7,5430
86	60,171	0,001033	2,7235	2,7245	360,21	2292,67	2652,88	1,1463	6,3834	7,5297
87	62,554	0,001034	2,6263	2,6273	364,41	2290,11	2654,52	1,1580	6,3586	7,5166
88	65,015	0,001035	2,5331	2,5341	368,62	2287,54	2656,16	1,1696	6,3339	7,5035
89	67,556	0,001035	2,4438	2,4448	372,82	2284,97	2657,79	1,1812	6,3093	7,4905
90	70,180	0,001036	2,3582	2,3592	377,03	2282,39	2659,42	1,1928	6,2848	7,4776
91	72,888	0,001037	2,2760	2,2771	381,24	2279,81	2661,04	1,2044	6,2605	7,4648
92	75,683	0,001037	2,1973	2,1983	385,45	2277,22	2662,66	1,2159	6,2362	7,4521
93	78,566	0,001038	2,1217	2,1228	389,66	2274,62	2664,28	1,2274	6,2121	7,4395
94	81,541	0,001039	2,0492	2,0502	393,87	2272,02	2665,89	1,2389	6,1881	7,4270
95	84,608	0,001040	1,9796	1,9806	398,08	2269,41	2667,49	1,2504	6,1642	7,4146
96	87,770	0,001040	1,9128	1,9138	402,29	2266,80	2669,09	1,2618	6,1404	7,4022
97	91,030	0,001041	1,8486	1,8496	406,51	2264,18	2670,69	1,2732	6,1168	7,3899
98	94,390	0,001042	1,7869	1,7880	410,72	2261,55	2672,28	1,2845	6,0931	7,3777
99	97,852	0,001044	1,7277	1,7287	414,94	2258,92	2673,86	1,2959	6,0697	7,3656
100	101,419	0,001044	1,6708	1,6718	419,16	2256,28	2675,44	1,3072	6,0464	7,3536
101	105,092	0,001044	1,6161	1,6171	423,38	2253,64	2677,02	1,3185	6,0232	7,3416
102	108,875	0,001045	1,5635	1,5645	427,60	2250,99	2678,58	1,3297	6,0000	7,3298
103	112,770	0,001046	1,5129	1,5139	431,82	2248,33	2680,15	1,3410	5,9770	7,3180
104	116,779	0,001047	1,4642	1,4652	436,04	2245,66	2681,71	1,3522	5,9541	7,3062
105	120,906	0,001047	1,4174	1,4184	440,27	2242,99	2683,26	1,3634	5,9313	7,2946
106	125,152	0,001048	1,3723	1,3734	444,49	2240,31	2684,80	1,3745	5,9086	7,2830
107	129,520	0,001049	1,3290	1,3300	448,72	2237,63	2686,35	1,3856	5,8860	7,2716
108	134,012	0,001050	1,2872	1,2883	452,95	2234,93	2687,88	1,3967	5,8635	7,2601
109	138,633	0,001051	1,2470	1,2481	457,18	2232,23	2689,41	1,4078	5,8410	7,2488
110	143,384	0,001052	1,2083	1,2093	461,41	2229,52	2690,93	1,4188	5,8187	7,2375
111	148,267	0,001052	1,1710	1,1720	465,64	2226,81	2692,45	1,4298	5,7965	7,2263
112	153,278	0,001053	1,1350	1,1361	469,88	2224,09	2693,96	1,4408	5,7744	7,2152
113	158,445	0,001054	1,1004	1,1015	474,11	2221,35	2695,47	1,4518	5,7524	7,2042
114	163,745	0,001055	1,0670	1,0681	478,35	2218,62	2696,97	1,4627	5,7304	7,1931
115	169,190	0,001056	1,0348	1,0359	482,59	2215,87	2698,46	1,4737	5,7086	7,1822
116	174,782	0,001057	1,0038	1,0048	486,83	2213,12	2699,95	1,4846	5,6868	7,1714
117	180,525	0,001058	0,9739	0,9749	491,07	2210,35	2701,43	1,4954	5,6652	7,1606
118	186,420	0,001059	0,9450	0,9460	495,32	2207,58	2702,90	1,5063	5,6436	7,1499
119	192,473	0,001059	0,9171	0,9182	499,56	2204,80	2704,37	1,5171	5,6221	7,1392
120	198,685	0,001060	0,8902	0,8913	503,81	2202,02	2705,83	1,5279	5,6007	7,1286
122	211,601	0,001062	0,8391	0,8402	512,31	2196,42	2706,73	1,5494	5,5582	7,1076
124	225,194	0,001064	0,7916	0,7927	520,82	2190,78	2711,60	1,5709	5,5160	7,0869
126	239,490	0,001066	0,7472	0,7483	529,33	2185,11	2714,44	1,5922	5,4742	7,0664
128	254,515	0,001068	0,7057	0,7068	537,86	2179,40	2717,26	1,6135	5,4326	7,0461
130	270,298	0,001070	0,6670	0,6681	546,39	2173,66	2720,05	1,6347	5,3914	7,0261
132	286,866	0,001072	0,6308	0,6318	554,93	2167,87	2722,80	1,6557	5,3505	7,0063
134	304,247	0,001074	0,5969	0,5979	563,48	2162,05	2725,53	1,6767	5,3099	6,9867
136	322,470	0,001076	0,5651	0,5662	572,04	2156,18	2728,22	1,6977	5,2697	6,9673
138	341,566	0,001078	0,5354	0,5364	580,60	2150,28	2730,88	1,7185	5,2296	6,9481
140	361,565	0,001080	0,5075	0,5085	589,18	2144,33	2733,51	1,7393	5,1899	6,9292
142	382,497	0,001082	0,4813	0,4824	597,76	2138,34	2736,11	1,7599	5,1505	6,9104
144	404,394	0,001084	0,4567	0,4578	606,36	2132,31	2738,67	1,7805	5,1113	6,8918
146	427,288	0,001086	0,4336	0,4347	614,97	2126,23	2741,19	1,8011	5,0724	6,8735
148	451,211	0,001088	0,4119	0,4130	623,58	2120,10	2743,68	1,8215	5,0338	6,8553
150	476,198	0,001091	0,3914	0,3925	632,21	2113,92	2746,13	1,8419	4,9954	6,8373
152	502,281	0,001093	0,3722	0,3733	640,85	2107,70	2748,55	1,8622	4,9573	6,8194
154	529,495	0,001095	0,3541	0,3552	649,50	2101,43	2750,93	1,8824	4,9194	6,8017
156	557,875	0,001097	0,3370	0,3381	658,16	2095,11	2753,27	1,9026	4,8817	6,7842
158	587,456	0,001100	0,3209	0,3220	666,83	2088,73	2755,57	1,9226	4,8443	6,7669
160	618,275	0,001102	0,3058	0,3069	675,52	2082,31	2757,82	1,9427	4,8070	6,7497

(-, 2005a)

10. ВОЗДУХ

10.1. СОСТАВ И ЗАСИТУВАЊЕ НА ВОЗДУХ

Во термодинамиката се користат три поими за воздух: атмосферски воздух, сув воздух и влажен воздух.

Атмосферски воздух е гас, на површината на Земјата, што содржи повеќе гасни компоненти, водна пара и разни загадувачи (дим, полен).

Сув воздух е атмосферски воздух без водна пара и разни загадувачи. За него може да се употребува и името чист сув воздух. Сувиот воздух има релативно константен состав. Мали промени кај некои од неговите компоненти, сепак се појавуваат во тек на време, за различни географски локации, за различни висини.

Во Табела 10.1.-1. е даден составот на сувиот воздух.

Азотот, кислородот, аргонот и јаглеродниот диоксид претставуваат 99,997 % од составот на сувиот воздух. Првите три компоненти се стабилни, додека јаглеродниот диоксид се менува во зависност од повеќе фактори: состојбата на вегетацијата, временските услови, загаденоста.

Влажен воздух е смеса од сув воздух и водна пара.

Сувиот воздух е непроменлива компонента, со состав што е стандардизиран (Табела 10.1.-1.).

Стандардизирањето е неопходно за да може да се определат единствени термодинамички својства на сувиот воздух и за да се обезбеди единственост во тестирањето, вреднувањето и примената на опремата и системите што користат влажен воздух.

Износот на втората компонента, водната пара, се менува од нула до максимална вредност која зависи од температурата и притисокот.

10.1.-1. СТАНДАРДНА АТМОСФЕРА

Во согласност со ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) стандардна е онаа атмосфера која на морско ниво има стандарна температура 15 °C, стандарден барометарски притисок 101325 Pa и густина 1,115 kg/m³. Таму каде што е таа

применлива, перформансите на опремата и системите се пресметуваат во однос на воздух со оваа густина.

Табела 10.1.-1. Состав на сув воздух (чист сув атмосферски воздух во близина на морско ниво) според ASHRAE

Компонента	Учество во %, волуменски
1. Азот (N ₂)	78,084
2. Кислород (O ₂)	20,9476
3. Аргон (Ar)	0,934
4. Јаглероден диоксид (CO ₂)	0,0314
5. Неон (Ne)	0,001818
6. Хелиум (He)	0,000524
7. Криптон (Kr)	0,000114
8. Ксенон (Xe)	0,0000087
9. Водород (H ₂)	0,00005
10. Метан (CH ₄)	0,00015
11. Азотен оксид (N ₂ O)	0,00005
12. Озон (O ₃)	лето: 0 до 0,000007
	зима: 0 до 0,000002
13. Сулфур диоксид (SO ₂)	0 до 0,0001
14. Азот диоксид (NO ₂)	0 до 0,000002
15. Амонијак (NH ₃)	0 до траги
16. Јаглероден моноксид (CO)	0 до траги
17. Радон (Rn)	$6 \cdot 10^{-13}$

(Olivieri, Singh, Lovodocky, 1996)

10.1.-2. ПРОМЕНА НА БАРОМЕТАРСКИОТ ПРИТИСОК И ТЕМПЕРАТУРАТА НА АТМОСФЕРСКИОТ ВОЗДУХ

Барометарскиот притисок и температурата на атмосферскиот воздух се менуваат со промена на надморската висина, локалните временски и географски услови. Во рамнина на површината на морето стандардната температура изнесува 15 °C, а стандардниот барометарски притисок 101325 Pa. Стандардните вредности за барометарскиот

притисок и за температурата се дадени во Табела 10.1.-2.

Вредностите покажани во таа табела може да се пресметаат според равенката,

$$p = 101325 (1 - 0,0000225577 \cdot Z)^{5,2559}, \quad (10.1.-1.)$$

каде што Z е надморска висина изразена во метри.

Температурата како функција од надморската висина може да се определи од равенката,

$$T = 288,15 - 0,0065 \cdot Z. \quad (10.1.-2.)$$

каде што Z е надморска висина изразена во метри.

Покажаните равенки даваат точни резултати ако се користат за надморска висина до 11000 m. На одредена географска локација, вредноста на барометарскиот притисок нема да се разликува значително од онаа покажана во Табела 10.1.-2., освен при некои невообичаени услови, додека пак атмосферската температура може да се менува во широки граници.

Табела 10.1.-2. Стандардни вредности за барометарскиот притисок и температурата на атмосферскиот воздух до 10000 m, според ASHRAE

Надморска висина, m	Температура, °C	Притисок, Pa
0	15	101325
500	11,8	95461
1000	8,5	89874
2000	2	79495
3000	-4,5	70108
4000	-11	61640
5000	-17,5	54020
6000	-24	47181
7000	-30,5	41061
8000	-37	35600
9000	-43,5	30742
10000	-50	26436

(-, 2009a)

10.1.-3. ЗАСИТУВАЊЕ НА ВЛАЖЕН ВОЗДУХ

Заситувањето на влажниот воздух е процес на негово приближување кон состојба на рамнотежа меѓу влажниот воздух и водната фаза.

Кога ќе ја постигне состојбата на заситеност влажниот воздух не може да прима повеќе влага и ја одделува на околните цврсти тела или честички со кои е во допир.

За водата во влажниот воздух, битни се поимите: топење, кондензација, сублимација, исхлапување.

Чистата вода може да постои во една или повеќе агрегатни состојби, и тоа: цврста, течна или гасовита. При постоење на две или повеќе агрегатни состојби од една супстанција кои коегзистираат во рамнотежа, секогаш ќе има површини на одделување меѓу фазите, односно меѓу агрегатните состојби. Кога на една супстанција во цврста агрегатна состојба, која се наоѓа на точка на топење, ќе и се додаде доволно количество на топлинска енергија доаѓа до зголемување на молекуларната активност. Тоа понатаму предизвикува ослабување на меѓумолекуларните врски и пренесување на молекулите низ површината на одделување во течната фаза. Се вели дека настанал процес на топење. Спротивниот процес, мрзнење, бара одземање на еквивалентен износ на енергија. Аналогно на тоа, промена на агрегатната состојба на единица маса течност во гасна фаза (испарување) бара доведување на одредено количество на топлинска енергија (топлина на испарување). Обратно, за да дојде до кондензација (промена од гасна во течна фаза), потребно е да се одземе топлината на испарување. Сублимацијата е промена на агрегатната состојба на некоја супстанција, директно од цврста во гасна фаза. Енергијата потребна за одвивање на тој процес е наречена топлина на сублимација. Со одземањето на топлината на сублимација настанува обратен процес, односно премин директно од гасна во цврста фаза.

Постои и таканаречена “динамичка рамнотежа”, меѓу било кои две фази од некоја супстанција, која значи дека бројот на молекули што преминуваат од една во друга фаза, по единица време и површина, е еднаков со соодветниот број на молекули што го извршуваат обратниот процес.

Најголемиот дел од водната пара што се наоѓа во земјината атмосфера не стигнува таму преку испарување, туку преку исхлапување. При исхлапувањето водата не врие, а сепак минува во гасна агрегатна состојба, односно водна пара. Исхлапувањето е предизвикано од разликата во притисокот, додека испарувањето се појавува како резултат на донесување на топлина. Во природата исхлапувањето од отворена водена површина во воздухот над неа се одвива при сите температури, а испарувањето само при температура од 100 °C.

10.2. ОСНОВНИ ГОЛЕМИНИ

Содржана влага (или однос на компонентите на влажен воздух) е однос на масата на водната пара и масата на сувиот воздух,

$$x = \frac{m_w}{m_{da}}, \quad (10.2.-1.)$$

каде m_w е масата на водната пара содржана во влажниот воздух, изразена во килограми, а m_{da} е масата на сувиот воздух содржан во влажниот воздух, изразена во килограми.

Ако масата се изрази преку молските фракции x_w и x_{da} , следи,

$$x = \frac{\mu_w x_w}{\mu_{da} x_{da}} = \frac{18,015 x_w}{28,9645 x_{da}} = \frac{0,622 x_w}{x_{da}}. \quad (10.2.-2.)$$

Специфична влажност е однос на масата на водната пара и масата на влажниот воздух,

$$\gamma = \frac{m_w}{(m_w + m_{da})}. \quad (10.2.-3.)$$

Сега важи,

$$\gamma = \frac{x}{(x + 1)}. \quad (10.2.-4.)$$

Апсолутна влажност (или густина на водната пара) е однос на масата на водната пара и волуменот на влажниот воздух,

$$d_v = \frac{m_w}{V}. \quad (10.2.-5.)$$

Густина на влажниот воздух е однос на масата на влажниот воздух и волуменот на влажниот воздух,

$$\rho = \frac{(m_{da} + m_w)}{V} = \frac{(1+x)}{v}, \quad (10.2.-6.)$$

каде v е специфичниот волумен на влажниот воздух изразен во m^3/kg_{da} ,

$$v = \frac{V}{m_{da}} = \frac{V}{28,9645 \cdot n_{da}}, \quad (10.2.-7.)$$

а n_{da} е бројот на молови на сувиот воздух. Вкупниот број на молови на влажниот воздух, n , е,

$$n = n_{da} + n_w. \quad (10.2.-8.)$$

Содржана влага на заситување е содржаната влага на заситен влажен воздух и се означува со x_s .

Степен на заситување е однос на содржаната влага и содржаната влага на заситување на истата температура и истиот притисок,

$$\mu = \frac{x}{x_s}. \quad (10.2.-9.)$$

Релативна влажност е однос на молската фракција на водната пара и молската фракција на водната пара на заситен влажен воздух, на иста температура и ист притисок,

$$\varphi = \frac{x_w}{x_{w,s}}. \quad (10.2.-10.)$$

Релативната влажност покажува колку е заситен влажниот воздух. Заситениот влажен воздух има релативна влажност 100 %, $\varphi = 1$.

Температура на точка на роса е температура на заситен влажен воздух, на притисок p , што се заситил при константна содржана влага.

Температура на влажен термометар, t^* , е температура при која водата (течна или цврста) со исплапување во влажниот воздух, што има температура на сув термометар t и содржана влага x , може да го одведе воздухот во адијабатско заситување, на иста температура t^* , а вкупниот притисок е константен.

10.3. ТЕРМОДИНАМИЧКИ СВОЈСТВА НА ВЛАЖЕН ВОЗДУХ

Во Табела 10.3.-1. се дадени термодинамичките својства на влажниот воздух.

Табелата е превземена од ASHRAE (-, 2009a).

Табела 10.3.-1. е развиена според равенките на Hyland и Wexler (Hyland, Wexler, 1983a, 1983b).

Табела 10.3.-1. ги содржи следниве големини,

- t - температура, во $^{\circ}\text{C}$,
- x_s - содржана влага на заситување,
- v_{da} - специфичен волумен на сув воздух, во m^3 / kg ,
- $v_{as} = v_s - v_{da}$, разлика помеѓу специфичниот волумен на заситен влажен воздух и специфичниот волумен на сув воздух, во $\text{m}^3 / \text{kg}_{da}$, на ист притисок и температура,
- v_s - специфичен волумен на заситен влажен воздух, во $\text{m}^3 / \text{kg}_{da}$,
- i_{da} - специфична енталпија на сув воздух, во $\text{kJ} / \text{kg}_{da}$,
- $i_{as} = i_s - i_{da}$, разлика на специфичната енталпија на заситен влажен воздух и специфичната енталпија на сув воздух, во $\text{kJ} / \text{kg}_{da}$, на ист притисок и температура,
- i_s - специфична енталпија на заситен влажен воздух, во $\text{kJ} / \text{kg}_{da}$,
- s_{da} - специфична ентропијата сув воздух, во $\text{kJ} / \text{kg}_{da} \text{ K}$,
- s_s - специфична ентропија на заситен влажен воздух, во $\text{kJ} / \text{kg}_{da} \text{ K}$.

Вредностите во Табела 10.3.-1. се дадени за стандарден атмосферски притисок, 101325 Pa.

Табела 10.3.-1. Термодинамички својства на влажен воздух при стандарден атмосферски притисок 101325 Pa

t , $^{\circ}\text{C}$	x_s , $\text{kg}_w/\text{kg}_{da}$	Специфичен волумен, $\text{m}^3/\text{kg}_{da}$			Специфична енталпија, kJ/kg_{da}			Специфична ентропија, $\text{kJ}/(\text{kg}_{da} \text{ K})$	
		v_{da}	v_{as}	v_s	i_{da}	i_{as}	i_s	s_{da}	s_s
- 60	0,0000067	0,6027	0,0000	0,6027	- 60,351	0,017	- 60,334	- 0,2495	- 0,2494
- 59	0,0000076	0,6056	0,0000	0,6056	- 59,344	0,018	- 59,326	- 0,2448	- 0,2447
- 58	0,0000087	0,6084	0,0000	0,6084	- 58,338	0,021	- 58,317	- 0,2401	- 0,2400
- 57	0,0000100	0,6113	0,0000	0,6113	- 57,332	0,024	- 57,308	- 0,2354	- 0,2353
- 56	0,0000114	0,6141	0,0000	0,6141	- 56,326	0,028	- 56,298	- 0,2308	- 0,2306
- 55	0,0000129	0,6170	0,0000	0,6170	- 55,319	0,031	- 55,288	- 0,2261	- 0,2260
- 54	0,0000147	0,6198	0,0000	0,6198	- 54,313	0,036	- 54,278	- 0,2215	- 0,2214
- 53	0,0000167	0,6226	0,0000	0,6227	- 53,307	0,041	- 53,267	- 0,2170	- 0,2168
- 52	0,0000190	0,6255	0,0000	0,6255	- 52,301	0,046	- 52,255	- 0,2124	- 0,2122
- 51	0,0000215	0,6283	0,0000	0,6284	- 51,295	0,052	- 51,243	- 0,2079	- 0,2076
- 50	0,0000243	0,6312	0,0000	0,6312	- 50,289	0,059	- 50,230	- 0,2033	- 0,2031

- 49	0,0000275	0,6340	0,0000	0,6341	- 49,283	0,067	- 49,216	- 0,1988	- 0,1985
- 48	0,0000311	0,6369	0,0000	0,6369	- 48,277	0,075	- 48,202	- 0,1944	- 0,1940
- 47	0,0000350	0,6397	0,0000	0,6398	- 47,271	0,085	- 47,186	- 0,1899	- 0,1895
- 46	0,0000395	0,6426	0,0000	0,6426	- 46,265	0,095	- 46,170	- 0,1855	- 0,1850
- 45	0,0000445	0,6454	0,0000	0,6455	- 45,259	0,108	- 45,151	- 0,1811	- 0,1805
- 44	0,0000500	0,6483	0,0001	0,6483	- 44,253	0,121	- 44,132	- 0,1767	- 0,1761
- 43	0,0000562	0,6511	0,0001	0,6512	- 43,247	0,137	- 43,111	- 0,1723	- 0,1716
- 42	0,0000631	0,6540	0,0001	0,6540	- 42,241	0,153	- 42,088	- 0,1679	- 0,1672
- 41	0,0000708	0,6568	0,0001	0,6569	- 41,235	0,172	- 41,063	- 0,1636	- 0,1628
- 40	0,0000793	0,6579	0,0001	0,6597	- 40,229	0,192	- 40,037	- 0,1592	- 0,1584
- 39	0,0000887	0,6625	0,0001	0,6626	- 39,224	0,216	- 39,007	- 0,1549	- 0,1540
- 38	0,0000992	0,6653	0,0001	0,6654	- 38,218	0,241	- 37,976	- 0,1507	- 0,1496
- 37	0,0001108	0,6682	0,0001	0,6683	- 37,212	0,270	- 36,942	- 0,1464	- 0,1452
- 36	0,0001237	0,6710	0,0001	0,6712	- 36,206	0,302	- 35,905	- 0,1421	- 0,1408
- 35	0,0001379	0,6739	0,0001	0,6740	- 35,200	0,336	- 34,864	- 0,1379	- 0,1364
- 34	0,0001536	0,6767	0,0002	0,6769	- 34,195	0,375	- 33,820	- 0,1337	- 0,1320
- 33	0,0001710	0,6796	0,0002	0,6798	- 33,189	0,417	- 32,772	- 0,1295	- 0,1276
- 32	0,0001902	0,6824	0,0002	0,6826	- 32,183	0,464	- 31,718	- 0,1253	- 0,1233
- 31	0,0002113	0,6853	0,0002	0,6855	- 31,178	0,517	- 30,661	- 0,1212	- 0,1189
- 30	0,0002346	0,6881	0,0003	0,6884	- 30,171	0,574	- 29,597	- 0,1170	- 0,1145
- 29	0,0002602	0,6909	0,0003	0,6912	- 29,166	0,636	- 28,529	- 0,1129	- 0,1101
- 28	0,0002883	0,6938	0,0003	0,6941	- 28,160	0,707	- 27,454	- 0,1088	- 0,1057
- 27	0,0003193	0,6966	0,0004	0,6970	- 27,154	0,782	- 26,372	- 0,1047	- 0,1013
- 26	0,0003533	0,6995	0,0004	0,6999	- 26,149	0,867	- 25,282	- 0,1006	- 0,0969
- 25	0,0003905	0,7023	0,0004	0,7028	- 25,143	0,959	- 24,184	- 0,0965	- 0,0924
- 24	0,0004314	0,7052	0,0005	0,7057	- 24,137	1,059	- 23,078	- 0,0925	- 0,0880
- 23	0,0004672	0,7080	0,0005	0,7086	- 23,132	1,171	- 21,961	- 0,0885	- 0,0835
- 22	0,0005251	0,7109	0,0006	0,7117	- 22,126	1,292	- 20,834	- 0,0845	- 0,0790
- 21	0,0005787	0,7137	0,0007	0,7144	- 21,120	1,425	- 19,695	- 0,0805	- 0,0745
- 20	0,0006373	0,7165	0,0007	0,7173	- 20,115	1,570	- 18,545	- 0,0765	- 0,0699
- 19	0,0007013	0,7194	0,0008	0,7202	- 19,109	1,729	- 17,380	- 0,0725	- 0,0653
- 18	0,0007711	0,7222	0,0009	0,7231	- 18,103	1,902	- 16,201	- 0,0686	- 0,0607
- 17	0,0008473	0,7251	0,0010	0,7261	- 17,098	2,092	- 15,006	- 0,0646	- 0,0560
- 16	0,0009303	0,7279	0,0011	0,7290	- 16,092	2,299	- 13,793	- 0,0607	- 0,0513
- 15	0,0010207	0,7308	0,0012	0,7320	- 15,086	2,524	- 12,562	- 0,0568	- 0,0465
- 14	0,0011191	0,7336	0,0013	0,7349	- 14,080	2,769	- 11,311	- 0,0529	- 0,0416
- 13	0,0012262	0,7364	0,0014	0,7379	- 13,075	3,036	- 10,039	- 0,0490	- 0,0367
- 12	0,0013425	0,7393	0,0016	0,7409	- 12,069	3,327	- 8,742	- 0,0452	- 0,0318
- 11	0,0014690	0,7421	0,0017	0,7439	- 11,063	3,642	- 7,421	- 0,0413	- 0,0267
- 10	0,0016062	0,7450	0,0019	0,7469	- 10,057	3,986	- 6,072	- 0,0375	- 0,0215
- 9	0,0017551	0,7478	0,0021	0,7499	- 9,052	4,358	- 4,693	- 0,0337	- 0,0163
- 8	0,0019166	0,7507	0,0023	0,7530	- 8,046	4,764	- 3,283	- 0,0299	- 0,0110
- 7	0,0020916	0,7535	0,0025	0,7560	- 7,040	5,202	- 1,838	- 0,0261	- 0,0055
- 6	0,0022811	0,7563	0,0028	0,7591	- 6,035	5,677	- 0,357	- 0,0223	- 0,0000
- 5	0,0024862	0,7592	0,0030	0,7622	- 5,029	6,192	1,164	- 0,0186	- 0,0057
- 4	0,0027081	0,7620	0,0033	0,7653	- 4,023	6,751	2,728	- 0,0148	- 0,0115
- 3	0,0029480	0,7649	0,0036	0,7685	- 3,017	7,353	4,336	- 0,0111	- 0,0175
- 2	0,0032074	0,7677	0,0039	0,7717	- 2,011	8,007	5,995	- 0,0074	- 0,0236
- 1	0,0034874	0,7705	0,0043	0,7749	- 1,006	8,712	7,706	- 0,0037	- 0,0299
0	0,0037895	0,7734	0,0047	0,7781	0,000	9,473	9,473	0,0000	- 0,0364
1	0,004076	0,7762	0,0051	0,7813	1,006	10,197	11203	0,0037	0,0427
2	0,004381	0,7791	0,0055	0,7845	2,012	10970	12982	0,0073	0,0492
3	0,004707	0,7819	0,0059	0,7878	3,018	11793	14811	0,0110	0,0559
4	0,005054	0,7848	0,0064	0,7911	4,024	12672	16696	0,0146	0,0627
5	0,005424	0,7876	0,0068	0,7944	5,029	13610	18639	0,0182	0,0697
6	0,005818	0,7904	0,0074	0,7978	6,036	14608	20644	0,0219	0,0769
7	0,006237	0,7933	0,0079	0,8012	7,041	15671	22713	0,0255	0,0843
8	0,006683	0,7961	0,0085	0,8046	8,047	16805	24852	0,0290	0,0919
9	0,007157	0,7990	0,0092	0,8081	9,053	18010	27064	0,0326	0,0997
10	0,007661	0,8018	0,0098	0,8116	10,059	19,293	29,352	0,0362	0,1078
11	0,008197	0,8046	0,0106	0,8152	11,065	20,658	31,724	0,0397	0,1162
12	0,008766	0,8075	0,0113	0,8188	12,071	22,108	34,179	0,0433	0,1248
13	0,009370	0,8103	0,0122	0,8225	13,077	23,649	36,726	0,0468	0,1337
14	0,010012	0,8132	0,0131	0,8262	14,084	25,286	39,370	0,0503	0,1430
15	0,010692	0,8160	0,0140	0,8300	15,090	27,023	42,113	0,0538	0,1525
16	0,011413	0,8188	0,0150	0,8338	16,096	28,867	44,963	0,0573	0,1624

17	0,012178	0,8217	0,0160	0,8377	17,102	30,824	47,926	0,0607	0,1726
18	0,012989	0,8245	0,0172	0,8417	18,108	32,900	51,008	0,0642	0,1832
19	0,013848	0,8274	0,0184	0,8457	19,114	35,101	54,216	0,0677	0,1942
20	0,014758	0,8302	0,0196	0,8498	20,121	37,434	57,555	0,0711	0,2057
21	0,015721	0,8330	0,0210	0,8540	21,127	39,908	61,035	0,0745	0,2175
22	0,016741	0,8359	0,0244	0,8583	22,133	42,527	64,660	0,0779	0,2298
23	0,017821	0,8387	0,0240	0,8627	23,140	45,301	68,440	0,0813	0,2426
24	0,018963	0,8416	0,0256	0,8671	24,146	48,239	72,385	0,0847	0,2559
25	0,020170	0,8444	0,0273	0,8717	25,153	51,347	76,500	0,0881	0,2698
26	0,021448	0,8472	0,0291	0,8764	26,159	54,638	80,798	0,0915	0,2842
27	0,022798	0,8501	0,0311	0,8811	27,165	58,120	85,285	0,0948	0,2992
28	0,024226	0,8529	0,0331	0,8860	28,172	61,804	89,976	0,0982	0,3148
29	0,025735	0,8558	0,0353	0,8910	29,179	65,699	94,878	0,1015	0,3311
30	0,027329	0,8586	0,0376	0,8962	30,185	69,820	100,006	0,1048	0,3418
31	0,029014	0,8614	0,0400	0,9015	31,192	74,177	105,369	0,1082	0,3658
32	0,030793	0,8643	0,0426	0,9069	32,198	78,780	110,979	0,1115	0,3842
33	0,032674	0,8671	0,0454	0,9125	33,205	83,652	116,857	0,1148	0,4035
34	0,034660	0,8700	0,0483	0,9183	34,212	88,799	123,011	0,1180	0,4236
35	0,036756	0,8728	0,0514	0,9242	35,219	94,236	129,455	0,1213	0,4446
36	0,038971	0,8756	0,0546	0,9303	36,226	99,983	136,209	0,1246	0,4666
37	0,041309	0,8785	0,0581	0,9366	37,233	106,058	143,290	0,1278	0,4895
38	0,043778	0,8813	0,0618	0,9431	38,239	112,474	150,713	0,1311	0,5135
39	0,046386	0,8842	0,0657	0,9498	39,246	119,258	158,504	0,1343	0,5386
40	0,049141	0,8870	0,0698	0,9568	40,253	126,430	166,683	0,1375	0,5649
41	0,052049	0,8898	0,0741	0,9640	41,261	134,005	175,265	0,1407	0,5923
42	0,055119	0,8927	0,0788	0,9714	42,268	142,007	184,275	0,1439	0,6211
43	0,058365	0,8955	0,0837	0,9792	43,275	150,475	193,749	0,1471	0,6512
44	0,061791	0,8983	0,0888	0,9872	44,282	159,417	203,699	0,1503	0,6828
45	0,065411	0,9012	0,0943	0,9955	45,289	168,874	214,164	0,1535	0,7159
46	0,069239	0,9040	0,1002	1,0042	46,296	178,882	225,179	0,1566	0,7507
47	0,073282	0,9069	0,1063	1,0132	47,304	189,455	236,759	0,1598	0,7871
48	0,077556	0,9097	0,1129	1,0226	48,311	200,644	248,955	0,1629	0,8253
49	0,082077	0,9125	0,1198	1,0323	49,319	212,485	261,803	0,1661	0,8655
50	0,086858	0,9154	0,1272	1,0425	50,326	225,019	275,345	0,1692	0,9077
51	0,091918	0,9182	0,1350	1,0532	51,334	238,290	289,624	0,1723	0,9521
52	0,097272	0,9211	0,1433	1,0643	52,341	252,340	304,682	0,1754	0,9988
53	0,102948	0,9239	0,1521	1,0760	53,349	267,247	320,596	0,1785	1,0480
54	0,108954	0,9267	0,1614	1,0882	54,357	283,031	337,388	0,1816	1,0998
55	0,115321	0,9296	0,1713	1,1009	55,365	299,772	355,137	0,1847	1,1544
56	0,122077	0,9324	0,1819	1,1143	56,373	317,549	373,922	0,1877	1,2120
57	0,129243	0,9353	0,1932	1,1284	57,381	336,417	393,798	0,1908	1,2728
58	0,136851	0,9381	0,2051	1,1432	58,389	356,461	414,850	0,1938	1,3370
59	0,144942	0,9409	0,2179	1,1588	59,397	377,788	437,185	0,1969	1,4050
60	0,15354	0,9438	0,2315	1,1752	60,405	400,458	460,863	0,1999	1,4768
61	0,16269	0,9466	0,2460	1,1926	61,413	424,624	486,036	0,2029	1,5530
62	0,17244	0,9494	0,2614	1,2109	62,421	450,377	512,798	0,2059	1,6337
63	0,18284	0,9523	0,2780	1,2303	63,429	477,837	541,266	0,2089	1,7194
64	0,19393	0,9551	0,2957	1,2508	64,438	507,177	571,615	0,2119	1,8105
65	0,20579	0,9580	0,3147	1,2726	65,446	538,548	603,995	0,2149	1,9074
66	0,21848	0,9608	0,3350	1,2958	66,455	572,116	638,571	0,2179	2,0106
67	0,23207	0,9636	0,3568	1,3204	67,463	608,103	675,566	0,2209	2,1208
68	0,24664	0,9665	0,3803	1,3467	68,472	646,724	715,196	0,2238	2,2385
69	0,26231	0,9693	0,4055	1,3749	69,481	688,261	757,742	0,2268	2,3646
70	0,27916	0,9721	0,4328	1,4049	70,489	732,959	803,448	0,2297	2,4996
71	0,29734	0,9750	0,4622	1,4372	71,498	781,208	852,706	0,2327	2,6448
72	0,31698	0,9778	0,4941	1,4719	72,507	833,335	905,842	0,2356	2,8010
73	0,33824	0,9807	0,5287	1,5093	73,516	889,807	963,323	0,2385	2,9696
74	0,36130	0,9835	0,5662	1,5497	74,525	951,077	1025,603	0,2414	3,1518
75	0,38641	0,9863	0,6072	1,5935	75,535	1017,841	1093,375	0,2443	3,3496
76	0,41377	0,9892	0,6519	1,6411	76,543	1090,628	1167,172	0,2472	3,5644
77	0,44372	0,9920	0,7010	1,6930	77,553	1170,328	1247,881	0,2501	3,7987
78	0,47663	0,9948	0,7550	1,7498	78,562	1257,921	1336,483	0,2530	4,0553
79	0,51284	0,9977	0,8145	1,8121	79,572	1354,347	1433,918	0,2559	4,3368
80	0,55295	1,0005	0,8805	1,8810	80,581	1461,200	1541,781	0,2587	4,6477
81	0,59751	1,0034	0,9539	1,9572	81,591	1579,961	1616,552	0,2616	4,9921

82	0,64724	1,0062	1,0360	2,0422	82,600	1712,547	1795,148	0,2644	5,3753
83	0,70311	1,0090	1,1283	2,1373	83,610	1861,548	1945,158	0,2673	5,8045
84	0,76624	1,0119	1,2328	2,2446	84,620	2029,983	2114,603	0,2701	6,2882
85	0,83812	1,0147	1,3518	2,3666	85,630	2221,806	2307,436	0,2729	6,8373
86	0,92062	1,0175	1,4887	2,5062	86,640	2442,036	2528,677	0,2757	7,4658
87	1,01611	1,0204	1,6473	2,6676	87,650	2697,016	2784,666	0,2785	8,1914
88	1,12800	1,0232	1,8333	2,8565	88,661	2995,890	3084,551	0,2813	9,0393
89	1,26064	1,0261	2,0540	3,0800	89,671	3350,254	3439,925	0,2841	10,0419
90	1,42031	1,0289	2,3199	3,3488	90,681	3776,918	3867,599	0,2869	11,2455

(-, 2009a)

10.4. МЕРЕЊЕ НА ВЛАЖНОСТ НА ВОЗДУХ

Употребата на уредите за мерење на влажност и нивната усовершеност постојано се зголемува. Од почетната употреба во областа на метеорологијата, нивното искористување се проширува во полето на сушење и складирање на материјали и храна, во индустриските процеси, кај клима уредите и друга слична опрема. Како се зголемува комплексноста на системите, така се усовршуваат и уредите. Денес тие може да работат во различни услови.

Сепак, не постои уред што може да се користи во сите услови и поради тоа правилниот избор на уредот е од големо значење за одредување на влажноста на воздухот.

Инструментите што ја мерат влажноста на воздухот се именуваат хигрометри.

Хигрометрите што притоа користат и дијаграм, имаат и посебно име, психрометри.

Пред да се отпочне со мерење, треба да се знае што точно ќе се мери, кои се барањата што се поставуваат до уредот и грешките што може да се појават притоа.

Инструментите во својата работа може да користат различни типови на сигнали: механички, електрични, хемиски или акустични.

Тие може да се изведени за мерење на релативната влажност или на содржаната влага.

Влажноста на воздухот може да се изрази преку: температурата на влажен термометар, точката на роса и на мрзнење, релативна влажност и содржаната влага.

Мерењата на влажноста на воздухот што најчесто се користат во научни и индустриски примени се покажани во Табела 10.4.-1..

Табела 10.4.-1. Мерења на влажност на воздух

Параметар	Опис	Единица	Примена
Температура на влажен термометар	Минимална температура регистрирана од наводенет термометар опструјуван со воздух.	°C	Високотемпературни сушилници, уреди за климатизација, метеорологија, комори за тестирање.
Релативна влажност	Количество на влага што се наоѓа во воздухот во однос на максимално можното.	0 до 100%	Комори за тестирање, производство на лекови и храна.
Точка на роса и точка на мрзнење	Точка на роса е температура до која воздухот мора да се лади за да се засити. Ако таа температура е под 0 °C се именува точка на мрзнење.	°C	Контрола на сушење, метеоролошки мерења.
Волуменски или масен однос	Делови од милион по волумен (ppm _v) е односот на парцијалниот притисок на водената пара кон парцијалниот притисок на сувиот гас кој ја содржи. Делови од милион по маса (ppm _m) е идентично со ppm _v , но односот се менува со молекуларната маса на гасот.	ppm _v ppm _m	Индустриски гасови како на пример: азот, кислород, метан, водород.

(Olivieri, Singh, Lovodocky, 1996)

Некои типови на сензори за влажност работат само при високи вредности на влажност, а други при ниско ниво. Тоа значи дека не постои сензор за влажност што може да се примени задоволително во сите случаи на мерење .

Високата точност, во широко подрачје на мерење значително ја зголемува цената на уредот. Затоа некои сензори работат само во тесно подрачје, а други високата точност ја заменуваат со поголема брзина на реакција.

Фактори што влијаат на изборот на инструмент за мерење на влажноста на воздухот се: подрачје на мерење на влажноста, промената на температурата, загадувањето, точноста, времето на реакција, притисокот, излезниот параметар, просторното ограничување и цената.

При мерењето на влажноста на воздухот може да се појават систематски и случајни грешки.

Системските грешки се специфични за одреден инструмент. Тие се повторливи и предвидливи грешки, како во поглед на вредноста така и во поглед на предзнакот. Овие грешки најчесто се појавуваат поради нелинеарноста во работата на инструментот или поради температурни ефекти. Бидејќи системските грешки се предвидливи, потенцијално може и да се елиминираат.

Случајните грешки не се целосно предвидливи, бидејќи тие зависат од влијанието на надворешните фактори. Токму поради нивната непредвидливост нема можност овие грешки целосно да се елиминираат.

Поради денешното високо ниво на усовершеност на инструментите, ракувањето со нив бара целосно разбирање и познавање на начинот на нивното функционирање, како и познавање на природата на процесот чии параметри се мерат со сензорот. Успешното функционирање бара придржување до одредена процедура на мерење, одржување на уредот, чистење и калибрирање.

Мерењето на влагата во воздухот, во однос на мерењето на температурата е потешко и поскапо.

Главниот предизвик е, да се добие сигурност дека сигналот на сензорот за влага навистина ги претставува условите во контролираниот простор.

Два важни фактора ја условуваат корисноста на секој сензорски сигнал: (1) калибрирањето на сензорот, (2) лоцирањето на сензорот.

Обично, проблемите во контролата на влагата се појавуваат кога недостасува регулирање на сензорската калбрација по монтирањето на сензорот на мерното место или кога сензорот е поставен на лоша локација. Во двата случаја се добива погрешен податок.

Квалитетната контрола на нивото на влагата, не се постигнува само со изборот на добар сензор.

Ефтините сензори за влага ретко се калибрирани од страна на производителот. Тие мора да се контролираат по монтирањето на мерното место и при сервисирањето.

Лошата локација може да предизвика покажување на скоро константна влажност. На пример, ако сензорот за влага е лоциран на местото на влезот на свежиот воздух, влагата на тоа мерно место ќе биде скоро константна, бидејќи не се мери влагата и нејзините промени во просторот, туку се мери влагата на свежиот воздух.

Само лоцирањето на сензорот за влага на правилно мерно место, во контролираниот простор, може да обезбеди реални измерени вредности.

Цената на сензорите за влага зависи од нивната толеранција и од нивниот одзив. Потесна толеранција и побрз одзив значат и повисока цена. Сензор за влага со точност во рамките $\pm 2\%$ релативна влажност, често чини десет пати повеќе од оној што мери со толеранција $\pm 5\%$ релативна влажност. Понатамошното намалување на толеранцијата, уште повеќе ја зголемува цената. Мерењето на релативната влажност во границите $\pm 1\%$ релативна влажност, веројатно ќе ја зголеми цената за 50% во однос на мерењето во рамките $\pm 2\%$ релативна влажност.

Слично, сензорот за влага со време на одзив од 30 секунди, е по скап од оној што работи со 5 минутен одзив, при иста промена на влагата.

Цената и точноста на мерењето е условена и од рангот во кој се менуваат влагата и температурата на мерното место. На пример, сензорот за влага што е лоциран на влезот на надворешниот воздух, може да биде изложен на дневни промени на релативната влажност од 10% до 100% и на температурата од $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тој сензор ќе има кондензација на површината заедно со загадувањето од воздухот, што ќе ја поремети неговата калибрација и ќе доведе до појава на нереални сигнали.

Тоа значи дека на мерното место за надворешен воздух треба да се постави робусен сензор.

Дури и за скапите, висококвалитетни сензори за влага, не може да се очекува да имаат точност поголема од $\pm 3\%$ релативна влажност, на овакви локации.

Спротивно, ако сензорот за влага е лоциран на мерно место каде температурата е скоро константна, а релативната влажност е во границите од 30 % до 65 %, ќе има многу мали отстапувања од точната влажност.

Конечно, толеранцијата на сензорот за влага е само мала компонента од толеранцијата на целиот систем. Толеранциите на сите компоненти се комбинираат за да ја дадат толеранцијата на системот како целина.

Другите компоненти на толеранцијата се: припадното време на задоцнување на сензорскиот одзив, толеранцијата на електрониката, толеранцијата на контролите во одвлажувачите и овлажувачите што одговараат на сигналите од контролираниот сензор, толеранцијата на грејните и ладилните компоненти и нивните контролни сензори. Најважно од сè, е задоцнувањето во делувањето на сите тие компоненти како систем, во однос на промените на влагата и температурата.

Затоа во практиката, само инвестирањето во скап сензор за влага, не води сигурно до потесна толеранција.

10.4.-1. ПСИХРОМЕТРИ

Психрометрите во својата конструкција имаат два идентични термометри, еден сув и еден влажен.

Тие се употребуваат во метеоролошките станици, во складовите за храна, во индустриските процеси и во лабораториите. Психрометрите се сигурни во работата, а може да се користат и за потврдување на точноста на мерење на влажноста на други хигрометри. Сепак, кај психрометрите опремени со стаклени термометри може да дојде до појава на грешки предизвикани од несоодветен материјал или димензија на ткаенината, присуство на загадувачи, недоволно струење на воздухот или присуство на зрачен пренос на топлина.

Ткаенината во форма на лента што е поставена на влажниот термометар, треба да е направена од хигроскопен, суров, бел памук со линеарна густина од 1 до 1,2 g/m. Пред употреба на психрометарот ткаенината се наводенува. За да се обезбеди точност во мерењето, ткаенината се одржува чиста.

Влијанието на зрачењето се намалува со поставување на заштитни екрани или со зголемување на брзината на воздухот, со цел да се интензивира конвективниот пренос на топлина. Брзината на струење на воздухот се препорачува да биде помеѓу 1,5 и 5 m/s, (-, 1994). При мали брзини на воздухот може да се појават грешки во мерењето на влажноста, бидејќи не е постигната температурата на граница на ладење или температурата на адијабатско заситување.

Ако психрометарот е добро одржуван во текот на неговата експлоатација, во рамките на температурниот интервал од 5 °C до 80 °C и со прецизност на термометрите од ± 2 °C, релативната влажност може да се одреди со точност од ± 3 %. Важен фактор што влијае на точноста на мерењето со психрометарот е квалитетот и точноста на термометрите што се вградени во него. Термометрите треба да се гравирани во делови од 0,5 °C. За големи релативни влажности разликата помеѓу сувиот и влажниот термометар е многу мала и потребни се прецизни термометри за да може да се изврши отчитување.

Принципот на функционирање на психрометрите со сув и влажен термометар е следниов: (1) се мери температурата на сувиот термометар или амбиентната температура, (2) се мери температура на термометарот што е покриен со наводенета ткаенина, откако постигнал рамнотежа со воздухот што го обструјува со одредена брзина, (3) се внесуваат двете измерени вредности во дијаграм и се одредува состојбата на воздухот.

Кај индустриските верзии, за постигнување на поголема точност се користат платиниумски отпорнички термометри, а ткаенината постојано се напојува од резервоар со дестилирана вода.

Психрометарот со сув и влажен термометар може и да нема вентилатор. Тоа е вртливиот психрометар. На едниот крај е поставена осовина и рачка што овозможува вртење на рамката со термометрите низ воздухот. Мерењето не може да се смета за целосно точно, бидејќи зависи од човекот кој го изведува. Потребна е голема брзина на вртење за да се добие доволен интензитет на струење на воздухот околу влажниот термометар, но тоа значи и поголемо влијание на центрифугалната сила врз термометрите.

Денес се применуваат и дигитални психрометри со сув и влажен

термометар опремени со микропроцесорска единица. Тие во себе имаат вградени електронски сензори за мерење на температурата на сув и влажен термометар.

Овој тип на психрометар може да постигне точност од $\pm 1\%$. Се користи за температурен интервал од $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Точноста на мерењето зависи од квалитетот на уредот и од неговото одржување.

Предности на психрометарот со сув и влажен термометар се прифатливата цена и добрата прецизност за внатрешни услови на примена.

Слабости на психрометарот со сув и влажен термометар се потребата од дијаграм, тешкотиите при примена за воздухот што струи во канали и можноста за појава на грешки при отчитување.

10.5. ДИЈАГРАМИ ЗА ВОЗДУХ

Дијаграмите за воздух претставуваат графички израз на термодинамичките својства на влажниот воздух. Овие дијаграми обезбедуваат графички решенија за многу проблеми поврзани со влажниот воздух.

На сите дијаграми за воздух им е заедничко: (1) се изработуваат за константен притисок, (2) на едната оска имаат содржана топлина и температура, а на другата оска имаат содржана влага.

Во светот има две практики, едната важи за Америка, а другата за Европа. Во Америка, дијаграмите за воздух се користат под името “психрометриски дијаграм”, а во Европа дијаграмите за воздух се познати како “дијаграм содржана топлина - содржана влага” или кратко “i - x дијаграм”.

10.5.-1. ПСИХРОМЕТРИСКИ ДИЈАГРАМ

За атмосферски притисок, Друштвото на термичарите на Соединетите американски држави (ASHRAE) има развиено седум такви дијаграми кои се соодветно означени како: психрометриски дијаграм ASHRAE No.1., ASHRAE No.2., ASHRAE No.3., ASHRAE No.4., ASHRAE No.5., ASHRAE No.6. и ASHRAE No.7.. Психрометриските дијаграми ASHRAE No.1., No.2., No.3. и No.4. се изработени за притисок на морско ниво, односно 101325 Pa , ASHRAE No.5. за притисок на 750 m надморска

височина, односно 92660 Pa, ASHRAE No.6. за притисок на 1500 m надморска височина, односно 84540 Pa, ASHRAE No.7. за притисок на 2250 m височина, односно 77040 Pa. Овие психрометриски дијаграми го покриваат температурниот опсег: ASHRAE No.1., No.5., No.6., No.7. нормалните температури од 0 до 50 °C, ASHRAE No.2. ниските температури од - 40 до 10 °C, ASHRAE No.3. високите температури од 10 до 120 °C, ASHRAE No.4. многу високите температури од 100 до 200 °C.

Во Табела 10.5.-1. сумирани се податоците за седумте психрометриски дијаграми.

Тие се поставени во согласност со вредностите од табелата “Термодинамички својства на влажен воздух при стандарден атмосферски притисок, 101325 Pa” во температурниот опсег од - 60 °C до 90 °C, и табелата “Термодинамички својства на вода и водна пара во состојба на заситеност” во опсег од - 60 °C до 160 °C, (-, 2005a), и методите на пресметка на Goff, Gratch, Hyland i Wexler (Goff, Gratch, 1945), (Goff, Gratch, 1946), (Goff, 1949), (Hyland, Wexler, 1983a), (Hyland, Wexler, 1983b).

Табела 10.5.-1. Психрометриски дијаграми ASHRAE No.1. до No.7.

Психрометриски дијаграм	Температурен опсег, (°C)	Притисок, (Pa)	Надморска височина, (m)
ASHRAE No.1.	0 до 50	101325	морско ниво
ASHRAE No.2.	- 40 до 10	101325	морско ниво
ASHRAE No.3.	10 до 120	101325	морско ниво
ASHRAE No.4.	100 до 200	101325	морско ниво
ASHRAE No.5.	0 до 50	92660	750
ASHRAE No.6.	0 до 50	84540	1500
ASHRAE No.7.	0 до 50	77040	2250

Психрометрискиот дијаграм ASHRAE No.1. е покажан на Слика 10.5.-1..

Тоа е основниот дијаграм за воздух на притисок и надморска височина што одговараат на стандардната атмосфера во Соединетите американски држави.

Примената му е ограничена за температура до 50 °C и содржана влага до 30 грама влага по килограм сув воздух.

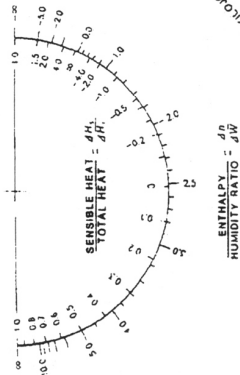


ASHRAE PSYCHROMETRIC CHART NO. 1

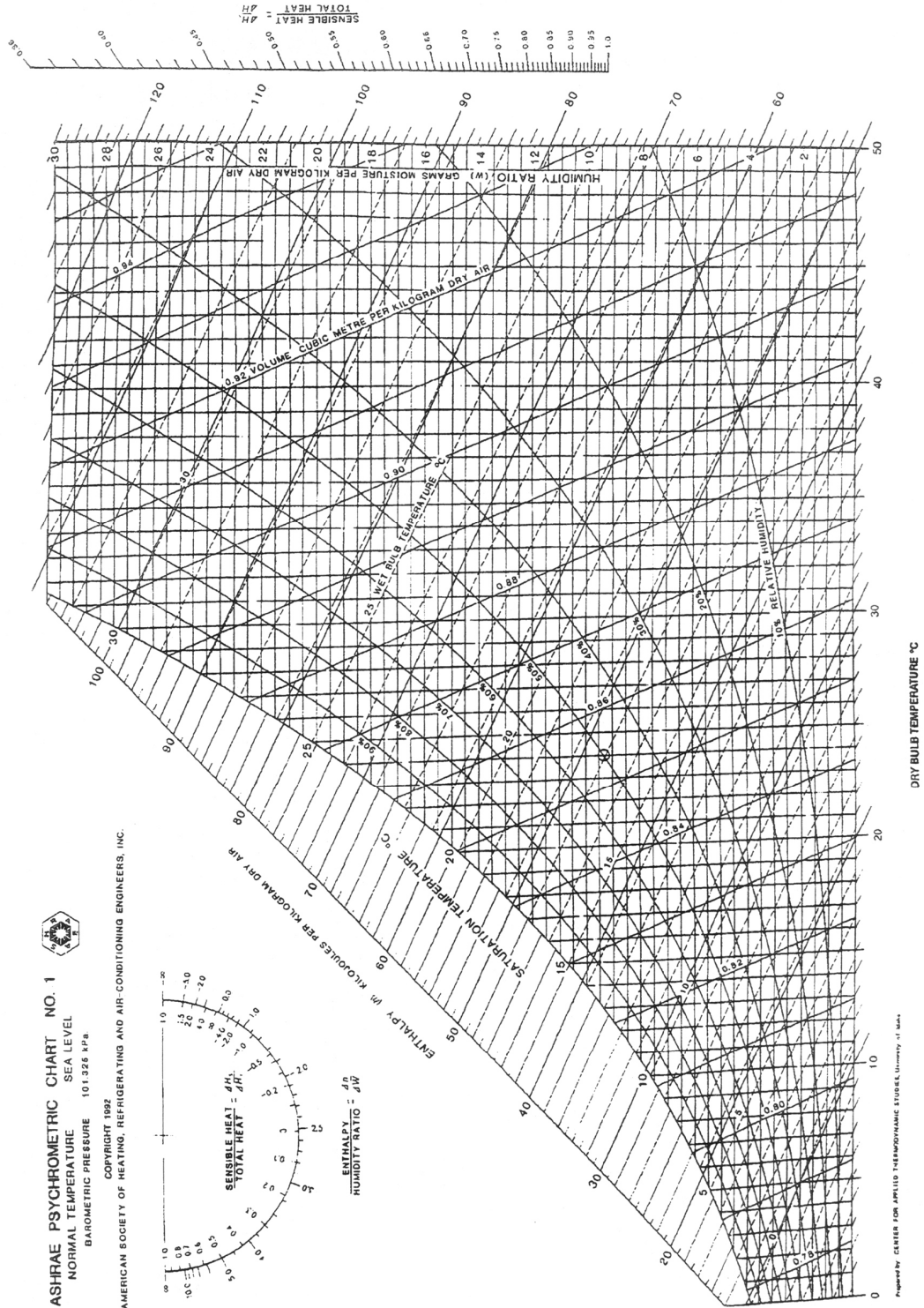
NORMAL TEMPERATURE SEA LEVEL
BAROMETRIC PRESSURE 101.325 kPa

COPYRIGHT 1982

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC.



ENTHALPY - $\frac{kJ}{kg}$
HUMIDITY RATIO - $\frac{g}{kg}$



Prepared by CENTER FOR APPLIED THERMODYNAMIC STUDIES, University of Man...

Слика 10.5.-1. Психрометриски дијаграм ASHRAE No.1.

10.5.-2. ДИЈАГРАМ СОДРЖАНА ТОПЛИНА - СОДРЖАНА ВЛАГА

Дијаграмот “специфична енталпија - содржана влага” се поставува за воздух. Тој се изработува за еден одреден притисок. Тоа е график нацртан на изобарна површина.

Психрометрискиот дијаграм е поставен во 1906 година, од американскиот термичар Willis Carrier, а $i - x$ дијаграмот во 1923 од германскиот термичар Richard Mollier, (Gatley, 2005), (Mollier, 1923).

Дијаграмите за воздух се вредна алатка за пресметките во термиката. Со нив лесно и брзо се следат промените во состојбата на влажниот воздух.

Во $i - x$ дијаграмот се разликуваат две подрачја: (1) подрачје на незаситен воздух, во кое водната пара се наоѓа во прегреана состојба, (2) подрачје на презаситен воздух, во кое водната пара е придружена со водни капки или кристали од мраз.

Незаситеното подрачје го претставува воздухот кој е способен да прима влага. Во ова подрачје, енталпијата на влажниот воздух може да се изрази,

$$i = i_a + x i_w = c_{p,a} t + x(r_o + c_{p,w} t) = f(x, t). \quad (10.5.-1.)$$

Линеарната врска помеѓу i , x и t , е изразена графички во $i - x$ дијаграмот за влажен воздух. Во него на апцисата е нанесена содржаната влага на воздухот x во kg вода/ kg сув воздух, односно kg вода / $(1+x)$ kg влажен воздух, а на ординатата е нанесена специфичната енталпија i во kJ/kg . Изотермите се прави линии, бидејќи од Равенката (10.5.-1.) произлегува дека имаат константен наклон,

$$\left(\frac{\partial i}{\partial x} \right)_{t=\text{konst.}} = i_w = r_o + c_{p,w} t = \text{konst.} \quad (10.5.-2.)$$

Изразот $r_o + c_{p,w} t$ го претставува наклонот на изотермата t во $i-x$ дијаграмот. Следува, дека со растење на t се добива се поголем наклон. Затоа изотермите во незаситеното подрачје на $i - x$ дијаграмот се распоредени лепезасто. Од Равенка (10.5.-1.), со замена на вредноста $x = 0$, се добиваат и почетоците на сите изотерми на ординатната оска,

$$i = c_{p,a} t. \quad (10.5.-3.)$$

Како специјален случај се разгледува изотермата $t = 0$, која ми-

нува низ полот на i - x дијаграмот, и има наклон $(\partial i / \partial x)_{t=0} = r_0$.

За секоја изотерма може да се пресмета содржаната влага на заситеност. Тоа е максималното количество на водна пара што може да го прими 1 kg сув воздух на одредена температура, при даден притисок, а се изразува со равенката,

$$x_{s,t} = \frac{0,622 p_{s,t}}{p - p_{s,t}}. \quad (10.5.-4.)$$

Секој вишок на водна пара, над таа граница, веднаш кондензира и воздухот се замаглува.

Ако на секоја изотерма се означи вредноста $x_{s,t}$ што и припаѓа, се добива линијата на заситеност или линијата на росење на влажниот воздух за посматраниот притисок, позната како гранична линија. Оваа линија асимптотски и се доближува на изотермата $t = 100$ °C, бидејќи кога $p_{s,t}$ тежи кон $p = 101325$ Pa, $x_{s,t}$ тежи кон ∞ . Вредноста на $x_{s,t}$ во Равенката (10.5.-4.) може да се пресмета со користење на табелите за водна пара. За секоја температура се отчитува притисокот на заситување $p_{s,t}$.

На тој начин нацртаната гранична линија е стрма и со ординатата оформува тесно незаситено подрачје на i - x дијаграмот. Од практични причини, се пристапува кон раширување на подрачјето на незаситен воздух. Со ротација на x оската, се добива попрегледно подрачје на незаситен воздух, односно конечниот облик на i - x дијаграмот.

Пример на i - x дијаграм е даден на Слика 10.5.-2.

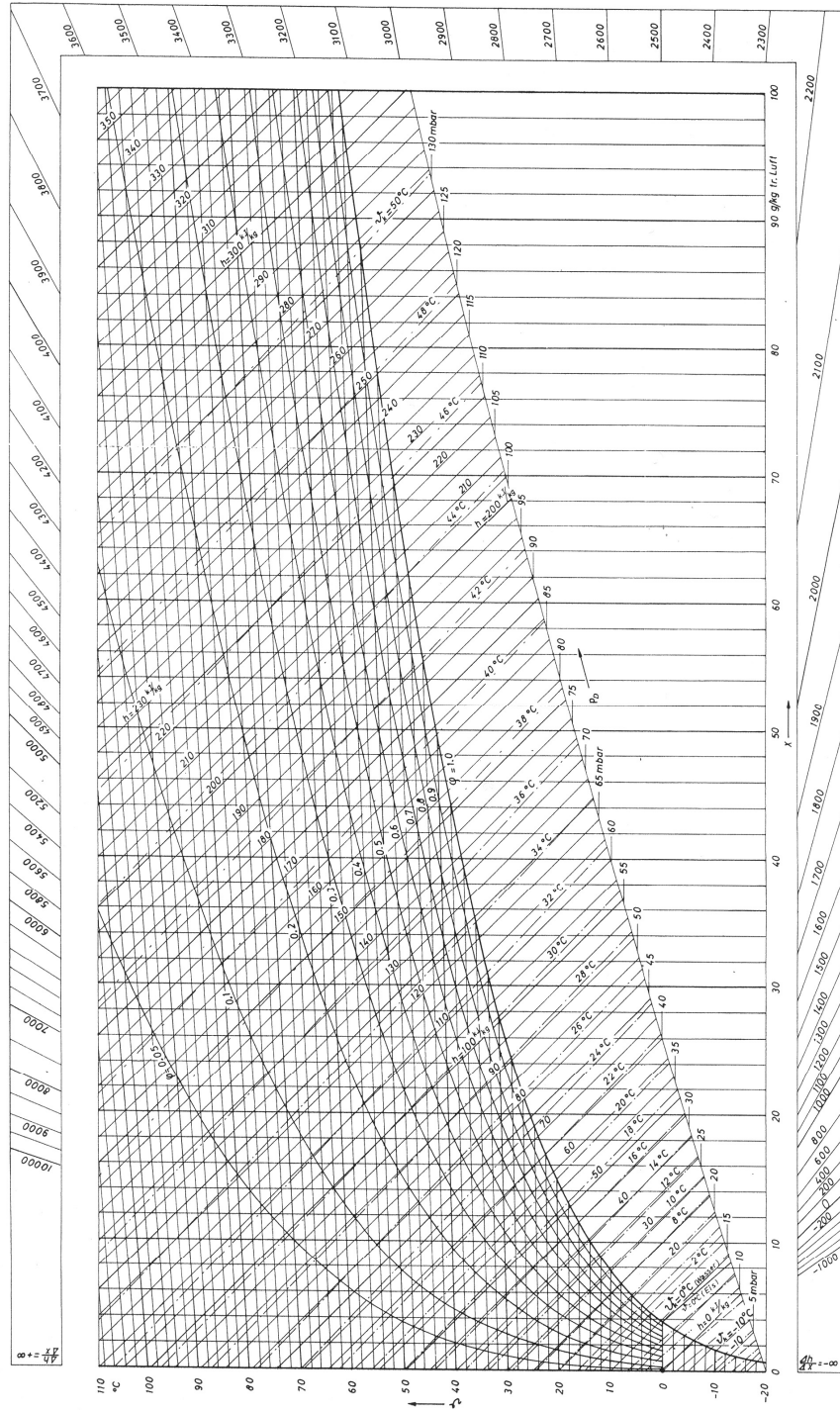
Вообичаено е, i - x дијаграмот да се користи за 101325 Pa.

За други вредности на притисокот, i - x дијаграмот изработен за 101325 Pa е употреблив само делумно и потребни се корекции.

Од Равенката (10.5.-4.) се гледа дека за дадена изотерма, со растење на p , се намалува $x_{s,t}$. Спомнувајќи си како се конструира i - x дијаграмот, тоа значи дека подрачјето на незаситен воздух ќе биде помало, за повисок притисок и обратно.

Бидејќи енталпијата не зависи од притисокот, за случајот кога воздухот се смета за идеален гас, следува дека мрежата на специфичните енталпии останува неизменета. Мрежата на изотермите не се менува во подрачјето на незаситен воздух, а во подрачјето на презаситен воздух е целосно нова, поради изместената положба на кривата $\phi=1$ за

Tafel I
 h-x-Diagramm für feuchte Luft bei Temperaturen
 von -20 bis 100 °C und P = 1 bar



© by Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1978 Printed in Germany

Trocknungstechnik Bd. 1: Krischer / Kalt, Wissenschaftliche Grundlagen, 3. Aufl.

Слика 10.5.-2. Дијаграм “содржана топлина - содржана влага” за притисок 101325 Pa според Krischer, (Krischer, 1978)

секој конкретен притисок. Од равенката за содржана влага, запишана во следниов облик,

$$x = \frac{0,622}{\left(\frac{p}{\varphi}\right)\left(\frac{1}{p_{s,t}} - 1\right)}, \quad (10.5.-5.)$$

може да се согледа примената на i - x дијаграмот за други притисоци.

За сите односи $p/\varphi = \text{konst}$, за x се добива една иста вредност. Тоа значи дека φ линиите од i - x дијаграмот нацртан за $p = 101325$ Pa може да се користат за сите комбинации на p и φ , за кои важи $p/\varphi = \text{konst}$.

На пример, за притисокот од 144750 Pa, линијата $\varphi = 1$ ќе биде претставена со линијата $\varphi = 0,7$ од дијаграмот изработен за 101325 Pa, бидејќи $p/\varphi = 101325/0,7 = 144750$. Сега подрачјето на незаситен воздух лево од линијата $\varphi = 0,7$ може да се користи и за $p = 144750$ Pa, а десно од линијата $\varphi = 0,7$, во подрачјето на презаситен воздух, треба да се извлечат нови изотерми на магла.

10.5.-3. МЕШАЊЕ НА ВОЗДУШНИ СТРУИ

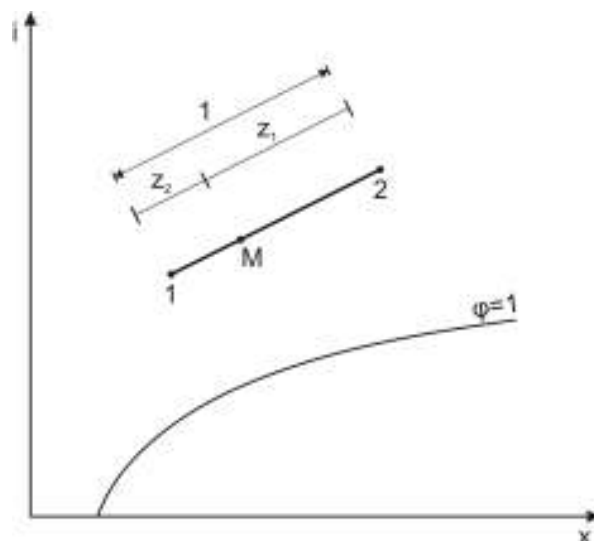
Ако треба да се одреди состојбата на влажен воздух добиен со мешање на две количества воздух со познати карактеристики (протек, температура, содржана влага) i - x дијаграмот нуди ефикасна помош, Слика 10.5.-3. и Слика 10.5.-4.

Воздух со состојба 1 се меша со воздух со состојба 2 и како резултат се добива воздух со состојба M.



- 1 - воздух со состојба $(m_{s,1}, t_1, x_1)$,
- 2 - воздух со состојба $(m_{s,2}, t_2, x_2)$,
- M - воздух со состојба $(m_{s,M}, t_M, x_M)$.

Слика 10.5.-3. Мешање на воздушни струи



$$z_1 = \frac{m_{s,1}}{m_{s,1} + m_{s,2}}, \quad z_2 = \frac{m_{s,2}}{m_{s,1} + m_{s,2}}$$

$$z_1 + z_2 = 1$$

Слика 10.5.-4. Мешање на воздушни струи - графичко решение

На праволиниската врска помеѓу почетните состојби, во однос добиен од односот на протеците, се одредува состојбата по мешањето, М.

Проверка се врши со билансирањето. Од материјалниот биланс,

$$m_{a1}(1 + x_1) + m_{a2}(1 + x_2) = (m_{a1} + m_{a2})(1 + x_M), \quad (10.5.-6.)$$

и од енергетскиот биланс,

$$m_{a1}i_1 + m_{a2}i_2 = (m_{a1} + m_{a2})i_M, \quad (10.5.-7.)$$

се добива,

$$\frac{i_M - i_1}{x_M - x_1} = \frac{i_2 - i_M}{x_2 - x_M}. \quad (10.5.-8.)$$

10.5.-4. ВЛАЖЕЊЕ НА ВОЗДУХ

Влажењето на воздух се врши со додавање на вода или водна пара, Слика 10.5.-5..

Одредувањето на состојбата на воздухот по влажењето се врши со помош на кружната скала на дијаграмот “содржана топлина - содржана влага”.

За случајот кога целокупната вода испарува, со билансирање се

добива,

$$m_a(1+x_v) + \Delta m_w = m_a(1+x_i), \quad (10.5.-9.)$$

односно,

$$m_a i_v + \Delta m_w i_w = m_a i_i. \quad (10.5.-10.)$$

Од материјалниот биланс и енергетскиот биланс произлегува,

$$\frac{(i_i - i_v)}{(x_i - x_v)} = \frac{\Delta i}{\Delta x} = i_w. \quad (10.5.-11.)$$

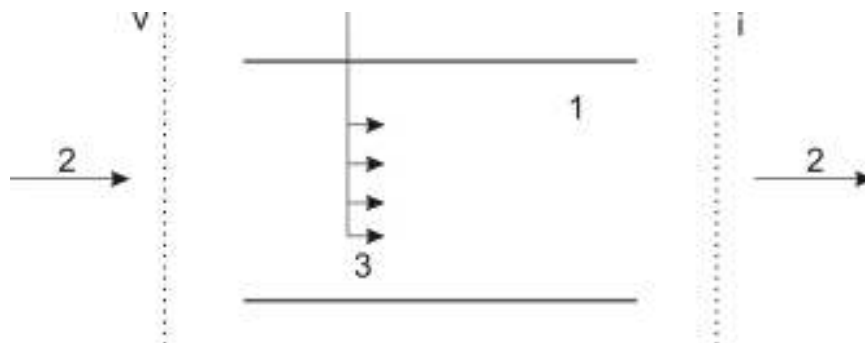
Равенката (10.5.-11.) искажува дека сите точки што ги претставуваат состојбите добиени со мешање на воздух (x_v , i_v) со вода или водна пара со енталпија i_w , лежат на правата што има наклон i_w .

Бидејќи големината $\Delta i/\Delta x = i_w = \text{konst.}$ е внесена во i - x дијаграмот, влажењето се следи по паралелна права на $\Delta i/\Delta x$, што минува низ почетната точка (x_v , i_v).

Три карактеристични промени на состојба се појавуваат како гранични случаи:

1. $i = \text{konst.}$; 2. $x = \text{konst.}$; 3. $t = \text{konst.}$.

Ако се додава вода со $t_w = 0^\circ\text{C}$, тогаш $i_w = 0 \text{ kJ/kg}$ и промената се одвива по некоја линија $i = \text{konst.}$.



1-комора за влажење, 2-воздух, 3-вода или водна пара, v-влез, i-излез

Слика 10.5.-5. Скица на комора за влажење

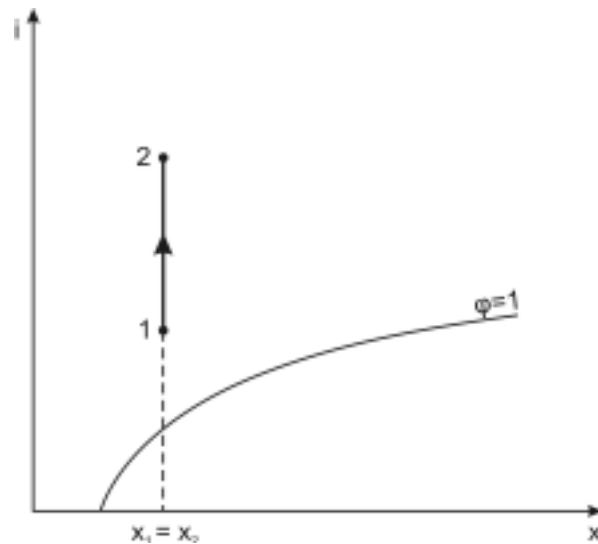
Ако се врши загревање или ладење до бесконечна вредност на температурата, $\Delta i/\Delta x = i_w = \pm\infty$, промената ќе се одвива по линија $x = \text{konst.}$. За реалните технички случаи тоа е многу помала вредност. На пример, за прегреана водна пара, на 500°C и 101325 Pa , $i_w \approx 3500 \text{ kJ/kg}$.

Ако се додава сувозаситена водна пара или прегреана водна пара

со температура t , така да важи $i_p = \gamma_0 + c_{p,p}t$, промената ќе се одвива по линијата $t = \text{konst.}$.

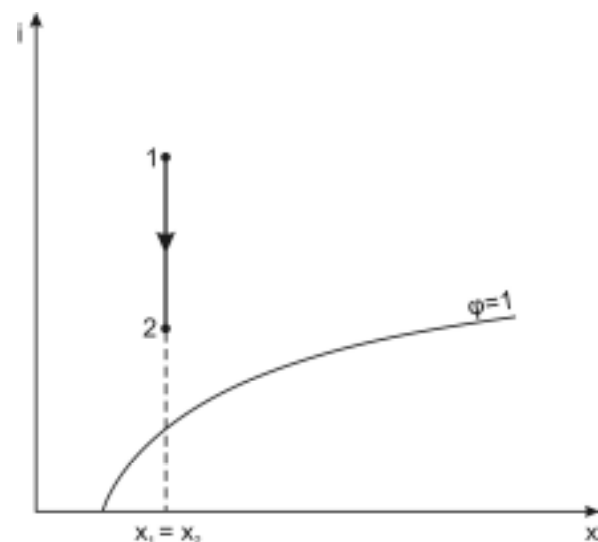
10.5.-5. ГРЕЕЊЕ И ЛАДЕЊЕ НА ВОЗДУХ

Ако воздухот се грее тогаш му се зголемува температурата, а содржаната влага не се менува, Слика 10.5.-6..



Слика 10.5.-6. Греење на воздух

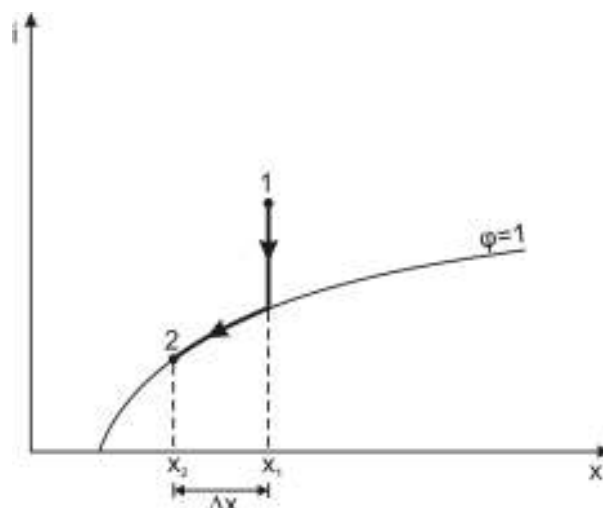
Ако воздухот се лади тогаш му се намалува температурата, а содржаната влага не се менува, Слика 10.5.-7..



Слика 10.5.-7. Ладење на воздух

10.5.-6. СУШЕЊЕ НА ВОЗДУХ

Ладењето на воздухот се користи и за негово сушење. Ако ладењето се одвива до температура под температурата на заситување на воздухот, од воздухот се одделува влага, Слика 10.5.-8..



Слика 10.5.-8. Сушење на воздух со ладење

Количеството на одделена влага е,

$$\Delta x = x_1 - x_2. \quad (10.5.-12.)$$

Количеството на одземената топлина може да се добие со отчитување на енталпиите од дијаграмот,

$$\Delta i = i_1 - i_2. \quad (10.5.-13.)$$

10.6. АТМОСФЕРСКИ ВОЗДУХ

10.6.-1. МЕТЕОРОЛОГИЈА

Метеорологија е наука за појавите во атмосферата.

Атмосферата е гасна обвивка на Земјата, со дебелина од околу 1000 km. Се вели “околу 1000 km” бидејќи на висини од 600 до 1000 km над Земјата, односно во егзосферата, силата на гравитацијата е недоволна да го одржи гасот и не може да се каже која е горната граница на атмосферата.

Атмосферата се дели на тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера, егзосфера. Најнизок дел е тропосферата, со височина од 17 km на екваторот, а 8 до 10 km на половите. На долниот дел од тропосферата, односно на површината на Земјата, забележан е просечен годишен максимум на температурата од 50 °C во Сахара и апсолутен минимум од - 86 °C на Антарктик. На горниот дел од тропосферата владее температура од - 50 до - 90 °C.

Температурата на воздухот, заедно со влагата и притисокот, ја одредува состојбата на атмосферскиот воздух.

Изразувањето на температурата како функција од висината се именува температурен профил.

Општо искажано, температурата се намалува со зголемување на висината. Но, ова мислење треба да се корегира за услови близу до земјата. На пример, при топол, светол ден, температурата брзо опаѓа со зголемување на висината во површинските слоеви, но по заоѓање на Сонцето, а специјално при чисто небо, температурата на воздухот во тие слоеви обично се зголемува од земјата нагоре.

За промените во најниските слоеви на атмосферата, кои се однесуваат на ограничена област од земјата, развиена е посебна дисциплина микрометеорологија. Од карактеристиките на воздухот во најниските слоеви од атмосферата, зависи животот на човекот. Турбулентното движење на воздушните маси влијае на преносот на топлината од земјата кон воздухот, на размената на јаглеродниот диоксид помеѓу растенијата и животните, на растурањето на поленот и лесните семиња, на циклусот на минување на водата од земјата и водените површини во воздухот и враќање на земјата. Микрометеорологијата се занимава со состојбата во слојот од 100 m над земјата, каде испитувањата може да се вршат со фиксно поставени инструменти.

На територијата на Македонија се појавува температурен опсег од - 20 °C до 40 °C.

Температурата на воздухот се менува просторно и временски. Дневните промени на температурата на воздухот ги диктираат температурните податоци што човекот ги користи во практиката. Секоја област, како на пример: термиката, земјоделството, градежништвото, медицината, туризмот бара специфично обработени температурни информации.

За дневните промени на температурата на воздухот во Македонија, се анализираат податоците од метеоролошките станици лоцирани на целата територија на државата, Табела 10.6.-1..

Во Табела 10.6.-1. се внесени метеоролошките станици што располагаат со часовни мерења за температурата на воздухот, неопходни за современите климатски анализи (-, 2005a).

Дневната промена на температурата зависи од низа фактори: годишно време, физички особини на земјиштето, географска ширина, надморска висина, експозиција на земјиштето, вегетација, состојба на небото, снежен покрив.

Табела 10.6.-1. Метеоролошки станици во Македонија - мерење на температурата на воздухот

Станица	Број	Географска ширина	Географска должина	Надморска висина	Почеток
Скопје - Зајчев рид	135880	42° 01'	21° 24'	301 m	1983
Скопје - Петровец	135860	41° 57'	21° 38'	232 m	1976
Битола	135830	41° 03'	21° 22'	586 m	1947
Прилеп	135850	41° 20'	21° 34'	673 m	1946
Штип	135910	41° 45'	22° 11'	326 m	1947
Охрид	135780	41° 07'	20° 48'	760 m	1951
Струмица	135950	41° 26'	22° 39'	224 m	1974
Гевгелија	135970	41° 09'	22° 30'	52 m	1981
Берово	135980	41° 43'	22° 57'	822 m	1951
Крива Паланка	134930	42° 12'	22 20'	691 m	1951
Попова шапка	134920	42° 01'	20° 53'	1750 m	1958
Солунска Глава	135840	41° 42'	21° 25'	2540 m	1973
Лазарополе	135770	41° 32'	20° 42'	1332 m	1948
Демир Капија	135920	41° 25'	22° 15'	107 m	1951

Со зголемување на географската ширина дневните колебања на температурата на воздухот се намалуваат. На пример, во поларните области, дневните промени на температурата на воздухот се најмали.

Во планинските масиви, температурата на воздухот е постабилна отколку во пониските предели, во котлините. За време на ноќниот период, на планините се одвива интензивно ладење, што е причина ладниот

воздух, како потежок, да се спушта во долините.

Зимските промени на температурата на воздухот се помали во однос на летните.

10.6.-2. КЛИМАТСКИ КРИВИ

Пред секој термичар што планира да користи воздух се поставува прашањето, “Каков ќе биде атмосферскиот воздух на одредена локација?”.

Директен и прецизен одговор нема, бидејќи идните состојби во атмосферата може само да се прогнозираат.

Доволно точен одговор, за термичките проблеми, може да се добие од климатските криви.

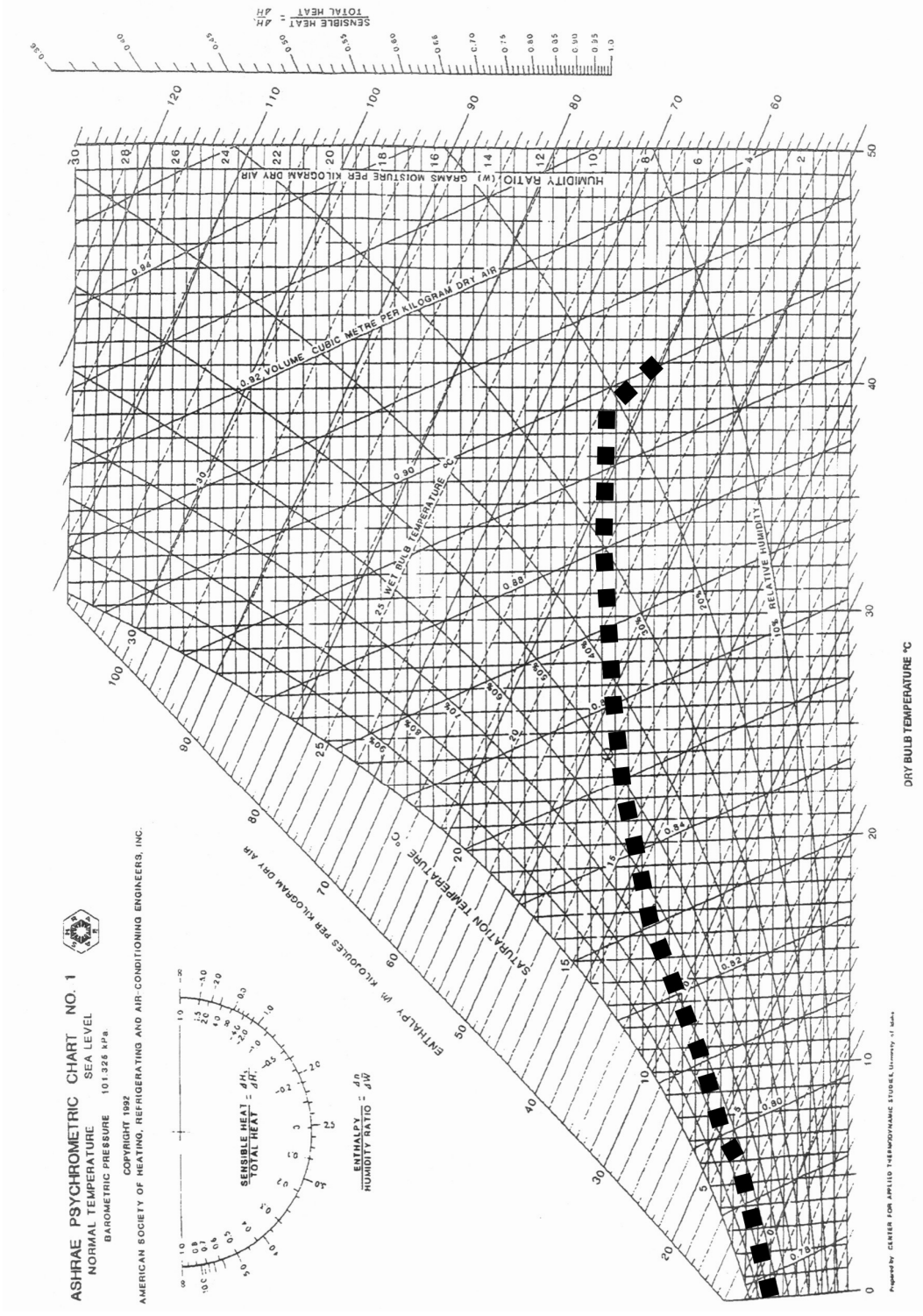
Климатските криви претставуваат регистрирање на состојбите на атмосферскиот воздух, на одредена локација, врз основа на мерењата извршени во минатото. Тие покажуваат кој пар температура - релативна влажност се појавувал најчесто на посматраното место, односно која состојба на влажниот воздух е најверојатна за одредена температура. Со други зборови, климатските криви докажуваат, каква била најчесто, состојбата на воздухот во атмосферата. Преку климатските криви се користи искуството од изминатиот период, за претскажување на состојбите на атмосферскиот воздух во идниот период.

Постапката за поставување на климатска крива има три етапи: (1) обезбедување на податоци за истовремената вредност на температурата и релативната влажност на воздухот, (2) нивна статистичка обработка, (3) внесување на резултатите во дијаграмот за влажен воздух.

Климатската крива се поставува нормално како годишна климатска крива, Слика 10.6.-1.. За одредени потреби на термичката практика, климатската крива се изработува и за пократок период, на пример за летниот период.

Првата климатска крива за Скопје е објавена во 1978 година (Mojsovski, Serafimov, Nikolić, 1978). Во тој труд обработени се податоците за три мерења дневно, во текот на дваесет и пет години, односно вкупно 54786 вредности.

Современите климатски проектни информации се анализираат



Слика 10.6.-1. Климатска крива за Скопје

преку часовни вредности за минимален временски период од 12 години (-, 2001a).

Нова климатска крива за Скопје е објавена во 1999 година (Mojsovski, Poredoš, 1999). Таа е подготвена со часовни вредности за периодот 1986 -1997, односно со вкупно 210384 вредности. Од неа може да се отчита дека во летниот период во Скопје, при температура на воздухот од 35 °C, релативната влажност изнесува 26 %, а во зимскиот период при температура на воздухот од 0 °C, релативната влажност е 80 %.

Климатската крива, Слика 10.6.-1., е изработена од часовни набљудувања на температурата и релативната влажност, за периодот 1986 - 2005 година, (Мојсовски, 2007).

Климатската крива на Скопје покажува дека при температури од 0 °C до 20 °C, содржаната влага се менува од 3 gr/kg до 8 gr/kg, а релативната влажност од 60 % до 80 %, а при температури од 20 °C до 40 °C, содржаната влага се менува од 8 gr/kg до 9 gr/kg, а релативната влажност од 20 % до 80 %.

Климатската крива, за секоја вредност на температурата, ја покажува и целосната состојба на воздухот.

10.7. ПРИМЕНА НА ВОЗДУХОТ

10.7.-1. КОНДИЦИОНИРАЊЕ НА ВОЗДУХ

Кондиционирањето на воздух е процес на подготовка на атмосферскиот воздух за извршување на одредена термичка задача.

Тој процес може да вклучи филтрирање, греење, ладење, влажење, сушење, распределба, усмерување на воздухот.

Со помош на кондиционираниот воздух се постигнуваат бараните термички услови во затворен простор.

Системот за кондиционирање на воздух, самостојно или заедно со системите за греење, ладење и проветрување, треба да обезбеди специфицирано ниво на следните големини на влажниот воздух: температура, влажност, струење, квалитет, број на промени на час, притисок.

Наведените големини се меѓусебно зависни.

ФИЛТРИ ЗА ВОЗДУХ

Процесот на кондиционирање на атмосферскиот воздух започнува со филтрирање. Во атмосферскиот воздух има густина на загадувачи од 0,05 до 3 mg/m³ (Recknagel, 2004). Тој се чисти со минување низ филтер.

Филтрите за воздух се изработуваат од различни материјали: метален филтер, влакнест филтер, филтер со активен јаглен, филтер со масло, влакнест електрофилтер. Тие се поставуваат во канал, во ѕид, на таван, на излез од инсталацијата. Во однос на погонот филтрите може да се поделат на неподвижни, подвижни, електрофилтри и автоматски.

Квалитетот на филтерот се одредува со испитување и се оценува со класа на филтерот.

Во Табела 10.7.-1. дадено е рангирањето на филтрите според квалитетот.

Табела 10.7.-1. Квалитет на филтри за воздух

Класа	Степен на одделување, (%)	Пропуштање, (%)	Старо име	Име
G 1 G 2 G 3 G 4	< 65 65 - 80 80 - 90 > 90		EU 1/A EU 2/B ₁ EU 3/B ₂ EU 4/B ₂	Филтри за груба прашина
F 5 F 6 F 7 F 8 F 9			EU 5 EU 6 EU 7 EU 8 EU 9	Филтри за фина прашина
EU 10 EU 11 EU 12 EU 13 EU 14 EU 15 EU 16 EU 17	85 95 99,5 99,95 99,995 99,9995 99,99995 99,999995	15 5 0,5 0,05 0,005 0,0005 0,00005 0,000005	Q R S S ST T U V	Филтри за прашина што лебди

Според DIN EN 779

Металните филтри се целосно изработени од метал. Тие користат

метална волна, метална мрежа, перфориран лим. Се применуваат за одделување на масло, груба прашина и боја.

Влакнестите филтри се произведуваат од волна, која може да биде од различен материјал, како на пример, стакло, пластика, природни материјали. Тие се сретнуваат во повеќе облици, а најраспространет е влакнестотиот вреќаст филтер. Квалитетните влакнестите филтри се употребуваат за одделување на најфината прашина или прашина што лебди. Филтрите со активен јаглен служат за одделување на гасни загадувачи, на пример, мириси од кујна, од санитарни простории, од индустриски процеси. Како основа за добивање на активен јаглен се користи камен јаглен, луспа од кокос или дрво.

Електрофилтрите за чистење на атмосферски воздух работат по системот “Реппеу”. Тие содржат дел, во кој честичките од прашината што е во воздухот, се наелектризираат и дел во кој потоа тие се одделуваат. Електрофилтрите се изработуваат и во комбинација со влакнестите филтри. Овие филтри имаат висока цена.

Автоматските филтри имаат филтер кој за време на неговото користење, повремено или континуирано се чисти.

За некои примени филтрите се употребуваат како повеќестепени или комбинирани. На пример, клима коморите за посебни барања (хируршки сали, чисти соби) содржат филтер за груба прашина, филтер за фина прашина и филтер за прашина што лебди.

ГРЕЈАЧИ ЗА ВОЗДУХ

Грејачите за воздух, како работно средство, најчесто користат водна пара или топла вода. Изработени се од челични или бакарни цевки, во кои струи грејниот флуид, а околу нив струи воздухот што се грее. Во современите конструкции цевките се изведени со проширена површина за да се зголеми пренесената топлина. Овие топлиноизменувачи имаат габаритни димензии според типот на клима комората или единечниот грејач на воздух, за кој се наменети. За греењето на затворен простор со воздух, се применуваат единечни грејачи за воздух.

Воздухот се загрева од грејниот елемент, станува полесен и струи вертикално под влијание на гравитацијата. За зголемување на интензи-

тетот на струење, во некои изведби се вградува и вентилатор.

Електричните единечни грејачи за воздух се применуваат: на изолирани локации, за греење со прекини, за дополнително греење. Типична примена имаат за греење на воздух во билетарници, чуварски куќички, фабрички простории, соблекувални, пумпни станици и други изолирани простории распоредени на голема територија.

Како и грејачите за воздух на водна пара или топла вода, електричните грејачи се вградуваат во клима комори, воздушни канали, сушилници и друга процесна опрема.

Електричните единечни грејачи за воздух се изработуваат и како акумулациони. Во тој случај, акумулационата маса прима топлина во ноќниот период, кога електричната енергија е поефтина, а потоа, преку денот, се користи за греење на воздухот.

ЛАДИЛНИЦИ ЗА ВОЗДУХ

Ладилниците за воздух, како ладилно средство користат ладна вода или некој од работните флуиди на компресорските ладилни машини.

Во првиот случај, тоа се ладилници кои конструктивно може да бидат исти со грејачите на воздух што користат топла вода.

Во вториот случај, ладилникот претставува испарувач на компресорска ладина машина. Испарувачите се изработуваат, слично како и ладилниците што работат со ладна вода, од цевки од бакар со дијаметар 10 до 18 mm и алуминиумски ребра или алуминиумски ламели поставени на растојание од 2 до 7 mm. Ладилното средство струи во цевките и испарува, а воздухот што треба да се олади минува над оребрите цевки.

За локално ладење на одреден затворен простор се применуваат уреди во една единица и уреди во две поделени единици (познати како “сплит системи”).

Кај првите уреди, сите елементи на ладилната машина (компресор, кондензатор, експанзионен вентил, испарувач) се вградени во една целина, која може да биде сместена во просторијата или надвор од неа.

Кај сплит системите, во еден дел (сместен во просторијата) е по-

ставен испарувачот (ладилникот), а во вториот дел (сместен надвор од просторијата) се сместени компресорот и кондензаторот.

На тој начин, бучавата и дел од опремата се лоцирани надвор, а во просторијата останува испарувачот и вентилаторот кои го реализираат ладењето на внатрешниот воздух, со 100 % рецикулација.

ОВЛАЖУВАЧИ ЗА ВОЗДУХ

Овлажувачите се апарати за зголемување на влагата во воздухот, со додавање вода или водна пара.

Термичарите често имаат задача да обезбедат, во некој затворен простор, одредена релативна влажност поради луѓето што таму престојуваат или процесот што таму се одвива.

Овлажувачите може да се поделат во две групи: стамбени и индустриски, (-, 2012b)

Капацитетот на првите се изразува во литри на ден, а на индустриските во литри на час.

Стамбените овлажувачи се изведуваат како: овлажувачи со сад, овлажувачи со влажен елемент или овлажувачи со елемент за распрскување на водата.

Овлажувачите со сад имаат сад наполнет со вода и поставен на грејно тело. Количеството на вода што минало во воздухот и му ја зголемило влажноста, се зголемува со додавање на електричен грејач во садот или со вградување на вертикални прегради во садот, за да се зголеми испарувачката површина.

Овлажувачите со влажен елемент поседуваат вертикална плоча, обложена со ткаенаина што континуирано се овлажува, на која наидува воздухот и се овлажува.

Во друга изведба, овие овлажувачи се опремени со вентилатор чии перки зафаќаат вода од водно корито и ја расфрлаат, во облик на капки, низ околниот воздух.

Во распрскувачките овлажувачи водата се пушта, капка по капка, на хоризонтален кружен сад кој се врти и ја распрскува во воздухот.

Индустриските овлажувачи имаат слична конструкција, но поголем капацитет.

СУШАЧИ ЗА ВОЗДУХ

Сушењето на воздух се реализира на два начина: (1) со ладење на воздухот, (2) со примена на одвлажувачи.

По првата метода, воздухот се лади под неговата точка на роса и одделува влага. Уредите што работат на овој принцип користат ладилна машина. Воздухот минувајќи над испарувачот се лади и суши, односно одделува дел од својата влага.

За сушењето по втората метода воздухот струи над материјал што е способен да му одземе дел од неговата влага. На пример, кај регенеративните топлиноизменувачи, роторот може да биде изработен од керамика и силикагел и да го суши воздухот. Цврсти одвлажувачи се силикагелот, зеолитите (молекуларни сита), хигроскопните соли. Одвлажувачите може да бидат и течни, на пример, литиум хлорид, гликолен раствор.

РАСПРЕДЕЛИТЕЛИ ЗА ВОЗДУХ

Распределителите за воздух имаат задача да го испорачаат кондициониранiot воздух, до затворениот простор за кој е наменет, директно, тивко и економично.

Воздухот се распределува со лимени канали, од правоаголен или кружен облик, изработени најчесто од поцинкуван челичен лим. Современите машини за подготовка на лимот се автоматски, на едниот крај влегува табла лим, а на другиот излегуваат скроени елементи кои одат на доработка со спојување.

Се користат и канали од алуминиумски лим (за хемиски погони, во индустријата за храна), пластични материјали (за воздух со агресивни загадувачи), од бетон и цигли (за големи пресеци), од посебна конструкција на алуминиумски лим (за свитливи црева за поврзување на каналите со елементите за уфрлување и исфрлување на воздухот од просторијата).

Системите за распределба на воздух се проектираат решавајќи ги проблемите: расположив простор, распределба во просторот, бучава, поврзување на каналите, топлински добитоци и губитоци, балансирање,

противпожарна заштита, почетни инвестиции, трошоци за одржување.

Во тие системи воздухот се движи под дејство на вентилатор. Тој се одбира од условот да ги совлада сите отпори во струјниот тек и да обезбеди доволна брзина на воздухот низ елементите за уфрлување на воздух во затворениот простор.

ЕЛЕМЕНТИ ЗА УФРЛУВАЊЕ И ИСФРЛУВАЊЕ НА ВОЗДУХ

Облиците и функциите на елементите за уфрлување и исфрлување на воздух во затворен простор се многу различни.

Тие се изработуваат од челик, алуминиум или пластични материјали.

Кога се правилно димензионирани и лоцирани, тие го контролираат износот на уфрлениот воздух кој е потребен за предвиденото движење на воздухот и изедначување на температурата на воздухот во затворениот простор.

Затворениот простор во кој се уфрлува кондиционираниот воздух има и елементи за исфрлување на воздух. Овие елементи може да се поврзани на канал за исфрлување на искористениот воздух или само да го спроведуваат воздухот од еден во друг простор.

10.7.-2. ЛАДИЛНИ КУЛИ

Ладилната кула се користи за ладење на вода со помош на воздух.

Кулите за ладење на вода реализираат намалување на температурата на водата трошејќи до 5 % од вкупното количество на вода, (-, 2012a).

Во инсталациите за кондиционирање на воздух, кулите за ладење на вода одземаат 20 до 1800 kW топлински тек, а во индустријата, бидејќи се вградуваат во модулна изведба, нема ограничување.

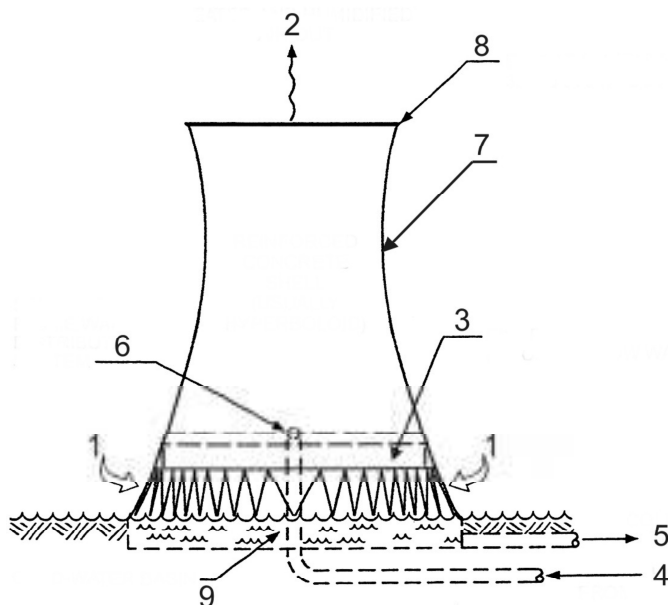
Тие се поставуваат на земја и на објекти. Кога се лоцирани на земја треба да бидат оддалечени најмалку 30 m од објектите, за да не ги оптоваруваат со бучава и влага.

Две основни конструкции на ладилни кули се во примена: (1) со

природна циркулација на воздухот, (2) со принудна циркулација на воздухот.

Ладилните кули од првата група претставуваат големи градежни објекти, со вообичаена висина од над 100 m. Тие се градат во облик на широк оџак, низ кој струи огромна маса воздух и ја лади топлата вода во топлиноизменувачот на кулата. Топлиноизменувачот е основниот функционален дел на ладилната кула и од неговата конструкција зависи интензитетот на ладење. Топлата вода се доведува над топлиноизменувачот и гравитационо се слева надолу. Оладената вода се собира во бетонски базен, поставен под ладилната кула, а потоа со пумпа се враќа во рециркулациониот ладилен круг, каде повторно се загрева.

Пример на ладилна кула со природна циркулација на воздухот е скициран на Слика 10.7.-1..



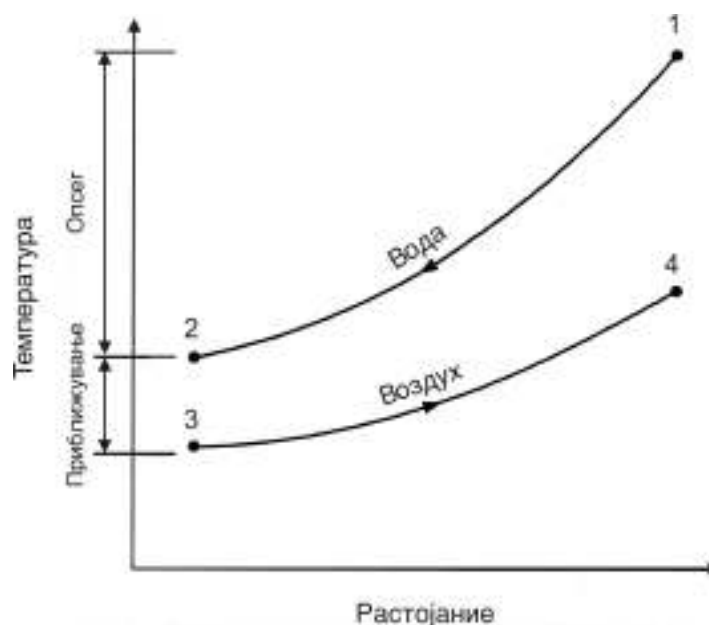
1 - влезен воздух, 2 - излезен воздух, 3 - топлиноизменувач, 4 - топла вода, 5 - ладна вода, 6 - распределител, 7 - бетонски ѕид, 8 - горна платформа за контролни мерење, 9 - бетонски базен за ладна вода

Слика 10.7.-1. Ладилна кула со природна циркулација на воздухот

Во Македонија се изградени пет ладилни кули со природна циркулација на воздухот. Три единици се поставени во термоелектраната во

Битола, една во термоелектраната во Кичево, една во железарницата во Скопје. Тоа се директно-допирни ладилни кули во кои водата се лади преку процес на истовремен пренос на топлина и маса. Струењето на воздухот низ ладилната кула се одвива под дејство на силата на земјината гравитација. Со овлажувањето и загревањето во топлиноизменувачот тој станува полесен од воздухот во околната атмосфера и затоа се движи нагоре, со што повлекува во ладилната кула ново количество на свеж воздух.

Двата работни флуида, водата и воздухот, струјат противнасочно. Температурните односи помеѓу водата и воздухот се дадени на Слика 10.7.-2..



1 - вода (влез), 2 - вода (излез), 3 - воздух (влез), 4 - воздух (излез),
5 - опсег на ладење, 6 - приближување

Слика 10.7-2. Температурни односи помеѓу водата и воздухот при противнасоично струење во ладилна кула

На Слика 10.7.-2. е покажано намалувањето на температурата на водата (од точка 1 до точка 2) и зголемувањето на температурата на влажниот термометар на воздухот (од точка 3 до точка 4).

Температурната разлика на влезната и излезната вода се имену-

ва “опсег на ладење”.

Температурната разлика помеѓу излезната вода и температурата на влажниот термометар на влезниот воздух се именува “приближување кон температурата на влажен термометар” или кратко “приближување”.

Приближувањето е функција од моќноста на ладилната кула. Поголема ладилна кула реализира поголемо приближување, односно поладна излезна вода за специфицирани: топлинско оптоварување, протек на вода, влезни услови на воздухот. Така, количеството на топлина што е пренесено од ладилната кула во атмосферата е секогаш еквивалентно на топлинското оптоварување што е внесено во ладилната кула, додека температурното ниво на кое топлината е пренесувана е определено со термичката моќност на ладилната кула и температурата на влажниот термометар на влезниот воздух.

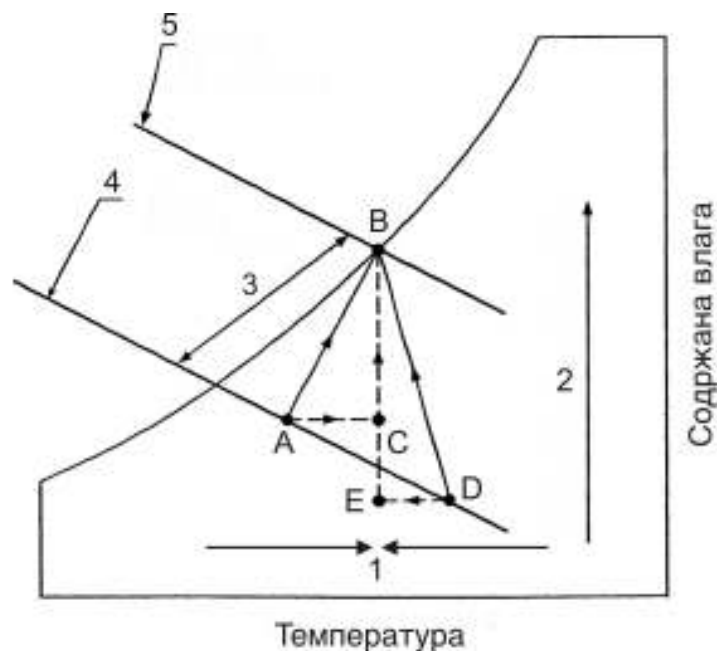
Термичките перформанси на ладилната кула зависат во принцип од температурата на влажниот термометар на влезниот воздух.

Термичката моќност на ладилната кула може да се дефинира преку следните параметри: влезна состојба на воздухот, намалувањето на температурата на водата, протекот на водата.

Психрометриската анализа на воздухот што минува низ ладилната кула е покажана на Слика 10.7.-3..

Воздухот влегува во ладилната кула на амбиентни услови (точка А), прима топлина и маса од водата и на излезот се наоѓа во заситена состојба (точка В). Топлината што е пренесена од водата на воздухот е еднаква на разликата на енталпиите на влезниот и излезниот воздух ($i_B - i_A$). Бидејќи линиите на константна енталпија скоро се совпаѓаат со продолжениот дел на прекршената на $\phi = 1$, изотерма на влажен термометар, промената на енталпијата може да се одредува и преку промената на температурата на влажниот термометар на воздухот. Векторот АВ кој ја претставува вкупно примената топлина на воздухот може да се подели на компонента АС која го претставува осетниот дел на топлината и копонента СВ, која го претставува латентниот дел од топлината.

Ако влезните услови на воздухот се променат и тој влегува во ладилната кула наместо со состојба А, со состојба D, што значи на иста температура на влажен термометар, но повисока температура на сув



1 - пренос на осетна топлина, 2 - пренос на латентна топлина и маса,
3 - целосен пренос на топлина, 4 - влезна температура на влажен термометар,
5 - излезна температура на влажен термометар

Слика 10.7.-3. Психрометричка анализа на воздух што минува низ ладилна кула

термометар, вкупно пренесената топлина останува иста ($i_B - i_A = i_B - i_D$), но осетната и латентната компонента се значително променети. DE го претставува осетното ладење на воздухот, а EB латентното греење на воздухот. Така за ладење на водата, се добиваат различни односи на осетната и латентната компонента.

Односот на латентната и осетната топлина е важен во анализата на искористувањето на водата во ладилната кула. Преносот на маса, односно исплапувањето, се одвива само врз основа на латентната топлина. Бидејќи од примерот со изложените состојби на влажниот воздух (A и D) е јасно дека температурата на сувиот термометар (или релативната влажност), влијае на односот на осетна кон латентна компонента на топлината, таа го условува и износот на исплапената вода. $x_B - x_A$ е помал од износот $x_B - x_D$ бидејќи латентниот пренос на топлина, а тоа

значи и преносот на маса е помал за процесот АВ во однос на процесот DB.

Износот на исхлапената вода е од рангот 1 % од вкупниот воден тек за секои 7 К оладување на водата, (-, 2008a). Сепак количеството на исхлапена вода за време во работната сезона е помало од проектното бидејќи осетната компонента на топлината се зголемува со намалување на влезната температура на воздухот.

Основна задача на ладилната кула е да го постигне потребното ладење на водата при сите климатски услови, односно да го обезбеди опсегот на ладење за кој е проектирана.

Се поставува прашањето: “Од што зависи реализирањето на опсегот на ладење што се бара од ладилна кула со специфицирана конструкција?”.

Одговорот на поставеното прашање се бара во анализата на комбинациите на познати протеци на вода, топлински оптоварувања и конструкции на росилникот. Од таа анализа произлегуваат типските решенија што ги нудат производителите на ладилни кули. За нив тие објавуваат перформансни криви. Во перформансните криви се содржани резултатите од претходната анализа, но опсегот на ладење се добива дури откако тие ќе се применат за одредена локација, односно за конкретна микроклима.

10.7.-3. СУШИЛНИЦИ

Основни компоненти на секоја сушилница се: материјал што се суши, средство за сушење, конструктивни елементи.

Влажниот материјал влегува во сушилницата со почетна содржана влага, а како резултат на сушењето излегува од неа со крајна содржана влага. Претходно, тој се испитува лабораториски и неговите основни карактеристики се резимираат во термофизички табели, рамнотежни криви и криви на сушење.

Во литературата за сушилниците се користат следниве основни поими: материјал што се суши, средство за сушење, конструктивни елементи, содржана влага, почетна содржана влага, крајна содржана влага, рамнотежни криви, криви на сушење.

Материјалот што се поставува во сушилницата и се изложува на процесот на сушење се именува “материјал што се суши”.

“Средството за сушење“ е воздухот.

Под поимот “конструктивни елементи“ се групираат елементите од кои е оформена сушилницата.

Влагата што се наоѓа во влажниот материјал се именува “содржана влага”.

Таа се изразува тежински. Во примена се две големини: X_{s0} - содржана влага по сува основа, X_{v0} - содржана влага по влажна основа,

$$\begin{aligned} X_{s0} &= \text{влага во материјалот/сув материјал} = \\ &= m_w/m_{sm}, \end{aligned} \quad (10.7.-1.)$$

$$\begin{aligned} X_{v0} &= \text{влага во материјалот/влажен материјал} = \\ &= m_w/m_{vm}. \end{aligned} \quad (10.7.-2.)$$

Содржаната влага по сува основа и содржаната влага по влажна основа се поврзани со изразите,

$$X_{s0} = X_{v0} / (1 - X_{v0}), \quad (10.7.-3.)$$

$$X_{v0} = X_{s0} / (1 + X_{s0}). \quad (10.7.-4.)$$

На пример, влажниот материјал што е составен од 20 % влага и 80 % сув материјал има $X_{s0} = 0,25$, а $X_{v0} = 0,20$.

Методите за одредување на содржаната влага за разни материјали се предмет на стандардизација на секоја земја. На пример, одредувањето на содржаната влага за пченица се врши преку процес на сушење на 130 °C во траење од 90 минути, а за ориз со сушење на 130 °C, за 60 минути, (- , 1978; - 1966).

Содржаната влага што ја има материјалот во моментот на започнување на процесот на сушење се именува “почетна содржана влага”.

Почетната содржана влага е точно одредена за секој контролиран процес на сушење. При поставување на режимот на процесот на сушење таа ја условува почетната работна состојба на сушилницата. Во практиката таа со контролира и одржува на специфицираната вредност.

Почетната содржана влага е карактеристика на материјалот и за-

виси од состојбата во која тој природно се наоѓа пред да се изложи на сушење.

На пример, почетната содржана влага за житата е условена од микроклиматските услови во периодот на бербата и од зрелоста на зрното.

Содржаната влага на материјалот што се суши, во моментот на завршување на процесот на сушење, се именува “крајна содржана влага”.

Таа е точно одредена за секој контролиран процес на сушење. Со нејзиното постигнување сушењето е завршено. Во практиката таа се контролира и одржува на специфицираната вредност.

Крајната содржана влага е карактеристика на материјалот стекната во процесот на сушење. Таа зависи од намената на сушениот производ. Зрното што ќе се користи веднаш по сушењето, се суши на повисока крајна содржана влага од онаа на зрното што е предвидено за едногодишно или повеќегодишно складирање.

Рамнотежните криви го покажуваат рамнотежното однесување на хигроскопните материјали. Тие регистрираат колкава е содржаната влага во некој материјал, ако тој се остави доволно време во воздух со одредени карактеристики (позната температура и релативна влажност).

Рамнотежните криви се добиваат со експериментални испитувања.

Овие криви, како и табелите за термофизичките својства на материјалот што се суши се неопходни податоци, со кои треба да се располага пред почетокот на сушењето.

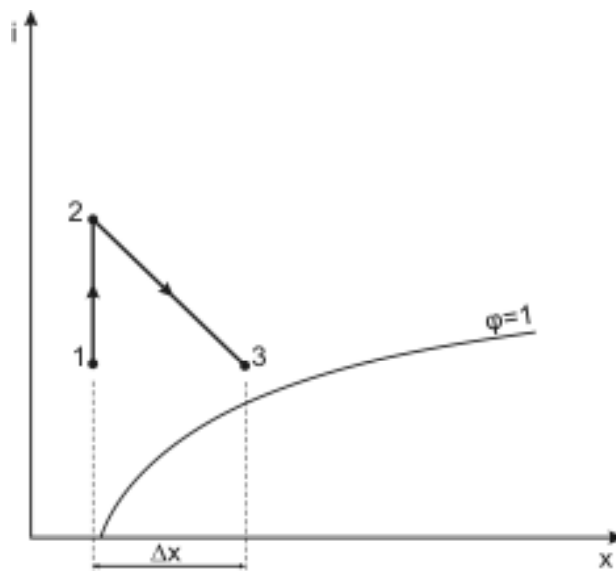
Кривите на сушење покажуваат како се менува содржаната влага во материјалот за време на процесот на сушење. Тие се добиваат со експериментални испитувања.

ЕДНОСТЕПЕНО СУШЕЊЕ

Сушењето на влажен материјал со загреан воздух, според скицата на Слика 10.7.-4., се именува “еденостепено сушење”.

Тоа е теоретски процес на сушење за кој важат три претпоставки: (1) нема губитоци на топлина од сушилницата кон околината,

(2) во сушилницата нема топлински извори или понори, (3) влажењето на воздухот се одвива по линијата на константна енталпија.



1 - атмосферски воздух, 2 - влез во сушилницата, 3 - излез од сушилницата, Δx - одземена влага од материјалот што се суши, односно примена влага во воздухот

Слика 10.7.-4. Едностепено сушење

Процесот на сушење е посматран преку промените што ги претрпува средството за сушење, воздухот. Тој минува низ две етапи, греење и влажење.

Греењето се применува за да му се зголеми способноста за примање на влага. Атмосферскиот воздух, кај нас, се наоѓа во температурниот опсег од -20 до 40 °C што е најчесто непогодно за негово директно користење. Максималната температура на загревање е условена од осетливоста на материјалот што се суши.

Втората етапа, промената 2 - 3, претставува влажење на воздухот, а сушење за материјалот. Промената на воздухот при константна енталпија се сведува на адијабатско заситување, кое во практиката се реализира до релативна влажност од 80 % до 90 %.

Потребното количество на воздух за сушење изнесува,

$$m_a = \frac{m_w}{\Delta x}, \quad (10.7.-5.)$$

а потребниот топлински тек за греење на воздухот,

$$Q = m_a (i_2 - i_1) . \quad (10.7.-6.)$$

ПОВЕЌЕСТЕПЕНО СУШЕЊЕ

За да се избегнат високите температури, сушилниците се изведуваат и како повеќестепени.

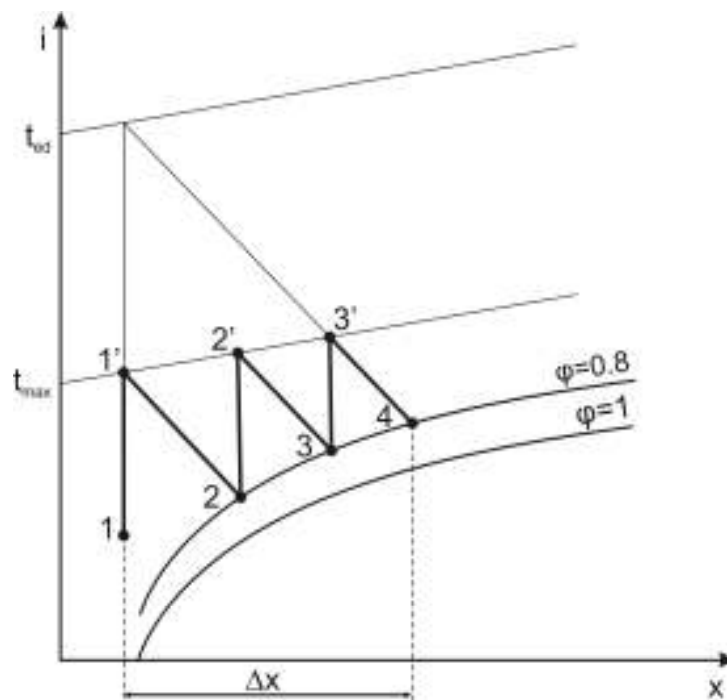
На Слика 10.7.-5. покажана е скица во $i - x$ дијаграм за однесувањето на воздухот во улогата на средство за сушење.

Вкупно потребната специфична топлина за греење на воздухот изнесува,

$$q = q_1 + q_2 + q_3 , \quad (10.7.-7.)$$

односно,

$$q = i_4 - i_1 . \quad (10.7.-8.)$$



Слика 10.7.-5. Повеќестепена сушилница - однесување на воздухот

Ако таа топлина се сведе на влагата што е одземена од материјалот што се суши, се добива основниот термички показател за квалитетот на сушилницата, “колку енергија троши сушилницата по килограм испарена вода?”,

$$\frac{q}{m_w} = \frac{i_4 - i_1}{x_4 - x_1} \quad (10.7.-9.)$$

На 0 °C, за испарување на еден килограм вода се потребни 2500 kJ/kg топлина. Во практиката, најквалитетните сушилници трошат околу 3500 kJ/kg топлина, а во продажба има сушилници што трошат и двојно, и тројно повеќе.

При исти влезни карактеристики на воздухот, во едностепена сушилница, за реализација на $\Delta x = x_4 - x_1$, би требало да се изврши греење на воздухот до многу висока температура, ($t_{ed} \gg t_{max}$).

СУШЕЊЕ СО РЕЦИРКУЛАЦИЈА

Процесот на сушење, во кој еден дел од средството за сушење повторно се користи во сушилницата се именува “сушење со рециркулација”, Слика 10.7.-6..

Со рециркулација се постигнуваат позитивни ефекти во однос на греењето на воздухот, а негативни ефекти во однос на способноста на воздухот за одземање на влага.

Односот на износот на рециркулациониот воздух и целосното количество на воздух во сушилницата се именува “рециркулационен однос”,

$$r = \frac{m_{ar}}{m_{ac}} = \frac{(m_{ac} - m_a)}{m_{ac}} = 1 - \frac{m_a}{m_{ac}}. \quad (10.7.-10)$$

Со помош на изразот за атмосферски воздух,

$$m_a = \frac{m_w}{x_3 - x_1}, \quad (10.7.-11.)$$

и за целосното количество на воздух,

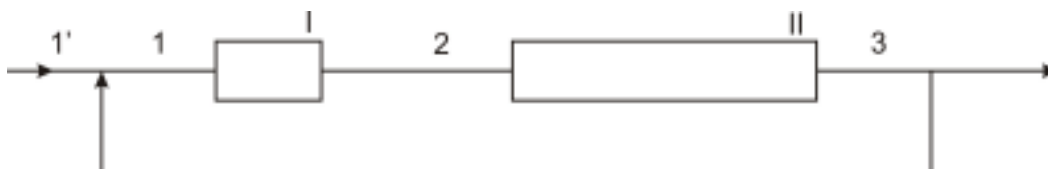
$$m_{ac} = \frac{m_w}{x_3 - x_1}, \quad (10.7.-12.)$$

се добива,

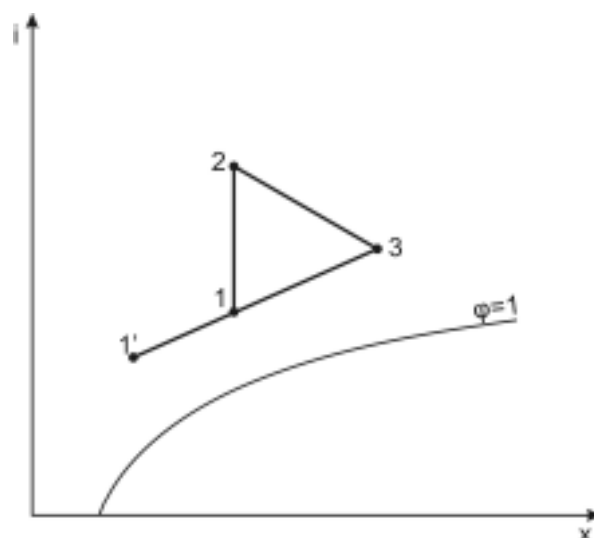
$$r = \frac{x_1 - x_1'}{x_3 - x_1}. \quad (10.7.-13.)$$

Зголемувањето на рециркулациониот однос значи, во атмосферскиот воздух да се внесува се повеќе рециркулационен воздух, односно

воздух оптоварен со влага. Со тоа средството за сушење има се помала способност за примање на влага и се појавува потреба од поголема сушилница. Зголемените трошици за градба на поголема сушилница се



I - грејач, II - сушилница, 1'- состојба на атмосферскиот воздух, 1 - состојба на воздухот пред грејачот, 2 - состојба на воздухот на влезот во сушилницата, 3 - состојба на воздухот на излезот од сушилницата



Слика 10.7.-6. Сушење со рецикулација

надокнадуваат со смалени трошоци за греење, што упатува на заклучок дека постои некој оптимален рецикулационен однос.

СУШЕЊЕ НА ХРАНА

Сушењето на храна е процес што се спроведува за да се сочува или зголеми квалитетот на материјалот што се суши.

Големиот износ на содржана влага во храната е основниот проблем за нејзино долготрајно користење. На пример, свежиот домати, пиперка, кромид имаат над 80 % содржана влага по влажна основа, а сушениот домати, пиперка и кромид 10 % (Мојсовски и соработници, 2004).

Човекот усовршува две основни методи за чување на храна, сушење и замрзнување. Сушењето е во голема предност пред замрзнувањето кое претставува забавен процес на расипување на материјалот што се замрзнува. Сушилницата за храна треба да реши два проблема: (1) да го сочува или зголеми квалитетот на материјалот што се суши, (2) процесот на сушење да го реализира во минимален временски период. Второто барање е посебно изразено кај индустриските сушилници за храна, но во целост важи и за фармерските сушилници за храна. Временската ефикасност се поставува пред сушилниците бидејќи сушењето е процес што се спроведува веднаш по собирањето на зрелите земјоделски производи, а нивното големо количество и опасноста од неповолни временски услови не дозволуваат одлагање на сушењето.

Во материјалот што следува, внимание им е посветено на сушилниците за сушење на житата, зеленчукот и овошјето, од две причини: (1) тоа е основната храна за човекот и животните на Земјата, (2) во сушилниците за овие земјоделски производи воздухот е основно средство за сушење.

СУШЕЊЕ НА ЖИТА

Пченицата, пченката, оризот, јачменот, 'ржта се главните претставници на оваа храна.

Сушењето на житните зрна е слично со воздушното сушење на другата храна. Сепак, повеќе од материјалите што се сушат, како на пример овошјето и зеленчукот, содржат поголемо количество вода од нив. Кога се сушат житните зрна, им се отстранува ограничен износ на влага. Во практиката, нема потреба тие да бидат сушени од почетна содржана влага по влажна основа, повисока од 40 %, ниту до крајна содржана влага по влажна основа пониска од 10 %. Основните податоци за сушењето на житни зрна се дадени во Табела 10.7.-2..

СУШЕЊЕ НА ЗЕЛЕНЧУК

Во сушилниците за зеленчук се суши: домати, пиперка, кромид, лук, компир, магдонос, морков. Содржаната влага во зеленчукот, по

влажна основа, се менува од 95 % до 5 %.

Обликот на зеленчукот му е различен, бидејќи претставува плод, корен, стебло, лист на растението.

Во Табела 10.7.-3. се дадени основните податоци за сушењето на зеленчук.

Доматот се суши на парчиња или како сок. Во двата случаја прво

Табела 10.7.-2. Сушење на житни зрна - основни податоци

	Пченица	Пченка	Ориз	Јачмен	Рж
Почетна содржана влага на материјалот што се суши, по влажна основа, X_{vo}^o , %					
- максимална (жетвена)	38	35	30	30	25
- оптимална,	18-20	28-32	25-27	18-20	16-20
- вообичаена.	9-17	14-30	16-25	10-18	12-18
Крајна содржана влага на материјалот што се суши, по влажна основа, X_{vo}^* , %					
- за складирање 1 година,	14	13	13	13	13
- за складирање 5 години.	11	10	10	11	11
Почетна температура на воздухот, t_a^o , °C	40	50	40	40	40
Крајна температура на воздухот, t_a^* , °C	90	90	55	90	90
Состојба на материјалот што се суши,					
- нормално,	зрно	зрно	арпа	зрно	зрно
- применувано.		клип	ориз		
Максимална дозволена температура на материјалот што се суши t_{max} , °C	40	60	38	40	40

се мие со вода (потопување во топла вода на 90 °C, една до три минути), а потоа се чисти од остатокот на рачката. Следна операција е или сецкање на парчиња, нормално на оската на плодот, со дебелина 3 - 5 mm, или втечнување во миксер. При сушењето на парчиња се добива до 6 % сув домати, а при сушењето на сок до 2 % сув производ.

Пиперката се чисти од рачка и семе, се мие во вода, а потоа се сече на парчиња.

Кромидот се суши на парчиња. По чистењето се сече на парчиња

Табела 10.7.-3. Сушење на зеленчук - основни податоци

	Домат	Пиперка	Кромид	Лук	Компир	Магнос	Морков
Почетна содржана влага на материјалот што се суши, по влажна основа, $X_{vo}^o, \%$	95	85	90	70	75	80	70
Крајна содржана влага на материјалот што се суши, по влажна основа, $X_{vo}^*, \%$	6	8	10	10	8	12	10
Почетна температура на воздухот, $t_a^o, ^\circ C$	50	60	50	60	60	50	50
Крајна температура на воздухот, $t_a^*, ^\circ C$	70	75	70	70	80	65	70
Состојба на материјалот што се суши, - нормално, - применувано.	2 3	2	2	2	2 4	2	2 4

Легенда: 1-цел плод, 2-парче, 3-сок, 4-коцка.

со дебелина од 2 mm, нормално на оската.

Лукот се суши во парчиња дебели до 4 mm.

Компирот се суши во парчиња или во коцки. Прво се мие, а потоа се лупи и се сече во парчиња со дебелина 3 - 5 mm или во коцки со страни 10 - 15 mm. Вообичаено е бланширање на компирот, пред да се суши. Бланширање е процес на краткотрајно изложување на материјалот на врела вода или водена пара.

Морковот прво се чисти и бланшира, а потоа се суши исецкан во кругови со дебелина 3 mm или коцки со страни 10 mm.

СУШЕЊЕ НА ОВОШЈЕ

Овошјето, како и зеленчукот, содржи многу вода и затоа нема голема трајност. Сушењето овозможува да се добие стабилен производ што може да се користи подолго време.

Во Табела 10.7.-4. се дадени основните податоци за сушењето на овошје.

Јаболкото се мие со вода, се лупи, се ослободува од делот со семето и се сече на кружни прстени со дебелина, не поголема од 4 mm.

Кајсијата, по миењето со вода, се сече на половинки.

Крушата се мие со вода, се лупи, се чисти од централниот дел со семето и се сече на кружни прстени.

Сливата се чисти од рачки и се мие со вода. Некои производители ја отстрануваат и семката.

Смоквата само се мие со вода и се суши во природниот облик или се оформува секој плод во ист облик.

На бананата и се отстранува лушпата и се сече на парчиња со дебелина до 15 mm.

Грозјето се чисти и се мие со вода.

Вишната може да се суши со семката или без неа. Во првата фаза се одделуваат рачките, а потоа следи миење со вода.

Малината се мие со вода пред да се отпочне со сушење.

Пред сушењето се применуваат и подготвителните операции, бланширање и сулфурирање. Бланширањето обично се изведува со изложување на материјалот што се суши на водна пара, во траење од 2

Табела 10.7.-4. Сушење на овошје - основни податоци

	Јаболко	Кајсија	Круша	Слива	Смоква	Банана	Грозје	Вишна	Малина
Почетна содржана влага на материјалот што се суши, по влажна основа, $X^0_{vo}, \%$	85	85	85	80	80	70	85	85	90
Крајна содржана влага на материјалот што се суши, по влажна основа, $X^*_{vo}, \%$	25	20	15	25	25	11	15	15	25
Почетна температура на воздухот, $t^0_a, ^\circ\text{C}$	45	40	40	40	50	40	70	55	40
Крајна температура на воздухот, $t^*_a, ^\circ\text{C}$	75	65	75	75	75	70	80	75	65
Состојба на материјалот што се суши, - нормално.	2	2	2	1	1	2	1	1	1

Легенда: 1-цел плод, 2-парче

до 4 минути. Сулфурирањето е, исто како и бланширањето, операција за дезинфекција на материјалот. На пример, за сулфурирање на еден тон јаболки се трошат 3 kg сулфур и операцијата трае до 30 минути.

За добивање на атрактивен изглед, односно сјај на исушениот производ тој може да се изложи и на краткотрајно потопување во раствор од гликоза или во сопствен сок.

Кајсијата, крушата, сливата и смоквата може да се бланшираат.

Операцијата сулфурирање може да се примени на јаболкото, кајсијата, крушата, смоквата, бананата и грозјето.

Се применуваат и подготвителни операции кои произлегуваат од локалната традиција. На пример, на островот Хвар, пред да се изложат на процесот на сушење, смоквите се потопуваат во морска вода.

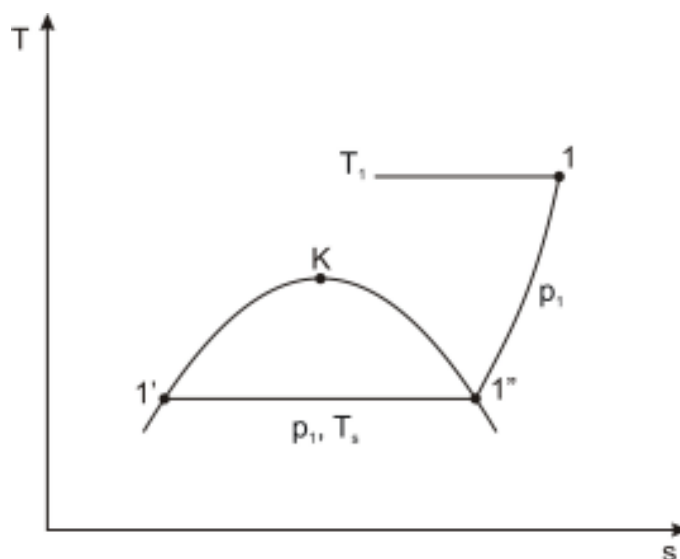
11. ВТЕЧНУВАЊЕ НА ГАСОВИ

Гасовите се втечнуваат за да може да се разделат на нивните компоненти и за да се олесни нивното складирање и транспорт.

Во термиката од најголем интерес е втечнувањето на воздухот. Втечнувањето на воздухот се одвива на многу ниски температури.

За притисок на стандардна атмосфера од 101325 Pa водата испарува на 100 °C, а течниот воздух испарува на приближно - 200 °C.

Во условите на стандардна атмосфера, $t = 15\text{ °C}$ и $p = 101325\text{ Pa}$, воздухот има состојба на високо прегреана пара, Слика 11.-1..



1 - воздух во услови на стандардна атмосфера,

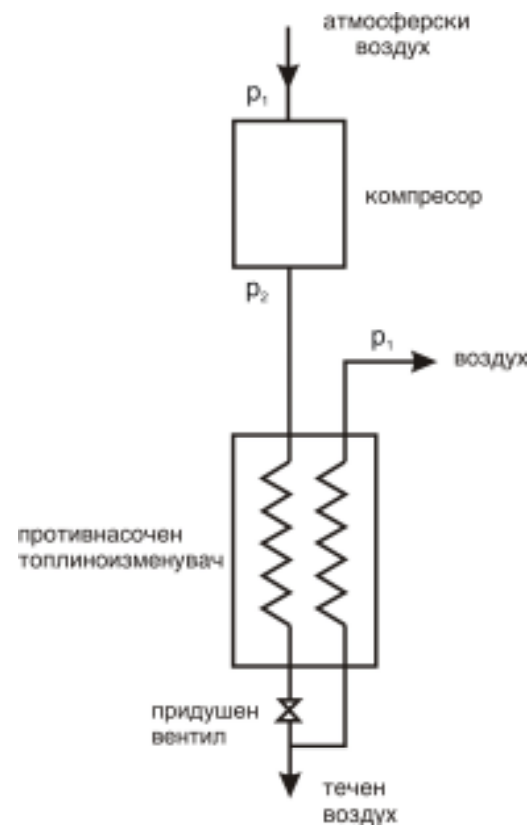
1' - воздух во течна состојба,

1'' - воздух во гасна состојба.

Слика 11.-1. Состојби на воздухот

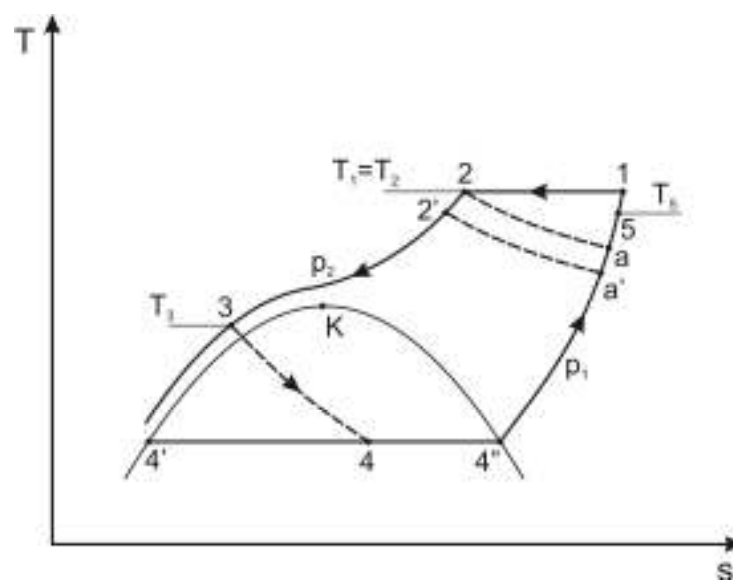
11.1. ВТЕЧНУВАЊЕ НА ВОЗДУХ СПОРЕД LINDE

На прашањето како да се втечни воздух, односно како да се стигне од состојбата во точка 1 до состојбата во точка 1', на Слика 11.-1., вистинскиот одговор го дал Linde искористувајќи го ефектот на Joule-Thomson и поставувајќи конструкција на противнасочен топлиноизменувач, Слика 11.1.-1..



Слика 11.1-1. Втечнување на воздух според Linde - функционална шема

Процесот на втечнување на воздух е претставен во T - s дијаграм на Слика 11.1.-2..



Слика 11.1.-2. Втечнување на воздух според Linde

Атмосферскиот воздух прво се компримира изотермно, потоа се лади изобарно и на крајот се придушува на почетниот притисок.

Компресијата, 1 - 2, се одвива во компресор што е интензивно ладен со вода. Притисокот во состојба 2 може да има вредност од 50 до $200 \cdot 10^5$ Pa.

Ладењето, 2 - 3, се реализира во противнасочен топлиноизменувач, со воздух што минал низ придушниот вентил. Кога уредот почнува со работа, воздухот со состојба 2 влегува во придушниот вентил, а од него излегува со состојба а. Температурата T_a е пониска од температурата T_2 што овозможува воздухот да се олади од состојба 2 до состојба 2'. Повторувањето на тој циклус обезбедува се пониски температури за влезниот воздух во придушниот вентил. Кога воздухот пред придушниот вентил ќе ја постигне состојбата 3, по придушувањето ќе се добие состојбата 4. Таа состојба се наоѓа во заситеното подрачје и тука воздухот е составен од заситена пара со состојба 4'' и течен воздух со состојба 4'.

Втечениот дел од воздухот, z kg/kg, се пресметува од топлинскиот биланс на противнасочниот топлиноизменувач,

$$i_2 = z i_{4'} + (1-z) i_5 . \quad (11.1.-1.)$$

Од еден килограм компримиран воздух, состојба 2, се добива z kg/kg втечен воздух, состојба 4', а остатокот $(1-z)$ kg/kg воздух, се исфрлува со состојба 5.

Следува,

$$z = \frac{i_5 - i_2}{i_5 - i_{4'}} . \quad (11.1.-2.)$$

Втечнувањето на воздухот со примена на противнасочниот топлиноизменувач и искористувањето на придушниот ефект, како што го замислил и реализирал Linde, овозможил индустриско производство на течен воздух кое има и економско оправдување.

11.2. ПРИДУШЕН ЕФЕКТ

Придушниот ефект го означува количникот од промената на температурата и намалувањето на притисокот при придушување на воздухот. Познат е под името Joule-Thomson-ов ефект.

Joule и Thomson со експерименти докажале дека:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i = \alpha \left(\frac{273}{T}\right)^2, \quad (11.2.-1.)$$

за температури од 0 °C до 100 °C и притисоци пониски од $6 \cdot 10^5$ Pa. Тие добиле дека за воздух коефициентот α изнесува $0,265 \text{ K} / 10^5 \text{ Pa}$, што значи дека придушниот ефект за температури околу 0 °C ќе биде:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i = 0,265 \text{ K} / 10^5 \text{ Pa},$$

На воздух со температура од 0 °C при придушување ќе му се намали температурата за приближно 1/4 K, за придушување во вредност од $\Delta p = 10^5 \text{ Pa}$.

Ова мало намалување на температурата на воздухот е важно при процесот на негово втечнување.

11.3. ВТЕЧНУВАЊЕ НА ВОЗДУХ СО ДВОЈНА ЦИРКУЛАЦИЈА СПОРЕД LINDE

Linde реализирал и инсталација за втечнување на воздух со двојна циркулација. Со неа се добива поголемо количество на втечен воздух.

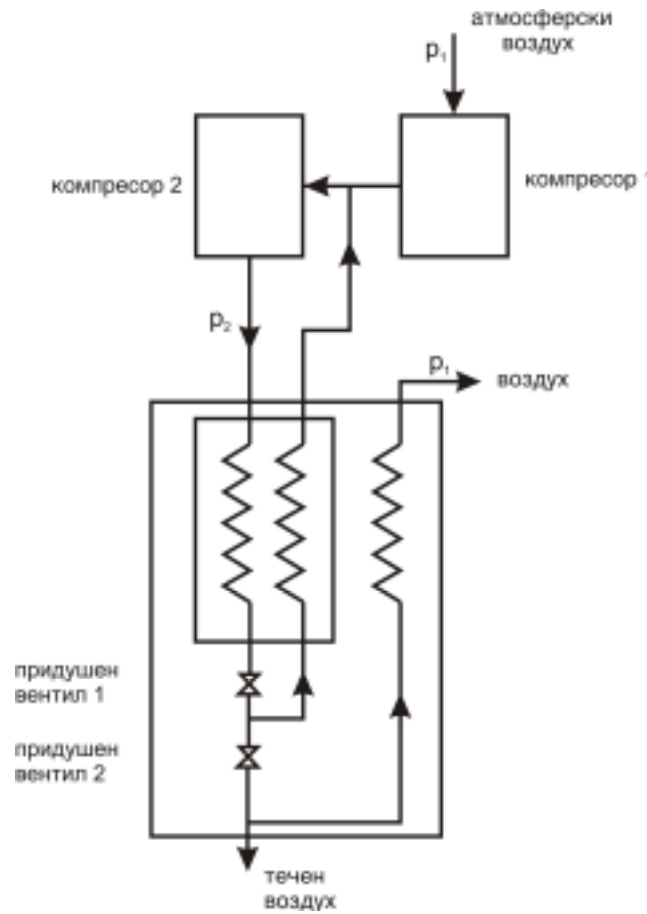
Функционалната шема е покажана на Слика 11.3.-1., а припадниот T - s дијаграм на Слика 11.3.-2..

Linde во својата инсталација со двојна циркулација применил двостепена компресија, двостепено придушување и троструен топлиноизменувач.

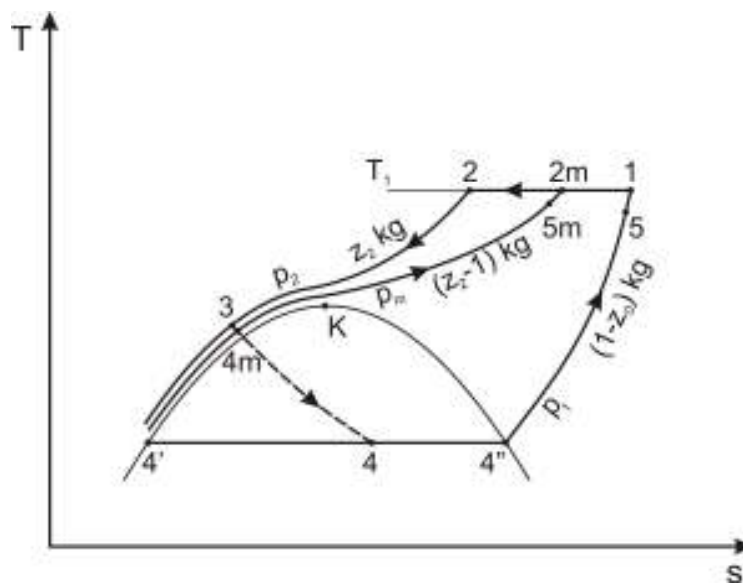
Во инсталацијата за втечнување на воздух со двојна циркулација, Linde вметнал придушување до притисок p_m . Воздухот по излез од вториот компресор, минува низ првиот придушен вентил и се дели на два дела. Еден дел $(z_2 - 1) \text{ kg}$ оди во противнасочниот топлиноизменувач, а другиот дел оди во вториот придушен вентил. По излегувањето од вториот придушен вентил воздухот се дели на течен дел $z_0 \text{ kg}$ и гасен дел $(1 - z_0) \text{ kg}$.

Од топлинскиот биланс на топлиноизменувачот следи,

$$z_2 \cdot i_2 = z_0 \cdot i_4 + (1 - z_0) i_5 + (z_2 - 1) i_{5m}. \quad (11.3.-1.)$$



Слика 11.3.-1. Функционална шема за втечување на воздух со двојна циркулација според Linde



Слика 11.3.-2. Втечување на воздух со двојна циркулација според Linde

Од Равенката (11.3.-1.) се добива количеството на втечен воздух,

$$z_0 = \frac{i_5 - i_{5m}}{i_5 - i_{4'}} + z_2 \frac{i_{5m} - i_2}{i_5 - i_{4'}}. \quad (11.3.-2.)$$

Максимално количество на втечен воздух би се добило во теоретскиот случај кога површината на топлиноизменувачот би била бесконечно голема. Тогаш би важело $i_{5m} \approx t_5 \approx t_2$ и во тој случај би се постигнало $i_{5m} = i_{2m}$, односно $i_5 = i_1$.

Сега Равенката (11.3.-2.) ќе добие облик,

$$z_{0,\max} = \frac{i_1 - i_{2m}}{i_1 - i_{4'}} + z_2 \frac{i_{2m} - i_2}{i_1 - i_{4'}}. \quad (11.3.-3.)$$

Со преуредување на обликот од претходната равенката се добива,

$$z_{0,\max} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{4'}} + (z_2 - 1) \frac{i_{2m} - i_2}{i_1 - i_{4'}}. \quad (11.3.-4.)$$

Првиот член од десната страна на Равенката (11.3.-4.) го претставува максималното количество на втечен воздух за инсталацијата на Linde со единечна циркулација, што се добива од Равенката (11.1.-2.), за топлиноизменувач со бесконечна површина, односно за $i_5 = i_1$.

12. ИЗГОРУВАЊЕ

Изгорувањето е процес на оксидација на горивата при кој се ослободува топлинска енергија.

Оксидацијата ја овозможува кислородот што е содржан во атмосферскиот воздух.

Интензитетот на процесот на изгорување зависи од: (1) интензитетот на реакција на компонентите од горивото со кислородот, (2) успешноста во снабдувањето на горивото со кислород и (3) температурата во просторот на изгорување.

Изгорувањето е толку поинтензивно колку што е избрано поповолно гориво, подобро снабдување на горивото со кислород и повисока температура.

12.1. ГОРИВА

Горивата се најголем извор на енергија. Основни горива се јагленот, нафтата, природниот гас и ураниумот или плутониумот користени во нуклеарната техника. Овие горива претставуваат необновлив извор на енергија, за разлика од обновливите извори на енергија во кои спаѓаат: хидроенергијата, сончевата енергија, ветерната енергија, геотермалната енергија, енергијата од биомаса и енергијата од плима и осека.

За користењето на јагленот, нафтата и природниот гас, односно за основните цврсти, течни и гасни горива, најважно е колку содржат јаглерод и водород.

При процесот на целосно изгорување водородот и јаглеродот што се наоѓа во горивото оксидира во вода (H_2O) и јаглерод диоксид (CO_2).

Повеќето основни горива содржат во себе и сулфур кој оксидира во сулфур диоксид (SO_2) или сулфур триоксид (SO_3).

12.2. ТЕМПЕРАТУРА НА ЗАПАЛУВАЊЕ

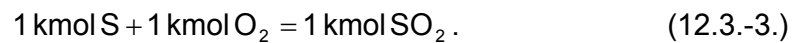
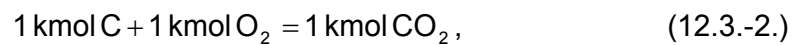
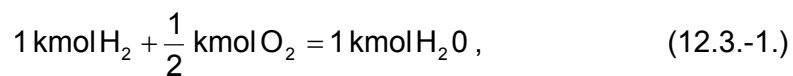
Во процесот на изгорување од горивото се ослободува енергија што е содржана во него и како резултат температурата расте. Ако топлината што се ослободува од горивото е поголема од онаа што се одне-

сува во околината се постигнува температура на запалување и изгорувањето продолжува, односно доаѓа до запалување на горивото. Во спротивниот случај изгорувањето ќе престане.

Следи заклучокот дека температурата на запалување не е некое еднозначно физичко својство на горивата.

12.3. СТЕХИОМЕТРИСКИ ОДНОСИ

При изгорувањето се задоволуваат следните стехиометриски равенки:



Изгорувањето по Равенката (12.3.-2.) се именува целосно или теоретско изгорување. Но, изгорувањето може да биде и нецелосно и тогаш важат равенките,



12.4. МИНИМАЛНО КОЛИЧЕСТВО НА ВОЗДУХ

Количеството на воздух што е потребно за целосно изгорување на горивото се нарекува минимално или теоретско потребно количество на воздух.

Таа се пресметува за 1 kg цврсто или течно гориво, а за 1 m³ гасно гориво.

12.4.-1. ЦВРСТИ ГОРИВА

Цврстите горива содржат јаглерод, водород, сулфур, кислород, азот, пепел и хигроскопна влага.

За овие компоненти, за 1 kg гориво, важи,

$$c + h + o + n + s + a + w = 1 \quad (12.4.-1.)$$

За да се одреди количеството на кислород во kmol што е потребно за изгорување, според Равенките (12.3.-1.), (12.3.-2.) и (12.3.-3.), мора да се знае колку kmol јаглерод, водород и сулфур има во 1 kg гориво.

Затоа од тежинскиот состав се добиваат овие количества изразени во kmol,

$$M'_c = \frac{c}{m_c}, M'_h = \frac{h}{m_{H_2}}, M'_s = \frac{s}{m_s}, M'_o = \frac{o}{m_{O_2}}, M'_n = \frac{n}{m_{N_2}},$$

што со молекулските тежини,

$$m_c = 12, m_{H_2} = 2, m_s = 32, m_{O_2} = 32, m_{N_2} = 28,$$

дава,

$$M'_c = \frac{c}{12}, M'_h = \frac{h}{2}, M'_s = \frac{s}{32}, M'_o = \frac{o}{32}, M'_n = \frac{n}{28}.$$

На пример, за јаглен со состав,

$$c = 0,72; h = 0,11; o = 0,08; a = 0,05; w = 0,04$$

количините во kmol ќе бидат,

$$M'_c = \frac{0,72}{12} = 0,06 \frac{\text{kmol}_c}{\text{kg}_G}, M'_h = \frac{0,11}{2} = 0,055 \frac{\text{kmol}_{H_2}}{\text{kg}_G},$$

$$M'_o = \frac{0,08}{32} = 0,0025 \frac{\text{kmol}_{O_2}}{\text{kg}_G}, M'_w = \frac{0,04}{18} = 0,0022 \frac{\text{kmol}_w}{\text{kg}_G}.$$

За изгорување на h kg, односно M'_h kmol водород, што е содржан во еден килограм гориво се троши, според Равенка (12.3.-1.), $M'_h/2$ kmol кислород. Затоа минималното потребно количество на кислород за изгорување на h kg водород ќе биде,

$$O_{m,h} = \frac{1}{2} M'_h = \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2} = \frac{h}{4} \frac{\text{kmol}_{O_2}}{\text{kg}_G}. \quad (12.4.-2.)$$

Сега и за јаглеродот и за сулфурот може да се запише,

$$O_{m,c} = 1M'_c = \frac{c}{12} \frac{\text{kmol}_c}{\text{kg}_G}, \quad (12.4.-3.)$$

$$O_{m,s} = 1M'_s = \frac{s}{32} \frac{\text{kmol}_s}{\text{kg}_G}. \quad (12.4.-4.)$$

Минималното количество на кислород што мора да се обезбеди со воздухот за изгорување на 1 kg гориво изнесува,

$$O_m = O_{m,c} + O_{m,h} + O_{m,s} - M'_o \frac{\text{kmol}_{O_2}}{\text{kg}_G}. \quad (12.4.-5.)$$

или,

$$O_m = \frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32} = \frac{c}{12} \left[1 + \frac{3h + \frac{3}{8}(o-s)}{c} \right] =$$

$$= \frac{c}{12} \cdot \sigma. \quad (12.4.-6.)$$

Големината σ се именува Molier - ова карактеристика на горивото.

Минималното потребно количество на воздух изнесува,

$$L_m = \frac{O_m}{0,21}, \quad (12.4.-7.)$$

каде 0,21 е волуменскиот дел на кислородот во воздухот.

12.4.-2. ТЕЧНИ ГОРИВА

Течните горива со обично јаглеводороди, $C_xH_yO_z$.

За нив, според стехиометриските односи, односно според Равенките (12.3.-1.) и (12.3.-2.), потребното количество на кислород изнесува,

$$O_m = x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \frac{\text{kmol}_{O_2}}{\text{kmol}_G}. \quad (12.4.-8.)$$

12.4.-3. ГАСНИ ГОРИВА

Гасните горива се обично јаглеводороди, C_xH_y .

Волуменските делови на елементите на горивото се обележуваат со нивната хемиска ознака и со индекс "примарно", на пример со CO' , H_2' и слично.

Потребното количество на кислород изнесува,

$$O_m = \frac{1}{2}(CO' + H_2') + 2CH_4' + 3C_2H_4' +$$

$$+ \sum (x + \frac{y}{4})C_xH_y' - O_2' \frac{\text{kmol}_{O_2}}{\text{kmol}_G}. \quad (12.4.-9.)$$

12.5. КОЛИЧЕСТВО НА ВОЗДУХ

Потребното количество на воздух, L , е поголемо од минимално потребното количество на воздух, L_m , за воздушниот фактор λ ,

$$L = \lambda L_m \frac{\text{kmol}_L}{\text{kmol}_G} \text{ или } \frac{m_{nL}^3}{m_{nG}^3}. \quad (12.5.-1.)$$

Воздушниот фактор може да биде поголем или помал од единица. Ако е помал од единица изгорувањето е нецелосно. Изгорувањето може да биде нецелосно и при $\lambda > 1$ ако е лоша дистрибуцијата на воздухот до горивото.

12.6. ТОПЛИНСКА МОЌ НА ГОРИВОТО

При изгорувањето се произведува топлина.

Количеството на топлина што се добива при целосното изгорување на горивото се именува топлинска моќ.

Се разликува горна (H_g) и долна (H_d) топлинска моќ на горивото.

Во Табела 12.6.-1. и 12.6.-2. дадени се вредностите на топлинската моќ за некои горива.

Табела 12.6.-1. Топлинска моќ за цврсти и течни горива

Гориво	Ознака	H_g , kJ/kg	H_d , kJ/kg
Јаглерод,	C	33910	33910
Етилалкохол,	C_2H_5OH	29900	26970
Бензол,	C_6H_6	41870	40140
Толуол,	C_7H_8	42470	40510
Керозин,	$C_{10}H_{22} \dots C_{16}H_{34}$	46200	42800
n-Пентан,	C_5H_{12}	48680	44930
n-Хексан,	C_6H_{14}	48350	44690
n-Хептан,	C_7H_{16}	48110	44510
n-Октан,	C_8H_{18}	47930	44560
Бензин	/	46100	42800
Масло за домаќинства	/	43000	41000

(Вошњакović, 1970)

Горната топлинска моќ, H_g , се именува и вистинска топлинска моќ, H , $H_g = H$. Таа ја вклучува и топлината на испарување на водата.

Кога по процесот на изгорување целокупната вода останала во гасна состојба се добива топлина на изгорување што е помала од вистинската топлинска моќ за топлината на испарување на водата. Оваа топлина на изгорување се именува долна топлинска моќ на горивото, H_d .

Табела 12.6.-2. Топлинска моќ за гасни горива

Гориво	Ознака	$H_g, \text{kJ/m}_n^3$	$H_d, \text{kJ/m}_n^3$
Јаглерод монооксид	CO	12640	12640
Водород	H ₂	12770	10760
Метан	CH ₄	39750	35730
Ацетилен	C ₂ H ₂	58030	56020
Етилен	C ₂ H ₄	63000	58980
Етан	C ₂ H ₆	69650	63620
Пропилен	C ₃ H ₆	91910	85880
Пропан	C ₃ H ₈	99130	91090
Изо-бутилен	C ₄ H ₈	120710	112670
Нормален бутан	C ₄ H ₁₀	128530	118480
Изо-бутан	C ₄ H ₁₀	128220	118170
Бензолен гас	C ₆ H ₆	147410	141380

(Вошњакović, 1970)

13. ПРЕНОС НА ТОПЛИНА

Топлината се движи од област на повисока температура кон област на пониска температура.

Таа појава се одвива преку термичка спроводливост, термичка конвекција и термичко зрачење.

13.1. ТЕРМИЧКА СПРОВОДЛИВОСТ

Спроводливоста на топлината се одвива со меѓусебно делување на молекулите.

Поподвижните молекули на потоплиот дел од телото при меѓумолекуларните судири во просек се забавуваат, додека понеподвижните молекули на поладниот дел од телото во просек се забрзуваат. Како последица на таквиот процес се јавува настојувањето просечната подвижност на молекулите да се изедначи, а со тоа и загреаноста на деловите од разгледуваното тело.

Проучувањето на термичката спроводливост на молекуларно ниво, како процес на пренос на кинетичка енергија помеѓу молекули, претставува основен пристап во анализирањето на актуелната појава.

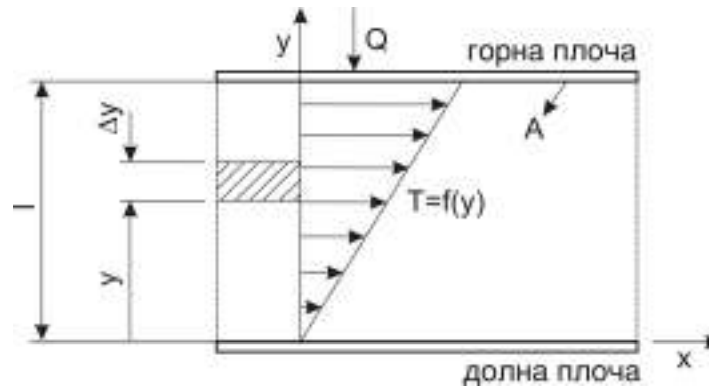
За решавањето на инженерските проблеми, најважно е однесувањето на телото како целина.

13.1.-1. ЗАКОНОТ НА FOURIER

Fourier вршел експерименти со елементи поставени како што е покажано на Слика 13.1.-1..

Плоча со дебелина l е поставена помеѓу две хоризонтални плочи. Ако на едната страна се внесува топлина Q , по доволно време може да се воспостави стационарен температурен профил одреден со законитоста $T = f(y)$.

Со експериментирање е согледано дека донесената топлина, Q , по единица од површината, A , q , е право пропорционална на температуралната разлика ΔT , а обратно пропорционална на дебелината на плочата l ,



Слика 13.1.-1. Стационарен температурен профил за загреана плоча

$$q = \frac{Q}{A} = \lambda \frac{\Delta T}{l}. \quad (13.1.-1.)$$

За дебелина Δy важи,

$$q = \lambda \frac{T(y) - T(y + \Delta y)}{\Delta y}, \quad (13.1.-2.)$$

односно за $\Delta y \rightarrow 0$,

$$q = - \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{T(y + \Delta y) - T(y)}{\Delta y}, \quad (13.1.-3.)$$

или,

$$q = -\lambda \frac{dT}{dy}. \quad (13.1.-4.)$$

Равенката (13.1.-4.) го претставува законот на Fourier за спроводливоста на топлината. Факторот на пропорционалноста λ , се именува коефициент на термичка спроводливост.

13.1.-2. КОЕФИЦИЕНТ НА ТЕРМИЧКА СПРОВОДЛИВОСТ

Коефициентот на термичка спроводливост се дефинира со Равенката (13.1.-4.). Неговата димензија е,

$$\lambda, \frac{W}{mK}. \quad (13.1.-5.)$$

Коефициентот на термичка спроводливост се одредува експериментално. Тој ја покажува способноста на материјалот за спроведување на топлина. Експериментално добиените вредности за λ укажуваат на

неговата зависност од температурата. Може да се заклучи дека за гасовите, при низок притисок λ расте со зголемувањето на температурата, а за повеќе течности λ опаѓа при зголемување на температурата. Но постојат течности, како на пример водата, за коишто зависноста на λ од температурата е крива која има своја максимална вредност. За цврстите тела, општо кажано, термичката спроводливост се зголемува со зголемувањето на густината.

На 20 °C за вода и за воздух,

$$\lambda_w = 0,6 \frac{W}{mK}, \quad (13.1.-6.)$$

$$\lambda_a = 0,025 \frac{W}{mK}, \quad (13.1.-7.)$$

а за железо,

$$\lambda_i = 73 \frac{W}{mK}. \quad (13.1.-8.)$$

Од тоа може да се заклучи дека водата спроведува топлина 24 пати подобро од воздухот, а железото 3000 пати подобро.

Термичката спроводливост може да зависи и од правецот. Затоа се разликуваат: хомогено тело, хетерогено тело, изотропно тели и анизотропно тело.

Кога λ не се менува од точка до точка низ телото, станува збор за хомогено тело, во спротивен случај станува збор за хетерогено тело. Изотропните тела имаат иста термичка спроводливост во сите правци, а анизотропните имаат различна вредност на λ во зависност од правецот. Пример на хетерогено тело се изолационите материјали: плута или стаклена волна. Анизотропни тела се материјалите со влакнеста структура како што е на пример дрвото.

Во изотропни тела спаѓаат повеќе флуиди и хомогени цврсти тела. За нив, ако температурата се менува исто во сите три насоки, законот на Fourier може да се запише за секој координатен правец,

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (13.1.-9.)$$

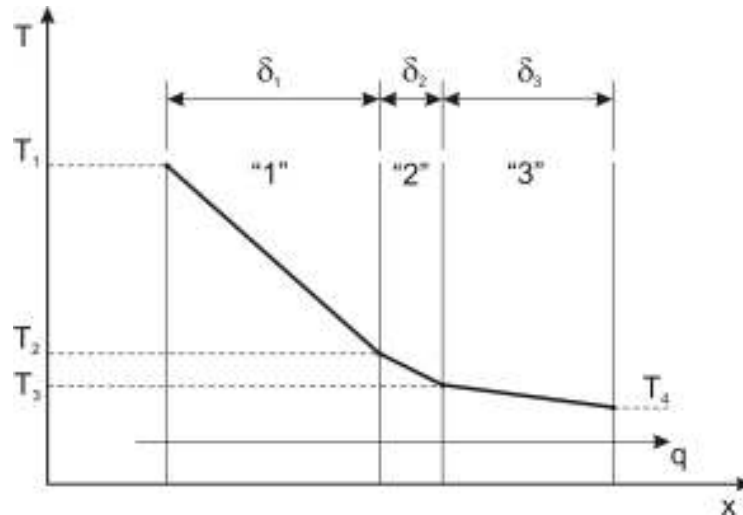
$$q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (13.1.-10.)$$

$$q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (13.1.-11.)$$

13.1.-3. ТЕРМИЧКА СПРОВОДЛИВОСТ ВО ЕДЕН ПРАВЕЦ

Одредувањето на топлинскиот тек низ рамен, еднослоен или повеќеслоен сид, е често поставувана задача во практиката.

На Слика 13.1.-2. дадена е скица на трислоен рамен сид.



Слика 13.1.-2. Температурна распределба при стационарна термичка спроводливост низ трислоен рамен сид

При стационарни услови износот на топлинскиот тек низ трите слоја од сидот е ист,

$$q_x = q_0 = \text{konst.} \quad (13.1.-12.)$$

Според Fourier од Равенката 13.1.-1. се добива,

$$q_x = q_0 = \lambda \frac{\Delta T}{l}, \quad (13.1.-13.)$$

а за трислојниот сид важи,

$$q_0 = -\lambda_1 \frac{T_2 - T_1}{\delta_1}, \quad (13.1.-14.)$$

$$q_0 = -\lambda_2 \frac{T_3 - T_2}{\delta_2}, \quad (13.1.-15.)$$

$$q_0 = -\lambda_3 \frac{T_4 - T_3}{\delta_3}. \quad (13.1.-16.)$$

По средувањето и собирањето на Равенките (13.1.-14), (13.1.-15) и (13.1.-16.) се добива конечниот практичен облик на изразот за q_0 ,

$$q_0 = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} \frac{W}{m^2}, \quad (13.1.-17.)$$

Се нарекува “практичен облик” бидејќи во него фигурираат само температурите на надворешните ѕидови, а тие се достапни за мерење.

За n - слоен ѕид специфичниот топлински тек изнесува,

$$q_0 = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \quad (13.1.-18.)$$

а вкупниот топлински тек за површина A ,

$$Q = A \cdot q_0 \quad W. \quad (13.1.-19.)$$

13.2. ТЕРМИЧКА КОНВЕКЦИЈА

Термичка конвекција е процес на пренос на топлина помеѓу подвижен флуид и цврст ѕид.

Оваа појава може да биде природна и присилна.

Кај природната (слободната) конвекција струењето на флуидот е предизвикано од гравитацијата, а кај присилната конвекција флуидот е натеран да се движи со надворешни влијанија поставени од човекот. Примери за природна и присилна конвекција се скицирани на Слика 13.2.-1..

Природната конвекција е резултат на движењето на флуид поради разликата во густината предизвикана од топлински процес. Примери за ваков процес се радијаторите за греење и испарувачот и кондензаторот на домашните ладилници.

Кај присилната конвекција флуидот се движи под дејство на надворешни влијанија, како на пример вклучена пумпа при струење на флуид низ цевка или вклучен вентилатор.

Разликата помеѓу овие два вида на конвекција е во тоа што кај природната конвекција износот на струјниот тек е одреден со лебдечкиот ефект, а кај присилната конвекција примарно со надворешните сили. Брзинскиот и температурниот профил кај природната конвекција се поврзани, односно струењето е предизвикано со самиот процес на пренос на топлина, а кај присилната конвекција струењето е оформено



Слика 13.2.-1. Природна и присилна конвекција

со надворешни влијанија, како на пример со разликата на притисоците при струење низ цевка.

Износот на пренесената топлина од сидот на флуидот или обратно е условен од влијанието на многу карактеристики на сидот и флуидот. Кај флуидот тоа се: брзина, вискозност, густина, термичка спроводливост, специфичен топлински капацитет, температура и агрегатна состојба, а кај сидот: облик, положба, квалитет на површината и температура.

Пресметувањето на преносот на топлина во турбулентно струење, при присилната конвекција, до денес не е задоволително решено. Newton, уште во 1701 година, за термичката конвекција го поставил изразот,

$$Q = \alpha A(T_w - T_f), \quad (13.2.-1.)$$

познат во литературата како “Newton - ов закон за ладење”.

Од Равенката 13.2.-1. се добива за големината,

$$\alpha = \frac{q}{(T_w - T_f)} \frac{W}{m^2K}, \quad (13.2.-2.)$$

именувана “коэффициент на термичка конвекција”. Коэффициентот на термичка конвекција претставува фактор на пропорционалност на пренесената топлина со термичка конвекција и температурната разлика помеѓу флуидот и сидот. Во овој коэффициент е содржан целосниот ефект од

термичката конвекција во турбулентната област на струењето низ цевка и термичката спроводливост во ламинарната област.

Коефициентот на термичка конвекција може да се пресмета аналитички само за некои едноставни системи. За комплексни состојби мора да се одреди експериментално.

13.2.-1. КОЕФИЦИЕНТ НА ТЕРМИЧКА КОНВЕКЦИЈА

Физичкото значење на коефициентот на термичка конвекција се добива за случајот кога температурната разлика помеѓу ѕидот и флуидот е $T_w - T_f = 1 \text{ K}$,

$$q = \alpha. \quad (13.2.-3.)$$

Коефициентот на термичка конвекција претставува топлина пренесена за време од 1 s, преку 1 m^2 ѕид, при температурна разлика од 1 K.

Ако Равенката 13.2.-2. се запише во обликот,

$$q = \frac{T_w - T_f}{\frac{1}{\alpha}}, \quad (13.2.-4.)$$

термичкиот отпор при термичката конвекција добива вредност,

$$R_c = \frac{1}{\alpha}. \quad (13.2.-5.)$$

Во Табела 13.2.-1. даден е рангот на вредноста на коефициентот на термичка конвекција за природна и присилна конвекција.

Табела 13.2.-1. Коефициент на термичка конвекција

Флуид	Природна конвекција, $\alpha, \frac{W}{m^2K}$	Присилна конвекција, $\alpha, \frac{W}{m^2K}$
Гасови	5 - 30	30 - 300
Вода	30 - 300	300 - 10000
Вода, при вриење	2000 - 20000	3000 - 100000
Водна пара	3000 - 30000	3000 - 200000
Масла	5 - 100	500 - 20000

13.3. ТЕРМИЧКО ЗРАЧЕЊЕ

Износот на топлинската енергија што ја оддава некое тело со термичко зрачење зависи од состојбата на телото, а првенствено од неговата температура.

Оддавањето на енергија со термичко зрачење се објаснува со ширењето на електромагнетни бранови. При тоа, телото кое оддава топлина емитува фотони. Фотонот е мал износ на енергија кој има својство на честичка. Во вакуум тој се движи со брзина на светлината, $w_f = 300000 \text{ km/s}$.

За да се добие појасна претстава за појавата на термичкото зрачење потребни се проучувања на повеќе научни дисциплини: електромагнетната теорија е потребна за да се објасни брановата природа на зрачењето, термодинамиката дава законитости кои се користат при добивањето на некои односи за зрачењето во одреден простор, квантната механика е неопходна за детално објаснување на атомските и молекуларните процеси што се одвиваат кога зрачењето е емитувано од материјата или апсорбирано и статистичката механика е важна за да се објасни како е распределена зрачната енергија во спектарот на брановите должини.

Термичкото зрачење може да се објасни на следниот начин: Кога на цврсто тело му се додава енергија, некои атоми и молекули од неговата структура се подигнуваат на повисоко енергетско ниво. Тогаш постои тенденција кај атомите и молекулите да се вратат спонтано во првобитната енергетска состојба. Тоа се постигнува со емитување на енергија во форма на електромагнетни бранови. Во зависност од промените на електронските, вибрационите и ротационите состојби на атомите и молекулите, се јавуваат разни типови на зрачење, како што е покажано во Табела 13.3.-1.. Тие се разликуваат по опсегот на брановите должини што ги покриваат.

Во вакуум сите форми на зрачењето патуваат со брзината на светлината која е еднаква на производот од брановата должина, λ , и фреквенцијата на зрачењето, ν ,

$$c = \lambda \cdot \nu. \quad (13.3.-1.)$$

При минувањето низ разни средини брзината и брановата дол-

жина се менуваат, а фреквенцијата е непроменлива карактеристика.

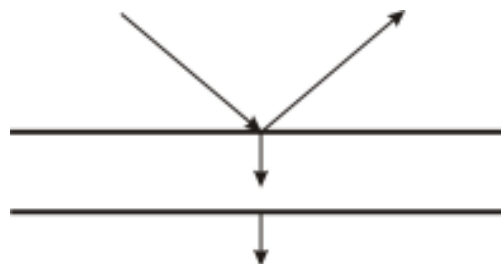
Табела 13.3.-1. Подрачја на бранови должини

Бранова должина, λ	Тип на зрачење	Предизвикувач
100 μm - x km	Радио бранови	Електричен спроводник што пренесува наизменична струја
0,8 - 400 μm	Термичко зрачење	Молекуларни вибрации и ротации, Изместување на надворешни електрони од атомите
10^{-4} - 0,1 μm	x - зраци	Изместување на внатрешни електрони од атомите
$5 \cdot 10^{-7}$ - 10^{-5} μm	γ - зраци	Изместување на јадро на атомски нуклеус

13.3.-1. ЗРАЧНИ СВОЈСТВА

Термичкото зрачење што стигнува до цврста површина може да се подели на три износи: рефлектиран дел, апсорбиран дел и пропуштен дел, Слика 13.3.-1..

$$r + a + p = 1. \quad (13.3.-2.)$$



Слика 13.3.-1. Поделба на дозрачената енергија

Во машинството најчесто се користат цврсти тела што не пропуштаат зрачење и затоа важи,

$$r + a = 1. \quad (13.3.-3.)$$

Кога рефлектираниот дел од енергијата се одбива под истиот

агол појавата се именува “огледална рефлексција“, а кога се одбива во сите правци “дифузна рефлексција“, Слика 13.3.-2..



Слика 13.3.-2. Огледална и дифузна рефлексција

Апсорбивноста, a , се изразува како дел од пристигнатото зрачење до цврстата површина, \dot{E} (W/m^2),

$$a = \frac{\dot{E}^{(a)}}{\dot{E}} \quad (13.3.-4.)$$

За реално тело апсорбивноста е помала од единица. Само за граничниот случај, идеален случај, на црно тело апсорбивноста е еднаква на единица, $a = 1$. Во природата не постои црно тело. Тоа е замислено тело кое има својство да ја апсорбира целата пристигната зрачна енергија до неговата површина.

Емисивноста на некое тело, ε , се изразува како дел од емитираната енергија од црно тело, $\dot{E}_b^{(e)}$,

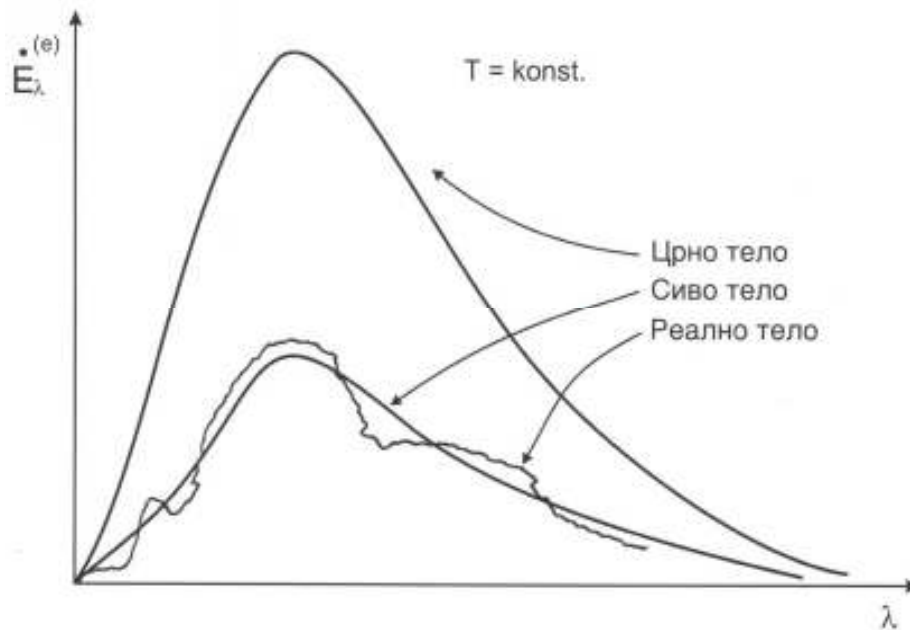
$$\varepsilon = \frac{\dot{E}^{(e)}}{\dot{E}_b^{(e)}} \quad (13.3.-5.)$$

За реално тело емисивноста е помала од единица. За црно тело емисивноста е еднаква на единица, $\varepsilon_b = 1$. Зрачната енергија што ја емитира црното тело ја претставува максимално можната емитирана енергија за актуелната температура.

За црно тело емисивноста и апсорбивноста се еднакви на единица, $\varepsilon_b = 1$ и $a_b = 1$. Реалните тела емитираат помалку зрачна енергија од идеалните црни тела.

Реалното тело се претставува со сиво тело. Зрачењето на сиво тело се замислува како пропорционално намалено зрачење на црно

тело, Слика 13.3.-3..



Слика 13.3.-3. Споредување на црно, сиво и реално тело

13.3.-2. ЗАКОНОТ НА STEFAN-BOLTZMANN

Емитираната енергија од црно тело во полупросторот над него се изразува со законот на Stefan-Boltzmann,

$$\dot{E}_b^{(e)} = \sigma T^4, \quad (13.3.-6.)$$

каде $\sigma = 5,667 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ е константата на Stefan-Boltzmann.

За сиво тело,

$$\dot{E}^{(e)} = \varepsilon \sigma T^4. \quad (13.3.-7.)$$

13.3.-3. ЗАКОНОТ НА LAMBERT

Според законот на Lambert интензитетот на зрачењето во некој произволен правец, одреден со аголот φ кон нормалата е намален, што е последица на намалената големина на површината на зрачење, гледана од означениот правец,

$$\dot{E}_\varphi^{(e)} = \dot{E}_n^{(e)} \cos \varphi \frac{W}{\text{m}^2}. \quad (13.3.-8.)$$

13.3.-4. ЗРАЧЕЊЕ ВО ПОЛУПРОСТОР

Во полупросторот над некој површински елемент што зрачи се до-зрачува π пати повеќе енергија од износот што би го примила пара-лелна површина на зрачниот елемент,

$$\dot{E}^{(e)} = \pi E_n^{(e)} . \quad (13.3.-9.)$$

14. ТОПЛИНОИЗМЕНУВАЧИ

Апаратите во коишто се врши пренос на топлина од еден на друг флуид без да дојде до директен допир на двата флуида се именуваат топлиноизменувачи. Тие се конструирани и изведени со цел да обезбедат ефикасно реализирање на процесот на пренос на топлина од топлиот на ладниот флуид.

Наоѓаат широка примена во различни области. Се користат во системите за греење и ладење, системите за кондиционирање на воздух, електричните централи, хемиските фабрики, нафтените рафинерии, производството на храна, производството на природен гас, кај системите за третман на отпадни води и на други места.

Топлиноизменувачите во кои се врши континуиран пренос на топлина помеѓу флуидите се именуваат рекуператори. Најголем дел од изведените топлиноизменувачи се рекуператори.

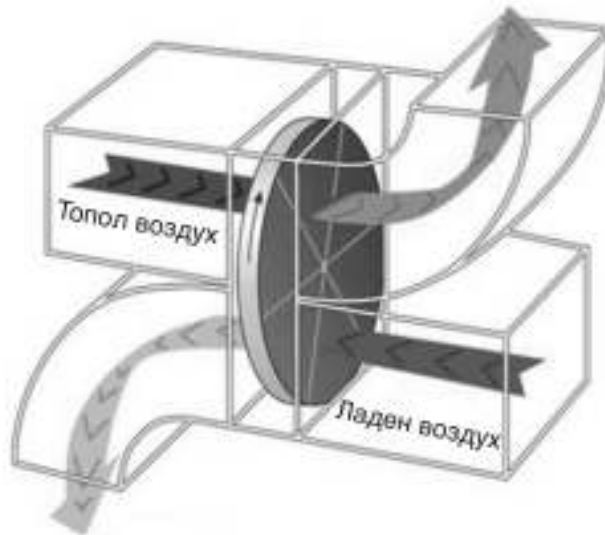
Како пример за топлиноизменувач-рекуператор може да се посочи ладилникот на моторот од автомобил. Ако автомобилот користи мотор со водено ладење, процесот на пренос на топлина се одвива помеѓу ладилната течност на моторот, која протекнува низ ладилникот, и воздухот кој го наструјува ладилникот, Слика 14.-1..



Слика 14.-1. Топлиноизменувач-рекуператор (ладилник) од автомобил

Топлиноизменувачите во коишто се врши дисконтинуиран процес

на пренос на топлина се именуваат регенератори. Кај нив топлиот флуид се внесува во простор во кој ја предава топлината на акумулациона маса, а потоа во истиот простор се внесува ладниот флуид кој ја прима топлината од акумулационата маса. Како пример за топлиноизменувач - регенератор може да се посочи топлиноизменувачот со подвижна матрица, Слика 14.-2..



Слика 14.-2. Топлиноизменувач-регенератор со подвижна матрица

Во топлиноизменувачите може да се пренесува сензибилна топлина и латентна топлина, бидејќи минувајќи низ топлиноизменувачот флуидот ја задржува или ја менува својата агрегатна состојба. Топлиноизменувачот во кој флуидот минува од течна во гасна фаза се именува испарувач, а топлиноизменувачот во кој флуидот минува од гасна во течна фаза се именува кондензатор.

Топлиот и ладниот флуид може да струјат низ топлиноизменувачот: истонасочно, противнасочно, крстонасочно и сложенасочно.

14.1. КОЕФИЦИЕНТ НА ПРЕНОС НА ТОПЛИНА

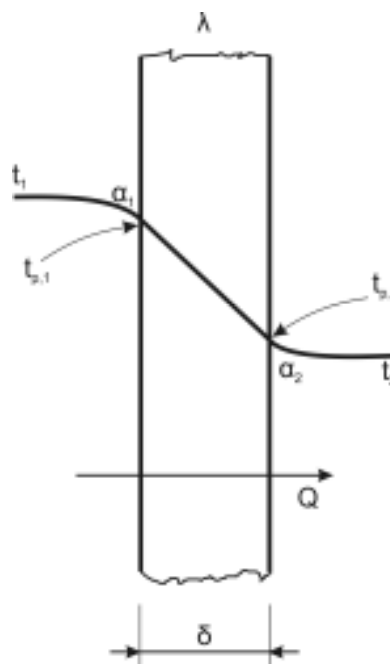
Пренесената топлина во топлиноизменувачот се пресметува според изразот,

$$Q = k A \Delta t W, \quad (14.1.-1.)$$

каде,

- k е коефициент на пренос на топлина од флуид на флуид изразен во W/m^2K ,
- A е површина низ која минува топлинскиот тек Q изразена во m^2 ,
- Δt е температурната разлика помеѓу двата флуида изразена во $^{\circ}C$.

За да се добие изразот за пресметка на коефициентот на пренос на топлина од флуид на флуид, се посматра пресек на ѕидот на еден топлиноизменувач, како што е покажано на Слика 14.1.-1..



Слика 14.1.-1. Топлински тек низ еднослоен ѕид

Топлиот флуид со термичка конвекција ја пренесува топлината до ѕидот на топлиноизменувачот. Потоа со термичка спроводливост топлината се пренесува низ ѕидот, а на крајот со термичка конвекција топлината се пренесува од ѕидот на ладниот флуид. Тоа значи дека процесот на пренос на топлина од топлиот на ладниот флуид во топлиноизменувачот се одвива во три етапи.

Топлинскиот тек, во стационарни услови, изнесува,

$$Q_{tk1} = Q = \alpha_1(t_1 - t_{p,1})A \quad W, \quad (14.1.-2.)$$

$$Q_{ts} = Q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{p,1} - t_{p,2})A \quad W, \quad (14.1.-3.)$$

$$Q_{tk2} = Q = \alpha_2(t_{p,2} - t_2)A \quad W. \quad (14.1.-4.)$$

Ако се преуредат Равенките (14.1.-2.), (14.1.-3.) и (14.1.-4.),

$$\frac{Q}{\alpha_1 A} = (t_1 - t_{p,1}),$$

$$\frac{Q\delta}{\lambda A} = (t_{p,1} - t_{p,2}),$$

$$\frac{Q}{\alpha_2 A} = (t_{p,2} - t_2),$$

а потоа се соберат,

$$\frac{Q}{A} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = t_1 - t_2,$$

се добива израз за топлинскиот тек во обликот,

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} A \quad W, \quad (14.1.-5.)$$

и израз за коефициентот на пренос на топлина,

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \frac{W}{m^2 K}. \quad (14.1.-6.)$$

14.2. ИСТОНАСОЧНИ ТОПЛИНОИЗМЕНУВАЧИ

Истонасочните топлиноизменувачи се изведуваат од две концентрични цевки, како што е покажано на Слика 14.2.-1..

Топлиот и ладниот флуид влегуваат во топлиноизменувачот од неговата лева страна, а излегуваат од неговата десна страна.

Нивните топлински капацитети се,

$$\Phi_1 = m_{s,1} \cdot c_1 \quad W/K, \quad (14.2.-1.)$$

$$\Phi_2 = m_{s,2} \cdot c_2 \quad W/K, \quad (14.2.-2.)$$

каде m_s во kg/s го изразува масениот протек на флуидот, а c во J/kgK е специфичниот топлински капацитет на флуидот.

Ако промените на температурите на двата флуида се внесат во A-t дијаграм, Слика 14.2.-1., може да се види дека температурната разлика на влез,

$$\Delta t_{vlez} = t_{1,v} - t_{2,v}, \quad (14.2.-3.)$$

каде,

$t_{1,v}$ е влезна температура на топлиот флуид,

$t_{2,v}$ е влезна температура на ладниот флуид,

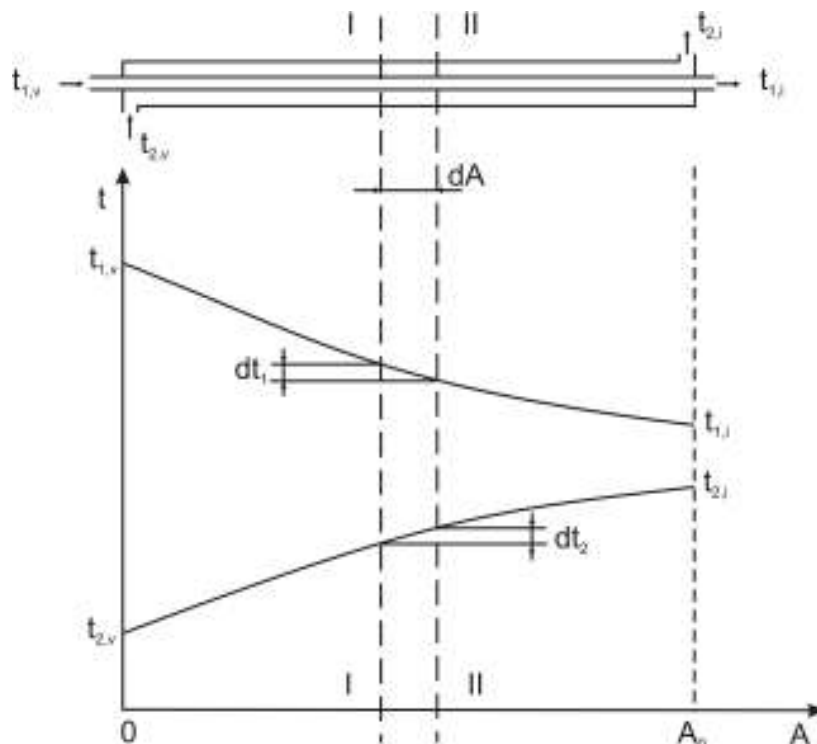
е многу поголема од температурната разлика на излез,

$$\Delta t_{\text{izlez}} = t_{1,i} - t_{2,i} \quad (14.2.-4.)$$

каде,

$t_{1,i}$ е излезна температура на топлиот флуид,

$t_{2,i}$ е излезна температура на ладниот флуид.



Слика 14.2.-1. Истонасочен топлиноизменувач

По поставувањето на пресеците I-I и II-II, за топлинскиот биланс може да се запише дека, топлината што ја оддава топлиот флуид ја прима ладниот флуид, односно,

$$-\Phi_1 dt_1 = k(t_1 - t_2)dA, \quad (14.2.-5.)$$

$$\Phi_2 dt_2 = k(t_1 - t_2)dA. \quad (14.2.-6.)$$

Во Равенката (14.2.-5.) покажано е ладење на топлиот флуидот и поради тоа прирастот на температурата е негативен, $-dt_1$.

Од Равенките (14.2.-5.) и (14.2.-6.) се добива следниот облик на две поврзани линеарни хомогени диференцијални равенки од прв ред со

константни коефициенти,

$$\frac{k}{\Phi_1} t_1 - \frac{k}{\Phi_1} t_2 + \frac{dt_1}{dA} = 0, \quad (14.2.-7.)$$

$$\frac{k}{\Phi_2} t_1 - \frac{k}{\Phi_2} t_2 - \frac{dt_2}{dA} = 0. \quad (14.2.-8.)$$

Ако се искористат граничните услови,

$$\text{за } A = 0 \Rightarrow t_1 = t_{1,v}, t_2 = t_{2,v}, \quad (14.2.-9.)$$

$$\text{за } A = A_0 \Rightarrow t_1 = t_{1,i}, t_2 = t_{2,i}. \quad (14.2.-10.)$$

со решавање се добиваат изрази за температурните прирасти на двата флуида,

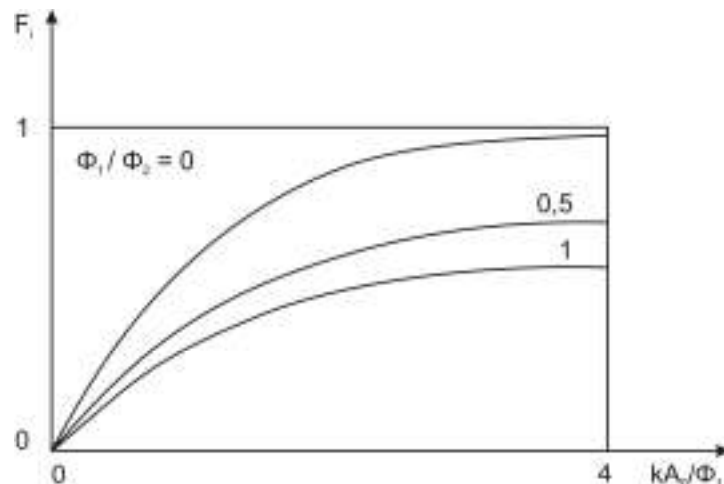
$$t_{1,v} - t_{1,i} = (t_{1,v} - t_{2,v}) \frac{1 - e^{-\left(1 + \frac{\Phi_1}{\Phi_2}\right) \frac{kA_0}{\Phi_1}}}{1 + \frac{\Phi_1}{\Phi_2}}, \quad (14.2.-11.)$$

$$t_{2,i} - t_{2,v} = (t_{1,v} - t_{2,v}) \frac{1 - e^{-\left(1 + \frac{\Phi_1}{\Phi_2}\right) \frac{kA_0}{\Phi_1}}}{1 + \frac{\Phi_1}{\Phi_2}} \frac{\Phi_1}{\Phi_2}, \quad (14.2.-12.)$$

Од овие равенки следува,

$$\frac{t_{1,v} - t_{1,i}}{t_{1,v} - t_{2,v}} = \frac{1 - e^{-\left(1 + \frac{\Phi_1}{\Phi_2}\right) \frac{kA_0}{\Phi_1}}}{1 + \frac{\Phi_1}{\Phi_2}} = F_i, \quad (14.2.-13.)$$

$$\frac{t_{2,i} - t_{2,v}}{t_{1,v} - t_{2,v}} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} F_i. \quad (14.2.-14.)$$



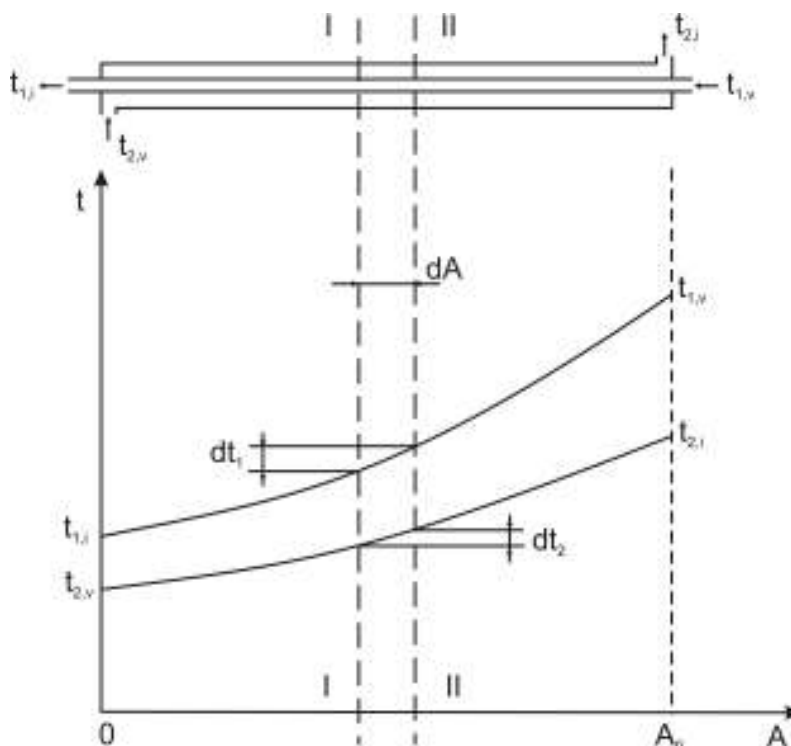
Слика 14.2.-2. F_i - дијаграм за истонасочно струење

Функцијата F_i зависи од две независни бездимензионални големини Φ_1/Φ_2 и kA_0/Φ_1 . Таа зависност графички е покажана на Слика 14.2.-2., (Bošnjaković, 1976).

F_i - дијаграмот се користи за графичко одредување и следење на излезните температури на флуидите $t_{1,i}$ и $t_{2,i}$.

14.3. ПРОТИВНАСОЧНИ ТОПЛИНОИЗМЕНУВАЧИ

Противнасочен топлиноизменувач и неговиот $A - t$ дијаграм се покажани на Слика 14.3.-1..



Слика 14.3.-1. Противнасочен топлиноизменувач

Од конструктивен аспект, противнасочниот топлиноизменувач е идентичен со истонасочниот топлиноизменувач.

Ако се спроведе аналогна постапка на билансирање како и за истонасочниот топлиноизменувач, се добива,

$$-m_{s,1} c_1 dt_1 = -\Phi_1 dt_1 = k(t_1 - t_2) dA, \quad (14.3.-1.)$$

$$m_{s,2} c_2 dt_2 = \Phi_2 dt_2 = k(t_1 - t_2) dA, \quad (14.3.-2.)$$

односно,

$$\frac{k}{\Phi_1} t_1 - \frac{k}{\Phi_1} t_2 + \frac{dt_1}{dA} = 0, \quad (14.3.-3.)$$

$$\frac{k}{\Phi_2} t_1 - \frac{k}{\Phi_2} t_2 - \frac{dt_2}{dA} = 0. \quad (14.3.-4.)$$

Со употреба на граничните услови,

$$\text{за } A = 0 \quad t_1 = t_{1,i}, t_2 = t_{2,v}, \quad (14.3.-5.)$$

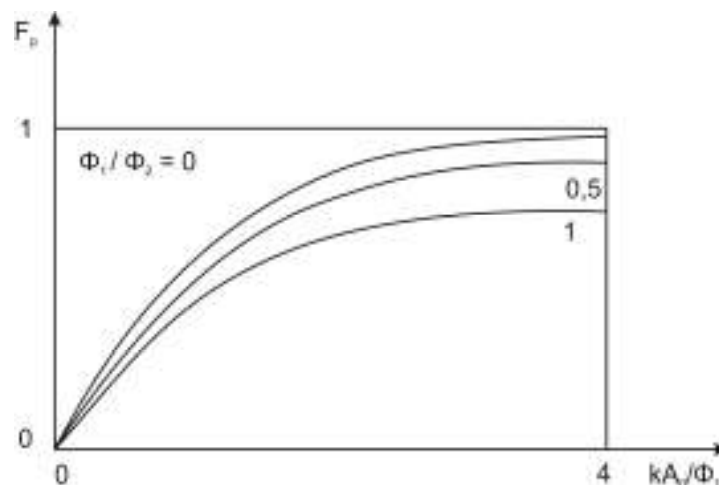
$$\text{за } A = A_0 \quad t_1 = t_{1,v}, t_2 = t_{2,i}, \quad (14.3.-6.)$$

по интегрирањето се добива,

$$\frac{t_{1,v} - t_{1,i}}{t_{1,v} - t_{2,v}} = \frac{1 - e^{-\left(1 - \frac{\Phi_1}{\Phi_2}\right) \frac{kA_0}{\Phi_1}}}{1 - \frac{\Phi_1}{\Phi_2} e^{-\left(1 - \frac{\Phi_1}{\Phi_2}\right) \frac{kA_0}{\Phi_1}}} = F_p, \quad (14.3.-7.)$$

$$\frac{t_{2,i} - t_{2,v}}{t_{1,v} - t_{2,v}} = F_p \frac{\Phi_1}{\Phi_2}. \quad (14.3.-8.)$$

На Слика 14.3.-2. даден е F_p - дијаграмот за противнасочно струење.

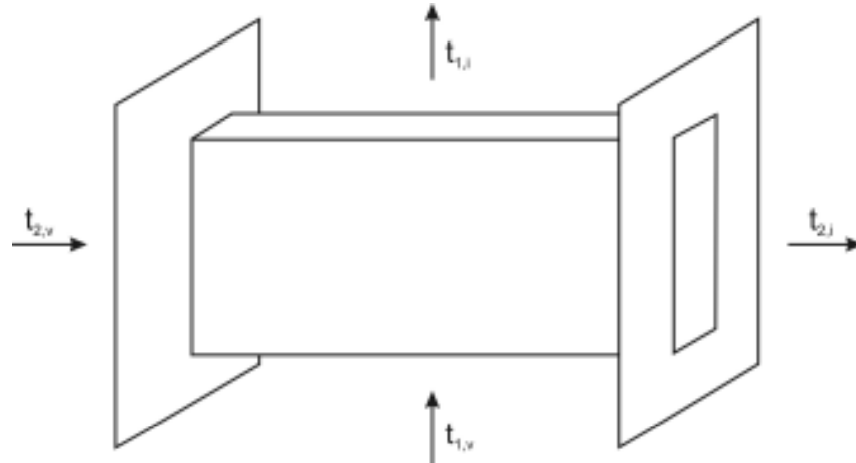


Слика 14.3.-2. F_p - дијаграм за противнасочно струење

14.4. КРСТОНАСОЧНИ ТОПЛИНОИЗМЕНУВАЧИ

Меѓусебното струење на топлиот и ладниот флуид во крстонасочните топлиноизменувачи е вкрстено, Слика 14.4.-1..

Процесот на пренос на топлина се одвива преку сидот на топлиноизменувачот, Слика 14.4.-2..



Слика 14.4.-1. Крстонасочен топлиноизменувач

Топлинскиот тек низ елементарната површина dA , во стационарни услови, е

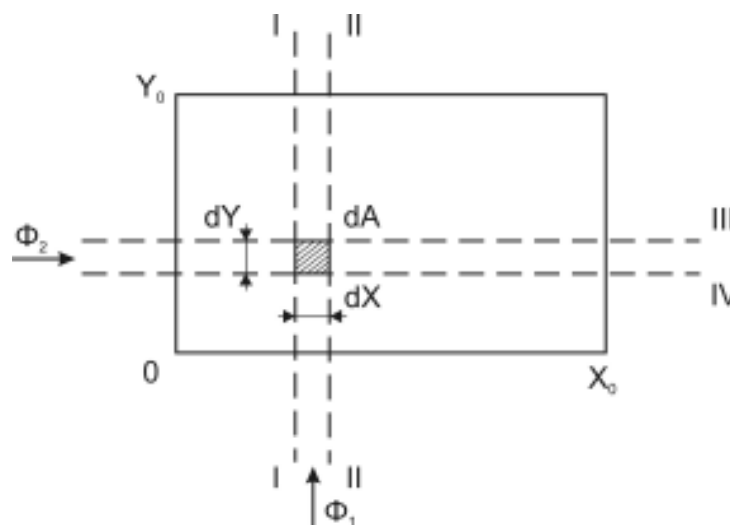
$$dQ = k dA(t_1 - t_2). \quad (14.4.-1.)$$

каде t_1 и t_2 се локалните температури на флуидите од двете страни на сидот,

$$t_1 = f_1(X, Y), t_2 = f_2(X, Y). \quad (14.4.-2.)$$

Топлинскиот капацитет на топлиот флуид се менува за,

$$d\Phi_1 = \frac{\Phi_1}{Y_0} dY, \quad (14.4.-3.)$$



Слика 14.4.-2. Сидот на топлиноизменувачот од Слика 14.4.-1.

а температурата му се намалува за,

$$dt_1 = -\frac{\partial t_1}{\partial x} dX. \quad (14.4.-4.)$$

Топлиот флуид ја оддава топлината,

$$-d\Phi_1 dt_1 = -\frac{\Phi_1}{Y_0} \frac{\partial t_1}{\partial x} dX dY, \quad (14.4.-5.)$$

а ладниот флуид го прима истиот износ,

$$d\Phi_2 dt_2 = \frac{\Phi_2}{X_0} \frac{\partial t_2}{\partial Y} dX dY. \quad (14.4.-6.)$$

Со внесување на бездимензионални големини,

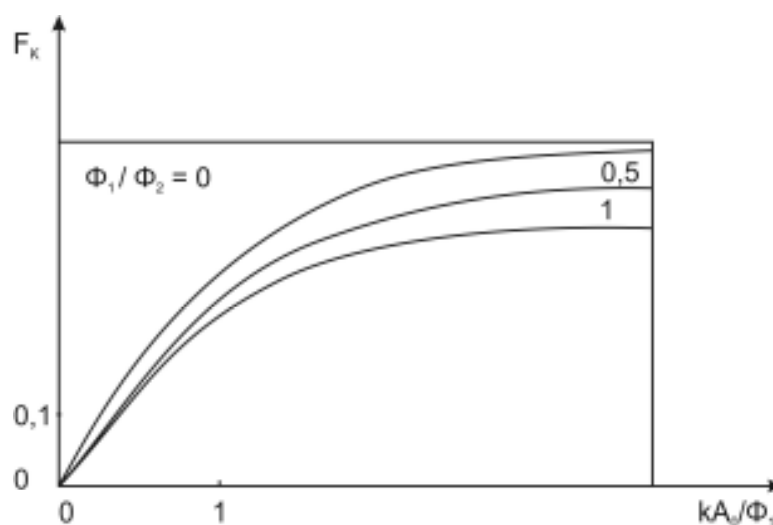
$$x = \frac{X}{X_0}, y = \frac{Y}{Y_0} \quad (14.4.-7.)$$

каде $x = 0$ го означува левиот раб, $x = 1$ десниот раб, $y = 0$ долниот, а $y = 1$ горниот раб на ѕидот, се добиваат диференцијалните равенки за крстонасочно струење,

$$\frac{kA_0}{\Phi_1} t_1 - \frac{kA_0}{\Phi_1} t_2 + \frac{\partial t_1}{\partial x} = 0, \quad (14.4.-8.)$$

$$\frac{kA_0}{\Phi_2} t_1 - \frac{kA_0}{\Phi_2} t_2 - \frac{\partial t_2}{\partial y} = 0. \quad (14.4.-9.)$$

кои ги решил Nusselt уште во 1930 година, користејќи ја претпоставката дека топлинскиот капацитет има еднолична распределба по пресекот.



Слика 14.4.-3. F_k дијаграм за крстонасочно струење

Vošnjaковиќ наведува аналогни врски како и за истонасочните и

противнасочните топлиноизменувачи, (Bošnjaković, 1976),

$$\frac{t_{1,v,pr} - t_{1,iz,pr}}{t_{1,v,pr} - t_{2,v,pr}} = F_k \left(\frac{kA_0}{\Phi_1}, \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \right), \quad (14.4.-10.)$$

$$\frac{t_{2,iz,pr} - t_{2,v,pr}}{t_{1,v,pr} - t_{2,v,pr}} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} F_k \left(\frac{kA_0}{\Phi_1}, \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \right). \quad (14.4.-11.)$$

Тој ја изразува и графички зависноста на функцијата F_k од бездимензионалните групи kA_0 / Φ_1 и Φ_1 / Φ_2 , Слика 14.4.-3..

14.5. ЕДИНСТВЕНА ПРЕСМЕТКА ЗА РАЗЛИЧНИ ТОПЛИНОИЗМЕНУВАЧИ

Без разлика дали топлиноизменувачот е истонасочен, противнасочен или крстонасочен, пренесената топлина од топлиот на ладниот флуид може да се изрази во обликот,

$$\begin{aligned} Q &= \Phi_1 (t_{1,v} - t_{1,i}) = \text{(оддадена топлина од топлиот флуид)}, \\ &= \Phi_2 (t_{2,i} - t_{2,v}) = \text{(примена топлина од ладниот флуид)}, \\ &= kA \Delta t_m. \text{ (пренесена топлина во топлиноизменувачот)}. \end{aligned} \quad (14.5.-1.)$$

каде средната температурна разлика, Δt_m , не е средна аритметичка вредност, туку некоја логаритамска средна вредност на разликите на температурите, бидејќи нивните промени не се линерни. Во литературата таа е дадена за различни типови на топлиноизменувачи, а може да се одреди и од F - дијаграмот за соодветната конструкција на топлиноизменувачот.

Ако пренесената топлина во топлиноизменувачот се подели со производот од топлинскиот капацитет на топлиот флуид и разликата од влезните температури на двата флуида, односно разликата на температурата на топлиот флуид и температурата на ладниот флуид се добива бездимензионалната, таканаречена “погонска карактеристика на апаратот”, K_a ,

$$K_a = \frac{Q}{\Phi_1 (t_{1,v} - t_{2,v})} \quad (14.5.-2.)$$

која е карактеристична за одреден топлиноизменувач.

Од Равенките (14.5.-1.) и (14.5.-2.) се добиваат следниве односи на температурните разлики,

$$\frac{t_{1,v} - t_{1,i}}{t_{1,v} - t_{2,v}} = K_a, \quad (14.5.-3.)$$

$$\frac{t_{2,i} - t_{2,v}}{t_{1,v} - t_{2,v}} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} K_a, \quad (14.5.-4.)$$

$$\frac{t_{1,i} - t_{2,i}}{t_{1,v} - t_{2,v}} = 1 - \left(1 + \frac{\Phi_1}{\Phi_2}\right) K_a, \quad (14.5.-5.)$$

$$\frac{t_{1,i} - t_{2,v}}{t_{1,v} - t_{2,v}} = 1 - K_a, \quad (14.5.-6.)$$

$$\frac{t_{1,v} - t_{2,i}}{t_{1,v} - t_{2,v}} = 1 - \frac{\Phi_1}{\Phi_2} K_a, \quad (14.5.-7.)$$

$$\frac{\Delta t_m}{t_{1,v} - t_{2,v}} = \frac{K_a}{\frac{kA}{\Phi_1}}, \quad (14.5.-8.)$$

$$\frac{kA}{\Phi_2} = \frac{t_{2,i} - t_{2,v}}{\Delta t_m}, \quad (14.5.-9.)$$

$$\frac{kA}{\Phi_1} = \frac{t_{1,v} - t_{1,i}}{\Delta t_m}, \quad (14.5.-10.)$$

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{t_{2,i} - t_{2,v}}{t_{1,v} - t_{1,i}}. \quad (14.5.-11.)$$

Во практиката се јавуваат два вида на проблеми:

(1) Топлиноизменувачот е изведен, односно позната е неговата површина, а променливи се пренесената топлина и крајните температури,

(2) Познати се температурите што треба да се реализираат, а се бара топлиноизменувачот што треба да се примени.

14.6. ЕФЕКТНОСТ НА ТОПЛИНОИЗМЕНУВАЧОТ

Ефектност на топлиноизменувачот е односот на реално пренесената топлина во него и теоретски можната пренесена топлина во “идеален” топлиноизменувач од истиот конструктивен тип,

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}}, \quad (14.6.-1.)$$

каде,

- ε е ефективност на топлиноизменувачот,
 Q е реално пренесена топлина,
 Q_{\max} е теоретски можна пренесена топлина.

Ефектноста на топлиноизменувачот може да биде вредност помеѓу 0 и 1.

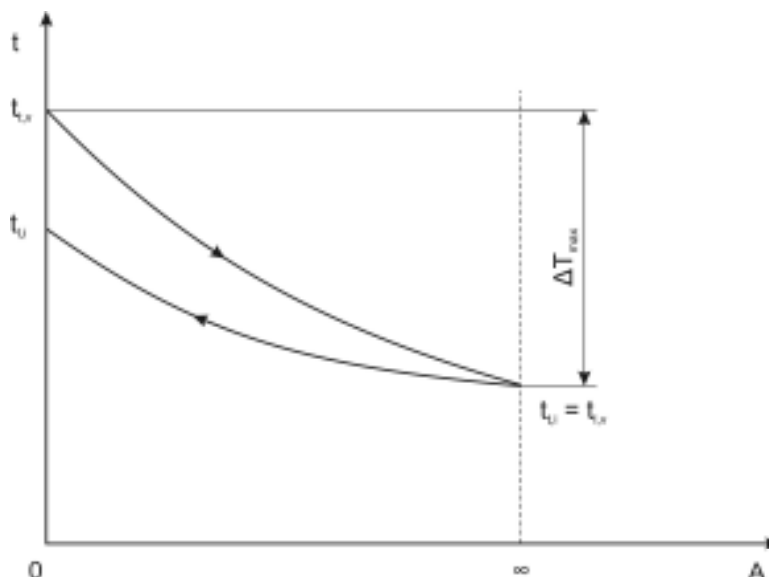
Топлинскиот тек во реален топлиноизменувач, Q , може да се одреди со користење на Равенката (14.1.-1.) и Равенката (14.5.-1.).

Теоретската максимално можна пренесена топлина во “идеалниот” топлиноизменувач, Q_{\max} , се дефинира со изразот,

$$Q_{\max} = \Phi_{\min} \Delta T_{\max}, \quad (14.6.-2.)$$

каде ΔT_{\max} е максималната температурна разлика што се појавува во топлиноизменувачот, односно разликата помеѓу влезните температури на топлиот и на ладниот флуид, а Φ_{\min} е помалиот топлински капацитет.

За да се објасни полесно поимот “ефективност на топлиноизменувачот” се разгледува неговото значење на примерот на противнасочен топлиноизменувач. Во овој случај идеалниот топлиноизменувач е претставен со противнасочен топлиноизменувач кој има бесконечно голема површина, Слика 14.6.-1..



Слика 14.6.-1. $A - t$ дијаграм за противнасочен топлиноизменувач

Од енергетскиот биланс,

$$Q_{\max} = \Phi_t (t_{t,v} - t_{t,i}) = \Phi_l (t_{l,i} - t_{l,v}), \quad (14.6.-3.)$$

во услови кога $\Phi_t < \Phi_l$, произлегува дека $(t_{t,v} - t_{t,i}) > (t_{l,i} - t_{l,v})$. Температурниот пад на топлиот флуид ќе биде поголем, и за бесконечно голема површина, температурата на топлиот флуид ќе се доближува до влезната температура на ладниот флуид, како што е покажано на Слика 14.6.-1., за да се постигне $t_{t,i} = t_{l,v}$. Сега,

$$Q_{\max} = \Phi_t(t_{t,v} - t_{l,v}) = \Phi_{\min} \Delta T_{\max}. \quad (14.6.-4.)$$

“Идеалниот” противнасочен топлиноизменувач е претставен со бесконечно големата површина. Тој е референтен топлиноизменувач употребен во мерењето на степенот на совршеноста на реалните топлиноизменувачи.

Ако во Равенката (14.6.-1.) се заменат Равенките (14.1.-1.) и (14.6.-4.) се добива,

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{kA \Delta T_m}{\Phi_{\min} \Delta T_{\max}} = \frac{kA}{\Phi_{\min}} \frac{\Delta T_m}{\Delta T_{\max}}. \quad (14.6.-5.)$$

Равенката (14.6.-5.) дозволува ефектноста на топлиноизменувачот да се пресмета, во принцип, како производ од два члена: првиот, kA/Φ_{\min} , кој е мерка за “термичката големина” на топлиноизменувачот, во литературата познат како NTU (кратенка од The Number of Transfer Units), и вториот, $\Delta T_m/\Delta T_{\max}$, однос на средната температурна разлика и максимално можната температурна разлика.

14.7. ТИПОВИ НА ТОПЛИНОИЗМЕНУВАЧИ

Критериум за поделба на топлиноизменувачите може да биде: конструкцијата, примената, бројот на флуидите, преносните процеси или типот на флуидите што се употребуваат.

Според конструкцијата се разликуваат четири типа на топлиноизменувачи, од кои три се со континуиран пренос на топлина, и тоа: 1. Цевкасти топлиноизменувачи, 2. Плочести топлиноизменувачи, 3. Топлиноизменувачи со проширена површина, и еден тип со дисконтинуиран процес на пренос на топлина, 4. Регенеративни топлиноизменувачи.

Четириите конструкции на топлиноизменувачи меѓусебе се многу различни и секоја има свои посебни карактеристики и примена.

14.7.-1. ЦЕВКАСТИ ТОПЛИНОИЗМЕНУВАЧИ

Основниот елемент на цевкастите топлиноизменувачи е метална цевка, која најчесто има кружен пресек, но се користат и цевки со елипсовиден или правоаголен пресек.

Цевкастите топлиноизменувачи може да се поделат во три групи: барабанесто-цевкасти, двојно цевкасти и спирални.

На Слика 14.7.-1. е илустрирано меѓусебното струење на топлиот и ладниот флуид во барабанесто-цевкаст топлиноизменувач.



Слика 14.7.-1. Барабанесто-цевкаст топлиноизменувач

Барабанестиот флуид влегува на едниот крај од барабанот, струи околу цевките и излегува на другиот крај од барабанот. Цевниот флуид влегува на спротивната страна од топлиноизменувачот, струи низ цевките и излегува како цевен излезен флуид.

Кај барабанесто-цевкастите топлиноизменувачи снопот од цевки е изведен како целина, со цевни лимови на двата краја од цевките. Овој единствен елемент е заварен или на друг начин фиксиран во барабанот. Цевниот сноп е поврзан со предна и задна глава низ кои се внесува, односно изнесува цевниот флуид.

Четири основни елементи на барабанесто-цевкастиот топлиноизменувач: 1. цевниот сноп, 2. барабанот, 3. предната глава и 4. задната глава, се стандардизирани за многу изведби на топлиноизменувачи.

Барабанесто-цевкастите топлиноизменувачи постојат во разни облици. Нивната конструкција зависи од начинот на кој се решени барањата што се поставени пред конструкторот: износот на пренесена то-

плина, падот на притисокот, чистењето, предвиденото затнување, можноста за контрола на корозијата, применетата метода за намалување на термичките удари и друго. Со промена на вредноста на дијаметарот и должината на цевките, како и нивниот распоред се создаваат голем број на можни конструктивни комбинации на барабанесто-цевкастите топлиноизменувачи.

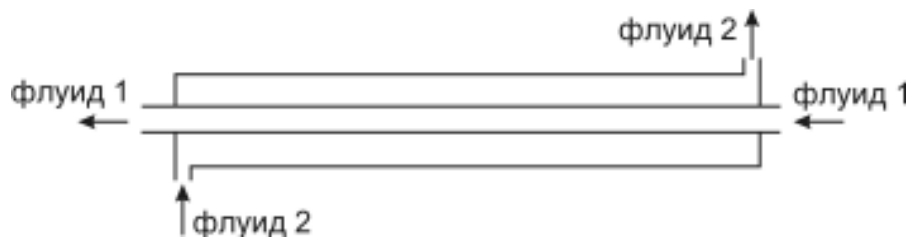
Топлиноизменувачите од овој тип се робусни. Тие може да работат на висока притисна разлика помеѓу флуидите и на висок притисок во однос на околината, на високи температури, во корозивна средина, со вискозни флуиди.

Барбанесто-цевкастите топлиноизменувачи најчесто се применуваат во системите течност/течност и течност/двофазен флуид (кондензација или испарување). Се користат и кај системите гас/гас, првенствено во оние случаи кога работната температура е многу висока, притисокот е многу висок, чистењето е проблематично и не може да се примени друг тип на топлиноизменувач.

Наоѓаат примена како грејачи, ладилници, испарувачи или кондензатори во енергетските системи.

Двојно цевкастите топлиноизменувачи имаат поедноставна конструкција од барабанесто-цевкастите топлиноизменувачи.

Тие се изведуваат од две концентрично поставени цевки, Слика 14.7.-2..



Слика 14.7.-2. Двојно цевкаст топлиноизменувач

Спиралниот топлиноизменувач се разликува од барабанесто-цевкастиот топлиноизменувач по тоа што во барабанот има спирално завиткани цевки, наместо прави цевки. Обликувањето на цевките во спирална форма ја зголемува површината на пренос на топлина, што е

сместена во единица волумен од топлиноизменувачот. Чистењето на овие топлиноизменувачи не е едноставно.

14.7.-2. ПЛОЧЕСТИ ТОПЛИНОИЗМЕНУВАЧИ

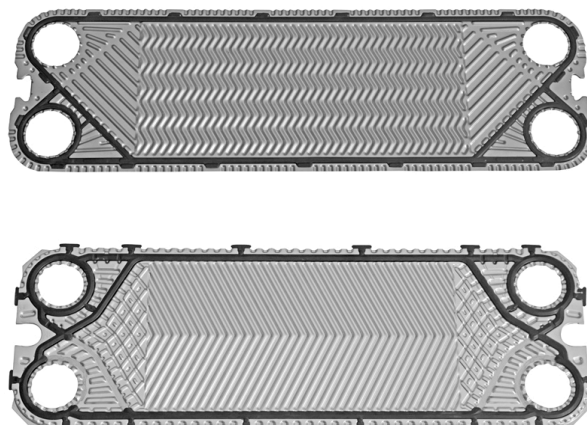
Основниот елемент на плочестите топлиноизменувачи се тенки метални правоаголни плочи. Секоја плоча има по четири кружни отвори во аглите, кои по спојувањето на плочите создаваат по два хоризонтални цевководи за топлиот и за ладниот флуид. Вертикалното струење е одредено со затинки што се поставуваат до четирите отвори. Слика 14.7.-3. покажува две, од многуте можни варијанти на плочите, што се користат кај плочестите топлиноизменувачи.

Плочите што се употребуваат кај плочестите топлиноизменувачи се произведуваат по пат на пресување. Во тој процес добиваат канали за струење на флуидот, канали по обемот за затинки и канали околу секој отвор за затинки.

Малите канали од две допрени плочи создаваат протечни водови за флуидите, а распоредот на затинките под четирите отвори одредува дали флуидот ќе навлезе вертикално помеѓу плочите или ќе продолжи да струи хоризонтално.

Елементите на плочест топлиноизменувач се: плочите, крајните прицврстувачи, шипките за водење и шипките за стегање, Слика 14.7.-4..

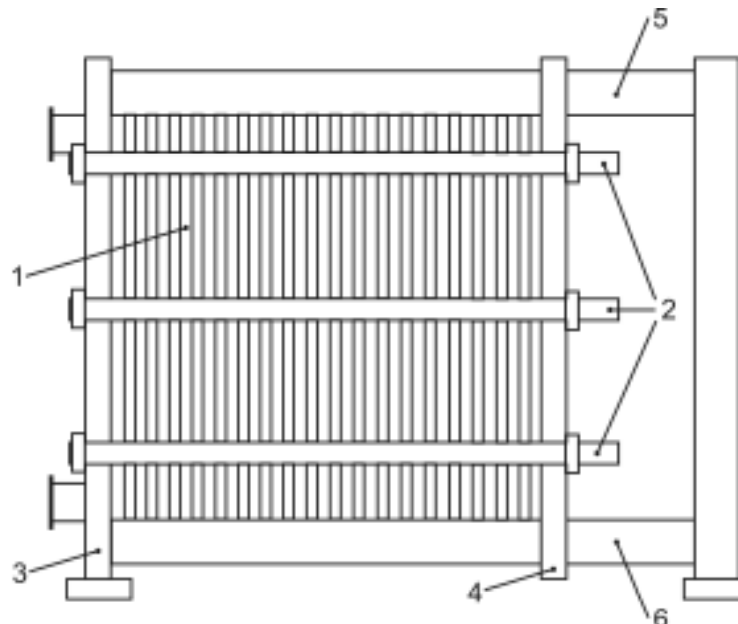
Преносот на топлина се одвива низ плочите. Тој процес е интензивен бидејќи флуидите имаат меѓусебно сложенасочно движење,



Слика 14.7.-3. Плочи од плочест топлиноизменувач

и дебелината на плочите е мала. Конструкцијата на плочестите топлиноизменувачи е таква што флуидите постигнуваат пренос на топлина скоро како во случајот кога би се мешале.

Рамката на плочестиот топлиноизменувач служи како основа на која се редат плочите, а крајниот подвижен прицврстувач со помош на шесте шипки за стегање, го дава конечниот облик на топлиноизменувачот. Во една рамка може да се постават и повеќе топлиноизменувачи.



- 1 - плочи,
- 2 - шипки за стегање,
- 3 - краен неподвижен прицврстувач,
- 4 - краен подвижен прицврстувач,
- 5 - горна шипка од рамката за редување на плочи,
- 6 - долна шипка од рамката за редување на плочи.

Слика 14.7.-4. Плочест топлиноизменувач

Ваквата конструкција овозможува да се отвора топлиноизменувачот за одржување или за промена на неговиот капацитет на пренос на топлина со додавање или одземање на одреден број на плочи.

Материјалот од кој се изработуваат плочите е различен и зависи од намената. На пример, се користи челик што не кородира за свежа вода, масла за подмачкување и масла за горење, а титаниум за морска вода.

Обликувањето на плочите се врши со пресување. Притоа, се до-

биваат различни канали кои обезбедуваат зголемена турбуленција и механичка крутост на плочите. Во зависност од тоа дали произведуваат висок или низок интензитет на турбуленција, обликот на каналите се именува “тврд” или “мек”. Тврда плоча значи поголем коефициент на пренос на топлина, а тоа води до помала потребна преносна површина, што на крајот значи покомпактен топлиноизменувач.

Компактноста на еден топлиноизменувач се изразува како однос на постигнатата површина на пренос на топлина по единица волумен на топлиноизменувачот. За плочестите топлиноизменувачи вредноста на компактоста е помеѓу 100 и 660 m²/m³.

Затинките на плочестите топлиноизменувачи имаат задача да го спречат истекувањето на флуидот по обемот на плочата и да го насочат флуидот во одреден правец. Се изработуваат од различни материјали, во зависност од температурата и карактеристиките на флуидот што се употребува. Со нормални затинки работната температура на топлиноизменувачот е до 150 °C, а со поквалитетни и поскапи затинки работната температура е до 300 °C. Притисокот е ограничен на 2,5 МПа.

Плочестите топлиноизменувачи се изработуваат и без затинки, кога плочите се залемуваат, но нивната примена е ограничена на оние случаи кај кои не е важно одржувањето.

Плочестите топлиноизменувачи може да се изработат и со заварување на плочите во случај кога се употребуваат агресивни флуиди.

14.7.-3. ТОПЛИНОИЗМЕНУВАЧИ СО ПРОШИРЕНА ПОВРШИНА

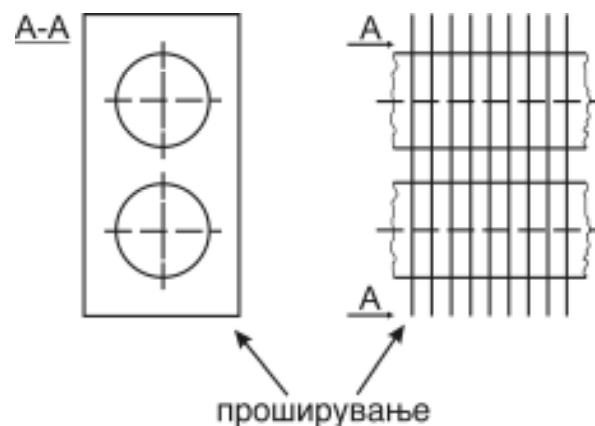
Пренесената топлина во топлиноизменувач, Равенка (14.1.-1.), се пресметува како производ од три члена: коефициентот на пренос на топлина, површината и температурната разлика.

За одредена конструкција на топлиноизменувач и флуиди со одредени температури k и Δt се непроменливи. Тоа значи дека пренесената топлина во топлиноизменувачот, Q , може да се зголеми само со зголемување на површината, A .

Поради тоа термичарите пристапиле кон зголемување на површината на пренос на топлина, односно кон користењето на топлиноизменувачи со проширена површина.

Со зголемувањето на површината се зголемува компактноста на топлиноизменувачот. Цевкастите и плочестите топлиноизменувачи имаат компактност помала од $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$, а топлиноизменувачите со проширена површина постигнуваат и до 6000 m^2 преносна површина / m^3 волумен на топлиноизменувачот.

Најчесто применувани се цевни и плочести проширувања, Слика 14.7.-5. и Слика 14.7.-6.. Цевните проширувања се претставени со правоаголни плочи кои се навлечени на цевките со што се зголемува преносната површина за флуидот што ги опструјува цевките од надворешната страна. Плочестите проширувања се претставени со испревиткан лим поставен во внатрешноста на топлиноизменувачот со што се зголемува преносната површина на флуидот што струи од внатрешната страна на топлиноизменувачот.



Слика 14.7.-5. Цевни проширувања



Слика 14.7.-6. Плочести проширувања

14.7.-4. РЕГЕНЕРАТИВНИ ТОПЛИНОИЗМЕНУВАЧИ

Во системите воздух / воздух често се користат регенеративни то-

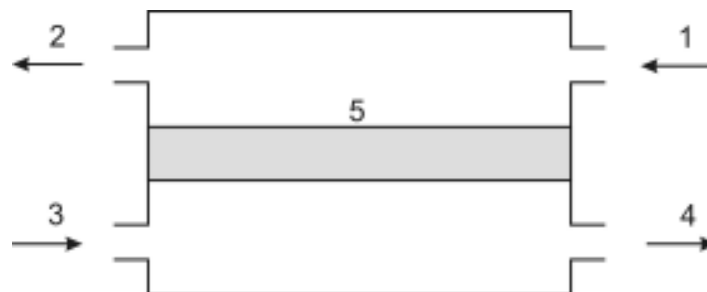
топлиноизменувачи, Слика 14.-2..

Топлиот воздух, пред да се исфрли во атмосферата, се носи во регенеративен топлиноизменувач за да му се одземе дел од топлината, а во некои конструкции и дел од влагата. На тој начин се остварува заштеда на топлинска енергија преку процес на пренос на топлина помеѓу два воздушни тека со различни температури.

Топлината што ја има воздухот при неговото исфрлување од сушилници, печки или загреани простории му се предава на воздухот што се внесува за да му се зголеми температурата.

Роторот на регенеративниот топлиноизменувач се врти бавно, со вообичаена брзина од 0 до 10 вртежи во минута. Тој може да биде изведен и од хигроскопен материјал за да одзема и влага од воздушниот тек што поминува низ него.

Според Слика 14.7.-7.,



- 1 - ладен воздух / влез,
- 2 - ладен воздух / излез,
- 3 - топол воздух / влез,
- 4 - топол воздух / излез,
- 5 - преносна површина.

Слика 14.7.-7. Функционална шема

ефектноста на регенеративен топлиноизменувач е,

$$\begin{aligned}
 \varepsilon &= \frac{q}{q_{\max}} = \\
 &= \frac{m_t c_{p,t} (t_3 - t_4)}{\Phi_{\min} (t_3 - t_1)} = \\
 &= \frac{m_l c_{p,l} (t_2 - t_1)}{\Phi_{\min} (t_3 - t_1)}, \quad (14.7.-1.)
 \end{aligned}$$

Ако се преуредат членовите на Равенката (14.7.-1.) се добива изразот за температурата на ладниот воздух на излез од регенеративниот топлиноизменувач,

$$t_2 = t_1 + \frac{\varepsilon \Phi_{\min}}{m_1 c_{p,l}} (t_3 - t_1). \quad (14.7.-2.)$$

ОЗНАКИ

A	m^2	Површина
a		Апсорбливост
b	m	Ширина
c	J/kgK	Специфичен топлински капацитет
c_p	J/kgK	Специфичен топлински капацитет при константен притисок
c_v	J/kgK	Специфичен топлински капацитет при константен волумен
$c_{p,a}$	J/kgK	Специфичен топлински капацитет на сув воздух при константен притисок
$c_{p,t}$	J/kgK	Специфичен топлински капацитет на топол воздух при константен притисок
$c_{p,l}$	J/kgK	Специфичен топлински капацитет на ладен воздух при константен притисок
$c_{p,w}$	J/kgK	Специфичен топлински капацитет на водна пара при константен притисок
c_{pm}	kJ/kgK	Среден специфичен топлински капацитет при константен притисок
c_{vm}	kJ/kgK	Среден специфичен топлински капацитет при константен волумен
clo		Единица за облеченост
DR		Долен резервоар
d	m	Дијаметар
d_v	kg/m^3	Апсолутна влажност
E	J/s	Ексергија
e	J/kg	Специфична ексергија
$\dot{E}^{(e)}$	W/m^2	Емитувана енергија
$\dot{E}_b^{(e)}$	W/m^2	Емитувана енергија од црно тело
$E_\lambda^{(e)}$	W/m^2	Емитувана енергија на одредена бранова должина
F_i		Функција за истонасочен топлиноизменувач

F_p		Функција за противнасочен топлиноизменувач
F_k		Функција за крстонасочен топлиноизменувач
GR		Горен резервоар
h	m	Висина
l	J	Енталпија
i	J/kg	Специфична енталпија
i'	kJ/kg	Специфична енталпија на врела вода
i''	kJ/kg	Специфична енталпија на сувозаситена водна пара
i_a	J/kg	Специфична енталпија на сув воздух
i_s	J/kg	Специфична енталпија на заситен влажен воздух
i_w	J/kg	Специфична енталпија на водна пара
K		Критична точка
K_a		Погонска карактеристика на апаратот
k	W/m ² K	Коефициент на пренос на топлина
l	m	Должина
m	kg	Маса
m_a	kg	Маса на воздух
m_{da}	kg	Маса на сув воздух
m_{ac}	kg	Маса на целосно количество на воздух
m_{ar}	kg	Маса на рециркулационен воздух
m_l	kg	Маса на ладен воздух
m_t	kg	Маса на топол воздух
m_w	kg	Маса на водна пара
met	W/m ²	Единицата за оддавање на топлина од кожата на човекот
n		Експонент на политропа
n	mol	Број на молови на влажен воздух
n_a	mol	Број на молови на сув воздух
n_w	mol	Број на молови на водна пара
p	N/m ²	Притисок
$p_{s,t}$	Pa	Притисок на заситување

Q	J	Топлина
Q	W	Топлински тек
q	J/kg	Специфична топлина
q _f	J/kg	Специфична топлина на загревање
q _{pr}	J/kg	Специфична топлина на прегревање
R	J/kgK	Гасна константа
R _μ	J/kmolK	Општа гасна константа
R _c	m ² K/W	Термички отпор при термичка конвекција
r	J/kg	Топлина на испарување
r		Рециркулационен однос
S	J/K	Ентропија
s	J/kgK	Специфична ентропија
s'	J/kgK	Специфична ентропија на врела вода
s''	J/kgK	Специфична ентропија на сувозаситена водна пара
s _{da}	kJ/kgK	Специфична ентропија на сув воздух
s _s	kJ/kgK	Специфична ентропија на заситен влажен воздух
T	K	Температура
T ₀	K	Температура при нормални услови
T _s	K	Температура на заситување
t	°C	Температура
t _r	°C	Температура на точка на роса
t _{st}	°C	Температура на сув термометар
t _{vt}	°C	Температура на влажен термометар
t ^o	°C	Почетна температура
t [*]	°C	Крајна температура
t _{max}	°C	Максимална температура
U	J	Внатрешна енергија
u	J/kg	Специфична внатрешна енергија
V	m ³	Волумен
v	m ³ /kg	Специфичен волумен
v'	m ³ /kg	Специфичен волумен на врела вода
v''	m ³ /kg	Специфичен волумен сувозаситена водна пара

V_{da}	m^3/kg	Специфичен волумен на сув воздух
V_s	m^3/kg	Специфичен волумен на заситен влажен воздух
W	J	Работа
$W_{max,t}$	J	Максимална техничка работа
W_T	J	Техничка работа
W_S	J	Работа на струење
w	m/s	Брзина
X_{so}	%	Содржана влага по сува основа
X_{s0}	%	Содржана влага по влажна основа
X^o	%	Почетна содржана влага
X^*	%	Крајна содржана влага
x	kg/kg	Содржана влага во воздух
x_s	kg/kg	Содржана влага на заситување
Z	m	Надморска висина
z	kg/kg	Втечен дел од воздухот
Φ	W/K	Топлински капацитет
α	W/m ² K	Коефициент на термичка конвекција
λ	W/mK	Коефициент на термичка спроводливост
λ	m	Бранова должина
λ_a	W/mK	Коефициент на термичка спроводливост за воздух
λ_i	W/mK	Коефициент на термичка спроводливост за железо
λ_w	W/mK	Коефициент на термичка спроводливост за вода
δ	m	Дебелина
ρ	kg/m ³	Густина
ρ_0	kg/m ³	Густина при нормални услови
φ	%	Релативна влажност
κ		Експонент на адијабата
ε		Емисивност
ε		Ефектност на топлиноизменувач
ε_n		Емисивност во правец на нормала

ЛИТЕРАТУРА

- Mollier, R. (1923). Ein neues Diagramm für Dampf-luftgemische, ZVDI 67, s. 869-872, Berlin, Deutschland.
- Goff, A., S. Gratch (1945). Thermodynamic properties of moist air, ASHVE Transactions, Volume 51, p. 125., U.S.A..
- Goff, A., S. Gratch (1946). Low - pressure properties of water from -160 to 212 F, ASHVE Transactions, Volume 52, p. 95., U.S.A..
- Goff, A. (1949). Standardization of thermodynamic properties of moist air, ASHVE Transactions, Volume 55, 455, Also Heating, Piping and Air Conditioning, Volume 21, Number 11, p. 118., U.S.A..
- Sutton, O. (1953). Micrometeorology, McGraw - Hill Book Company, New York, U.S.A..
- , (1959). DIN 1947, Leistungsversuche an Kühltürmen, VDI - Kühltürmregeln, Deutschen Normenausschusses, Berlin, Deutschland.
- Ražnjević, K. (1964). Toplinske tablice, Tvornica parnih kotlova, Zagreb, Hrvatska.
- , (1966). U.S. Department of agriculture, Agricultural research service, Rice in the United States, Varieties and production, Agr. Handbook 289, p. 124, U.S.A..
- Fanger, P. O. (1967). Calculation of thermal control: introduction of a basic comfort equation, ASHRAE Transactions, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Volume 73, Number 2, Atlanta, U.S.A..
- Bošnjaković, F.(1970). Nauka o toplini, Prvi dio, Tehnička knjiga, Zagreb, Hrvatska.
- Fanger, P. O. (1972). Thermal comfort, McGraw - Hill, New York, U. S. A..
- Bošnjaković, F.(1976). Nauka o toplini, Drugi dio, Tehnička knjiga, Zagreb, Hrvatska.
- Mojsovski, A., M. Serafimov, D. Nikolić (1978). Klimatska kriva Skoplja, Klimatizacija, grejanje, hlađenje, 1, s. 55 - 57, Beograd, Jugoslavija.
- Krischer, O.(1978). Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik Springer-Verlag, Berlin, Deutschland.
- , (1978). MKC.E.B8.028. Одредување на содржаната влага, Пченица како суровина во мелничката индустрија, Скопје, Македонија.

- Holman, J. P. (1981). Heat transfer, McGraw - Hill, New York, U. S. A..
- Hyland, W., A. Wexler (1983a). Formulations for the thermodynamic properties of dry air from 173,15 K to 473,15 K and the saturated moist air from 173,15 K to 372,15 K, at pressure to 5 MPA, ASHRAE Transactions, Volume 89, Number 2A, p. 520-535, Atlanta, U.S.A..
- Hyland, W., A. Wexler (1983b). Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H₂O from 173,15 to 473,15 K, ASHRAE Transactions, Volume 89, Number 2A, p. 500 - 519, Atlanta, U.S.A..
- Shah, R. K., C. Muller (1985). Heat Exchangers, Handbook of Heat Transfer Applications, Editors, W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, E. N. Ganic, Chapter 4, p. 1-312, McGraw - Hill, New York, U. S. A..
- Андрејевски, Б., А. Мојсовски, М. Серафимов (1985). Гаранциски и нормативни испитувања на ладилните кули за блок I и блок II, Машински факултет, Скопје, Македонија.
- Андрејевски, Б., А. Мојсовски, К. Димитров (1985). Стручен извештај за функционалноста на ладилната кула, Машински факултет, Скопје Македонија.
- Андрејевски, Б., А. Мојсовски, К. Димитров (1986). Влијание на температурата на оладената вода во ладилната кула на снагата на турбината и потрошувачката на јаглен, Институт за термотехника и термоенергетика, Машински факултет, Скопје, Македонија.
- Shah, R. K. (1987). A Short Course on Single-phase Process Heat Exchangers, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina.
- Андрејевски, Б.(1988). Термодинамика I и II дел, Универзитет “Св. Кирил и Методиј”, Скопје, Македонија.
- Мојсовски, А. (1992). Пренос на топлина, Универзитет “Св. Кирил и Методиј”, Скопје, Македонија.
- , (1994). ANSI/ASHRAE Standard 4 1.6, Standard Method for Measurement of Moist Air Properties, American National Standards Institute, New York, U.S.A..
- Wiederhold, P.(1995). Humidity measurements, Handbook of Industrial Drying, A. Mujumdar (Ed.), Second edition, Marcel Dekker, p.1313-1341, New York, U.S.A..
- Серафимов, М. (1996). Топлински мерења, Умножени предавања, Машински факултет, Скопје, Македонија.
- Olivieri, J., T. Singh, S. Lovodocky (1996). Psychrometrics - Theory and practice, American Society of Heating, Refrigerating and Air - Conditioning Engineers, Atlanta, U.S.A..

- Wiederhold, P. R. (1997). Water Vapor Measurements, Wiederhold Associates Boston, Massachusetts, U.S.A..
- Мојсовски, А., М. Серафимов, Ѓ. Мартиновски, П.Ристевски, В. Мијаковски (1997 -1999). Елементи на термичката основа на Македонија, научноистражувачки проект, Скопје, Македонија.
- Mojsovski, A., A. Poredoš (1999). Climatic curves, Proceedings of the Second Annual Conference of Slovenian Association for District Energy, p. 67-73, Portorož, Slovenia.
- Мојсовски, А., В. Мијаковски (1999). Нова климатска крива за Скопје, “Материјали ДТМ ‘99”, Седмо советување на друштвото на термичарите на Република Македонија, с. 9-17, Охрид, Македонија.
- Ристевски, П., А. Мојсовски (1999). Дневни промени на температурата на воздухот во Македонија, Материјали “ДТМ ‘99”, Седмо советување на Друштвото на термичарите на Република Македонија, с. 100-107, Охрид, Македонија.
- Поредош, А., А. Мојсовски, А. Китановски, Ф. Мојсовски (1999-2000). Истражување на далечинско ладење во различни климатски услови, Словенечко-македонски проект на научно-технолошка соработка, Љубљана-Скопје, Словенија-Македонија.
- Мартиновски., Ѓ., А. Мојсовски, Г. Попсимонова, Ј. Катажина- Петревска, Ф. Мојсовски (1999-2000). Конзервирање на домати во фармерски сушилници со искористување на сончева енергија, Применето-истражувачки проект, Скопје, Македонија
- Rant, Z. (2000). Termodinamika: knjiga za uk in prakso, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija.
- Мартиновски, Ѓ., А. Мојсовски, Ј. Катажина - Петревска, Ф. Мојсовски (2000). Дехидрирање на домати со примена на сончева енергија, Зборник на трудови , XXV средба “Факултет - стопанство 2000”, с. 101-106, Земјоделски факултет, Скопје, Македонија.
- Gašperšič, B. (2001). Prenos toplote, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija
- Ćučuz, S. (2001).Trends in automotive climatisation,Proceedings of the XVIII International conference with Exhibition “Science and motor vehicles”, p. 33 - 36, Belgrade, Yugoslavia.
- McIntosh, B.D. Ian, Chad B. Dorgan, Charles B. Dorgan (2001). ASHRAE Laboratory design guide, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, U.S.A..
- Мојсовски, Ф. (2001). Термичка удобност во автомобилите, Материјали “ДТМ ‘01” , Осмо советување на Друштвото на термичарите на Република Македонија, с. 105-113, Охрид, Македонија.

- Мојсовски, Ф. (2001). Термичка удобност во автобусите, Зборник на трудови на Машинскиот факултет, с. 91 - 94, Скопје, Македонија.
- Мојсовски, А., Ѓ. Мартиновски, Ф. Мојсовски (2001). Сушење со енергија од Сонцето, Материјали "ДТМ '01", Осмо советување на Друштвото на термичарите на Република Македонија, с. 11-20, Охрид, Македонија.
- Hickey, D.(2001). Focus on humidity control, ASHRAE Journal, The magazine of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Volume 43, No. 10, p.10 -11, Atlanta, U.S.A..
- , (2001a). Часовни вредности на температурата и релативната влажност на воздухот за периодот 1986 - 2000 година, Управа за хидрометеоролошки работи, Скопје, Македонија.
- , (2001b). Документи на фирмата "Аутомобиле СК", Скопје, Македонија.
- , (2001c). Документи на фирмата "Novus Trade", Скопје, Македонија.
- , (2001d). Документи на фирмата "Diavia", Скопје, Македонија.
- Mojsovski, F., V. Mijakovski (2002). Refrigeration equipment and system in dairy plant "Mlekara" - Bitola, VI Meeting SDHK "Cooling in industry", p.51-55, Dobrna, Slovenia.
- Мојсовски, Ф.(2002). Психрометриска анализа на термичките процеси што користат влажен воздух , Магистерска работа, Скопје, Македонија.
- Nagengast, B. (2002). 100 Years of air conditioning, ASHRAE Journal, The magazine of the American Society of Heating, Refrigerating and Air - Conditioning Engineers, Volume 44, No. 6, p. 44 - 46, Atlanta, U.S.A..
- Sherif, A. S. (2002). Overview of psychrometrics, ASHRAE Journal, The magazine of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Volume 44, No. 7, p. 33 - 41, Atlanta, U.S.A..
- Harriman, L.G.(2002). Overview of psychrometrics, ASHRAE Journal, The magazine of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Volume 44, No. 8, p. 22 - 29, Atlanta, U.S.A..
- Мартиновски, Ѓ., А. Мојсовски, Ј. Катажина-Петревска, Г. Попсимонова, Ф. Мојсовски, М. Спасеноска (2002). Сушење и конзервирање на зеленчук со енергија од сонцето, Применето-истражувачки проект финансиран од GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH).
- Мартиновски, Ѓ., А. Мојсовски, Ј. Катажина - Петревска, Попсимонова, Ф. Мојсовски, (2002). Воведување на фармерска сушилница што користи енергија од сонцето за сушење на зеленчук и овошје во

- Македонија, Прв симпозиум за хортикултура, Зборник на трудови, с. 459-463, Охрид, Македонија.
- , (2003). Surface transportation, ASHRAE Handbook of HVAC Applications American Society of Heating, Refrigerating and Air - Conditioning Engineers, Chapter 9, p. 9.1.- 9.14., Atlanta, U.S.A..
- Gatley, P. Donald (2004). Psychrometric chart celebrates 100th anniversary, ASHRAE Journal, The magazine of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Volume 46, No.11, p. 16 - 20, Atlanta, U.S.A..
- Olesen, W. Bjarne, G. S. Brager (2004). A better way to predict comfort, ASHRAE Journal, The magazine of the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Volume 46, No. 8., p. 20-28, Atlanta, U.S.A..
- Recknagel, H., E. Sprenger, E. Schramek (2004). Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, 72 Ausgabe, R. Oldenburg Industrieverlag GmbH, München, Deutschland.
- Аврамовски, П., Ф. Мојсовски (2004). Алтернативни енергетски извори, Материјали "ДТРС '04", с. 67-73, Битола, Македонија.
- Мојсовски, А., Ѓ. Мартиновски, Ф. Мојсовски, Р.Јандревски (2004). Сушење на земјоделски производи, Материјали "ДТРС '04", Девето советување на Друштвото на термичарите на Република Македонија, с. 76-84, Битола, Македонија.
- , (2005a). Psychrometrics, ASHRAE Handbook of Fundamentals, Chapter 6, p. 6.1. - 6.17, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, U.S.A..
- , (2005b). Humidity measurement, ASHRAE Handbook of Fundamentals, Chapter 14, p.14.10 -14.13, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, U.S.A..
- , (2005c). Thermal Comfort, ASHRAE Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air - Conditioning Engineers, Chapter 8, p. 8.1. - 8.29., Atlanta, U.S.A..
- , (2005d). Climatic design information, ASHRAE Handbook of Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Chapter 28, p. 28.1. - 28.26., Atlanta, U.S.A.
- Gatley, D. P. (2005). Understanding Psychrometrics, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Second edition, Atlanta, U.S.A..
- Мојсовски, А, А. Поредош, Б. Церквеник, Ф. Мојсовски (2004 - 2005). Истражување на далечинско ладење во различни климатски услови - втора фаза, Словенечко - македонски проект на научно-технолошка соработка, Љубљана-Скопје, Словенија-Македонија.

- Mojsovski, F., A. Mojsovski, A. Poredoš (2005). Parameters required in the analysis of possibilities for introducing a district cooling system in Skopje, VIII Expert Conference "Production and distribution in district energy supply", p. 111-116, Portorož, Slovenia.
- Аврамовски, П., Ф. Мојсовски (2006). Алтернативни енергетски извори-искуства. Материјали "ДТРМ '06", Десетто советување на Друштвото на термичарите на РМ, с. 47-51, Битола, Македонија.
- Мојсовски, А., Ѓ. Мартиновски, Ф. Мојсовски (2006). Сушење на ниски температури, Материјали "ДТРМ '06", Десетто советување на Друштвото на термичарите на Република Македонија, с. 53-62, Битола, Македонија.
- Мојсовски, Ф. (2006). Овлажувачи, Материјали "ДТРМ '06", Десетто советување на Друштвото на термичарите на Република Македонија, с. 72-82, Битола, Македонија.
- (2006а). Часовни вредности на температурата и релативната влажност на воздухот за периодот 2001 - 2005 година, Управа за хидрометеоролошки работи, Скопје, Македонија.
 - (2006б). Документација на сушилницата "ЗЕЛОП", Свети Николе, Македонија.
 - (2006с). Thermal Properties of Foods, ASHRAE Handbook Refrigeration, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Chapter 9, p. 9.1 - 9.31, Atlanta, U.S.A..
 - (2006д). Документација на фирмата за термотехнички уреди и монтажа "ЦЕР", Чачак, Србија.
- Мојсовски, Ф. (2007). Анализа на нивото на влагата во психрометриски термички процеси, Докторска дисертација, Машински факултет, Скопје.
- Мојсовски, Ф. (2008). Улогата на влагата во термичката удобност на човекот, Материјали "ДТРМ '08", с.57-65, Битола, Македонија.
- Аврамовски, П., Ф. Мојсовски (2008). Алтернативни извори на енергија - Пилот проект "Еколошка куќа", Материјали "ДТРМ '08", с. 36-39, Битола, Македонија.
- (2009а). Psychrometrics, ASHRAE Handbook - Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Chapter 1, p.1.1-1.16, Atlanta, U.S.A..
 - (2009б). Thermal comfort, ASHRAE Handbook - Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Chapter 9, p.9.1-9.30, Atlanta, U.S.A..
 - (2009с). Measurement and Instruments, ASHRAE Handbook - Fundamen-

tals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Chapter 36, p.36.1-36.36, Atlanta, U.S.A..

- , (2009d). Directive 2007/51/EC of the European Parliament and of the Council relating to restrictions on the marketing of certain measuring devices containing mercury, Official Journal of the European Union, p. 13-15, L257, Volume 50, 03 October 2007.
 - , (2010). Standard Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy ANSI/ASHRAE 55/2010, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, U.S.A..
 - , (2012a). Cooling Towers, ASHRAE Handbook of HVAC Systems and Equipment, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Chapter 40, p.40.1-40.23, Atlanta, U.S.A..
 - , (2012b). Humidifiers, ASHRAE Handbook of HVAC Systems and Equipment, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Chapter 22, p.22.1-22.12, Atlanta, U.S.A..
- Мојсовски, Ф. (2013). Магнетно ладење, Материјали “ЗТПМ ’13”, Тринаесетто советување на Здружението на термичарите на Република Македонија, с. 28-34, Битола, Македонија.
- Mojsovski, F. (2013). Solar Drying of Fruits and Vegetables, 16th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Sokobanja, Serbia.

CIP - Каталогизација во публикација Национална и универзитетска библиотека "Св. Климент Охридски", Скопје

536(075.8)

МОЈСОВСКИ, Филип А.

Термодинамика [Електронски извор] / Филип А. Мојсовски. - Скопје :
Универзитет "Св. Кирил и Методиј", Машински факултет, 2015

Начин на пристап (URL): <http://www.ukim.edu.mk/e-izdavastvo>
- Текст во ПДФ формат, содржи 152 стр.. - Наслов
преземен од екранот. - Опис на изворот на ден 09.07.2015. -
Библиографија: стр. 146-152

ISBN 978-9989-43-377-1

а) Термодинамика - Високошколски учебници
COBISS.MK-ID 98987274