

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Енергетика и процесна техника

Предмет: Пренос топлоте и масе

Број индекса: 80/2009

Маринко Ј. Муић

Плочасти размењивачи топлоте

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Небојша Лукић - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Садржај:

1. Увод	5
1.1 Дефиниција енергије и њени облици	5
1.2 Извори енергије	5
1.3 Први закон Термодинамике	6
1.4 Други закон Термодинамике	7
2. Простирање топлоте	8
2.1 Појам температурског поља	9
2.2 Кондукција	9
2.2.1 Провођење топлоте кроз једнослојан, раван, бесконачан зид	10
2.2.2 Провођење топлоте кроз вишеслојан, раван, бесконачан зид	11
2.3 Конвекција	12
2.3.1 Коефицијент прелаза топлоте h [W/m^2K]	13
2.3.2 Reynolds-ов број	14
2.3.3 Prandtl-ов број	14
2.3.4 Grashoff-ов број	15
2.3.5 Nusselt-ов број	15
2.3.6 Општа формула за израчунавање Nu броја	15
2.3.6.1 Принудна конвекција	16
2.3.6.2 Природна конвекција	17
2.4 Зрачење топлоте	17
2.4.1 Сјај површине	17
2.4.2 Рефлексија, апсорпција, дијатермија	18
2.5 Пролаз топлоте	19
3. Размењивачи топлоте	20
3.1 Расхладни торњеви	21
3.1.1 „Влажне“ расхладне куле	21
3.1.2 „Суве“ расхладне куле	21
3.2 Размењивачи топлоте са посредним контактом флуида	22
3.3 Струјање флуида унутар размењивача топлоте	24
4. Плочасти размењивачи топлоте	25
4.1 Историјат плочастих размењивача топлоте	25
4.2 Основни делови плочастих размењивача топлоте	26
4.3 Принцип функционисања плочастог размењивача топлоте	29
4.4 Подела плочастих размењивача топлоте	31
4.4.1 Класични са заптивачима	31
4.4.2 Лемљени	32
4.4.3 Потпуно заварени	32
4.4.4 Полузаварени	34
4.5 Употреба плочастих размењивача топлоте	34
5. Прорачун плочастог размењивача топлоте	36
6. Закључак	40
Литература	42

Резиме:

У овом завршном раду описани су плочасти размењивачи топлоте. У првом поглављу овог рада дат је осврт на основне појмове у Термодинамици: појам енергије, Први закон Термодинамике, Други закон Термодинамике.

Како је основна намена плочастих размењивача топлоте да размењују топлотну енергију између флуида који струје кроз њихову масу, у другом поглављу су описани начини простирања топлоте.

У трећем поглављу поклоњена је пажња размењивачима топлоте, генерално, са поделама и основним карактеристикама.

У четвртном поглављу су описани плочасти размењивачи: дефиниција, историјат, основни делови, принцип функционисања, њихова подела, као и употреба (област њихове примене).

У петом поглављу дат је упрошћен прорачун који се може применити на већину плочастих размењивача топлоте.

Кључне речи: Први закон Термодинамике, Други закон Термодинамике, Простирање топлоте, Плочасти размењивач топлоте, Топлотна енергија.

Abstract:

This paper presents the plate heat exchangers. In the first part of the thesis, provides an overview of the basic concepts of thermodynamics: the concept of energy, First law of Thermodynamics, Second law of Thermodynamics.

As the main purpose of plate heat exchangers to exchange heat between the fluid flowing through their mass in the second part describes how the transfer of heat.

In the third part focus was heat exchangers, generally, with the divisions and main characteristics.

In the fourth part describes plate exchangers: definition, history, basic parts, functioning principle, their classification, as well as use (area of application).

The fifth part gives a simplified calculation which can be applied to most plate heat exchangers.

Keywords: First law of Thermodynamics, Second law of Thermodynamics, Heat transfer, Plate heat exchangers, Thermal energy.

1. Увод

1.1 Дефиниција енергије и њени облици

Енергија се дефинише као способност тела да врши рад. Ова општа дефиниција је део основних дефиниција савремене физике и то у оном делу који треба да одговори на питање о узроку и пореклу природних феномена акције, дејства и силе. Сваки физички систем поседује енергију у извесној количини. Количина енергије система није апсолутна вредност, већ релативна у односу на референтно стање. Енергија физичког система се дефинише као количина механичког рада кога систем може да произведе када мења своје текуће стање и прелази у референтно стање [1] [2] [3].

Ознака и основна јединица енергије дате су у табели 1.

Табела 1. Ознака и основна јединица енергије [1] [2] [3]

Ознака	Јединица
E	$J=Nm=kgm^2/s^2$

Сви облици енергије могу се поделити на постојане и на непостојане облике енергије. У постојане облике енергије спадају [1] [2] [3]:

- *Кинетичка енергија* – последица кретања тела (кинетичка енергија транслације, кинетичка енергија ротације, кинетичка енергија вибрације);
- *Потенцијална енергија* – последица положаја који објекат има у односу на друге објекте (нуклеарна потенцијална енергија, потенцијална енергија хемијске везе, гравитациона потенцијална енергија, еластична потенцијална енергија, електромагнетна потенцијална енергија);
- *Унутрашња енергија*.

У непостојане облике енергије спадају [1] [2] [3]:

- *Механички рад*;
- *Топлотна енергија* – последица загрејаности тела;

1.2 Извори енергије

Извори енергије се могу класификовати на више начина у зависности од критеријума по коме се врши класификација.

У зависности од тога да ли се енергија из датог извора може користити директно или индиректно, извори енергије деле се на [1] [2] [3]:

- *примарне* изворе енергије;
- *секундарне* изворе енергије.

Примарни извори енергије се према нивоу коришћења деле на [1] [2] [3]:

- *конвенционалне* изворе енергије;
- *неконвенционалне* изворе енергије.

Према периоду обновљивости, примарни извори енергије деле се на [1] [2] [3]:

- „*обновљиве*“ изворе енергије (енергија ветра, Сунца, енергија биомасе, геотермална енергија, хидроенергија, енергија плиме и осеке, топлота мора);
- „*необновљиве*“ изворе енергије (угаљ, нафта, природни гас, нуклеарна енергија).

1.3 Први закон Термодинамике

Први закон Термодинамике представља принцип очувања енергије. Он доводи у однос енергију система са његовим интеракцијама са околином: радом и топлотом. У диференцијалном облику Први закон Термодинамике за затворене системе гласи [4]:

$$dE = \delta Q - \delta L \quad (1)$$

Принцип очувања енергије указује да је сума елементарне промене енергије система (dE), елементарне топлоте са знаком минус ($-\delta Q$) и елементарног рада (δL) једнака нули.

Први закон Термодинамике у интегралном облику, од почетног стања 1 до крајњег стања 2, гласи [4]:

$$E_2 - E_1 = \int_1^2 \delta Q - \int_1^2 \delta L = Q_{12} - L_{12} \quad (2)$$

У овом облику, Први закон би могао да гласи да промена унутрашње енергије система се троши на размену топлоте и рада са околином. У једначини (2) рад и топлота у интегралном облику нису дати као разлике крајњег и почетног стања, јер они нису својства система, већ прелазне појаве, које директно зависе од начина промене стања (интеракције са околином). Систем поседује енергију, али се то не може рећи за рад и топлоту, које се појављују само у случајевима интеракције система и околине. Први закон Термодинамике је универзалан закон и важи за све могуће односе система и околине.

У многим процесима за добијање рада или расхладних процеса, радна материја се после више промена враћа у првобитно стање (циклус), стање истог нивоа енергије система ($E_{\text{крајње}} = E_{\text{почетно}}$). У том случају, Први закон Термодинамике за један обављен циклус гласи [4]:

$$\oint \delta Q = \oint \delta L \quad (3)$$

Дакле, у кружном процесу (циклусу), где се систем (радна материја) доводи у почетно стање, укупно размењена количина топлоте једнака је укупно размењеном раду између посматраног термодинамичког система и његове околине у циклусу.

Укупно размењена количина топлоте и рада представљају збир топлота и радова размењених појединачно по променама стања, које чине циклус.

1.4 Други закон Термодинамике

Циљ изградње електране је да се у њој енергија горива трансформише у рад (касније у електричну енергију). Уколико је гориво фосилно, идеја је да се сва топлота ослобођена сагоревањем горива трансформише у рад, што Први закон Термодинамике допушта. Реално то није могуће и то доказује Други закон Термодинамике [1] [4].

Наиме, Други закон Термодинамике казује да је могуће само део доведене топлоте претворити у рад. Остатак, као доведена топлота, предаје се нижем температурном нивоу (околини). Користан рад ће представљати разлику укупно доведене и одведене топлоте (по апсолутној вредности, јер је она по договору већ са знаком минус).

Није могуће директно изразити Други закон Термодинамике у виду једначине. Други закон указује да се све промене у природи одвијају у правцу вероватнијег стања и да је промена ентропије (величине стања система) изолованог система увек већа од нуле (или евентуално једнака нули), тј. $\Delta S_s \geq 0$. Могуће је уочити три важне последице Другог закона Термодинамике. Прво: постоји апсолутна температура T [K], као величина стања, која је независна од физичких карактеристика материје и увек је позитивна. Друго: постоји термодинамичка величина стања, ентропија S [J/kgK], чија је елементарна промена једнака елементарној топлоти, подељеној са апсолутном температуром, у случају квазистатичог процеса (идеализован, спор процес промене стања материје) [4]:

$$\delta S = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{kvaz} \quad (4)$$

Трећи закључак се назива Clausius-ова неједнакост, која гласи да је у сваком процесу елементарна промена ентропије већа, или евентуално једнака односу $\delta Q/T$:

$$\delta S \geq \frac{\delta Q}{T} \quad (5)$$

Као последица ове неједнакости, за процес за који важи да $dQ=0$, који се назива адијабатски процес, ентропија може остати иста или ће се повећати, ли се никада не може смањити. Адијабатски процес при коме се повећава ентропија материје је неповратан процес (сви реални процеси у природи су неповратни), јер враћање овог процеса на почетно стање у изолованом систему је немогуће због важења Другог закона Термодинамике ($\delta S < 0$) [4].

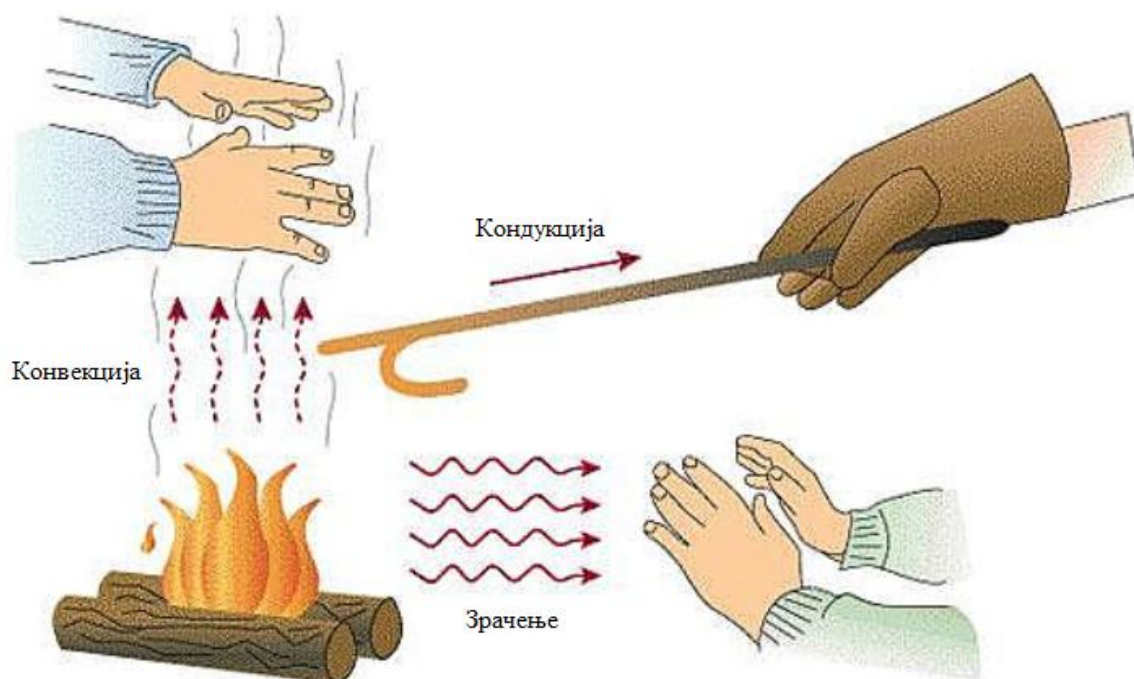
Постоје многе важне последице Clausius-ове неједнакости, које дефинишу услове термодинамичке равнотеже, укључујући хемијске процесе, као и ограничења максималне производње рада у разним процесима.

2. Простирање топлоте

Топлота се спонтано преноси са тела које је на вишој температури на тело које је на нижој температури, и то се у општем случају назива простирањем топлоте.

Топлота се може одводити или доводити телу (термодинамичком систему) на три начина (слика 1) [1] [2] [3] [4] [5]:

- *Провођењем (кондукцијом)* од једног делића материје до другог када се делићи материје (атоми, молекули) не крећу;
- *Конвекцијом* са једног дела материје на други када се делови материје крећу и носе са собом своју енергију;
- *Зрачењем*, када се топлота претвара у енергију зрачења (енергија електромагнетних таласа којима се са неког тела преноси кроз простор, па и вакуум, а наилазком на другу материју поново трансформише у топлоту).



Слика 1. Начини простирања топлоте [6]

Стварно простирање топлоте је комбиновано, што значи да су у извесној мери и истовремено заступљена сва три начина простирања топлоте.

Проблематика простирања топлоте присутна је у инжењерству када се настоји да се простирање топлоте интензивира (нпр. размењивачи топлоте) или успори (топлотна изолација домова) или када треба оптимизирати топлотне (термодинамичке) системе.

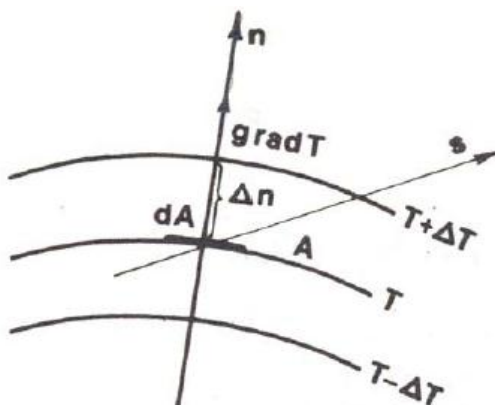
2.1 Појам температурског поља

Скуп температура у свим тачкама неког простора у датом тренутку чини температурско поље. Температура у било којој тачки тог простора одређена је координатама те тачке (x, y, z) и температуре τ .

Температурско поље дато је математичком једначином [1] [2] [3] [4] [5]:

$$T = T(x, y, z, \tau) \quad (6)$$

Ако се температуре, или средње температуре (уколико постоје промене температуре око њене средње вредности), у датом температурском пољу не мењају током времена, онда је такво поље устало (стационарно). Напротив, уколико се температуре, или средње температуре, мењају током времена, онда се такво температурско поље назива неустало (нестационарно). Све тачке са истим температурама у температурском пољу формирају површине једнаких температура које се називају изотермским температурама (слика 2).



Слика 2. Изотермске температуре унутар температурског поља (градијент температуре) [1]

2.2 Кондукција

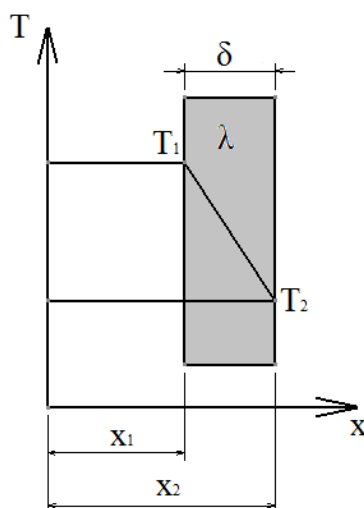
Температура неке материје је пропорционална средњој кинетичкој енергији молекула. Уколико је кинетичка енергија молекула већа, то је температура те материје виша. Провођење топлоте, или кондукција, одвија се по следећем принципу. Молекули чврстих материја који су на вишим температурама вибрирају (осцилују) брже око свог равнотежног положаја, тј. имају већу кинетичку енергију вибрације. При судару са молекулом на нижој температури преносе на њега енергетски импулс због чега му убрзају вибрације (кинетичку енергију вибрације), па се том делу материје повећава температура. Истовремено се молекулу који одаје импулс смањује брзина вибрације, а самим тим и температура. Описани механизам се наставља све док постоји термичка неравнотежа између молекула у телу. Овај начин простирања топлоте је мање изражен код флуида, а готово увек код чврстих тела [1] [2].

2.2.1 Провођење топлоте кроз једнослојан, раван, бесконачни зид

Случај провођења топлоте кроз једнослојан, раван и бесконачан зид је један од елементарних примера провођења топлоте са којим се инжењери сусрећу у пракси. Нека је провођење топлоте стационарно и нормално на зид (слика 3). Зид је једноструки, дебљине δ [m]. Изотермске површине T_1 и T_2 се подударaju са спољашњим површинама па је количина топлоте одређена са [1]:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2) A \tau \quad (7)$$

Једначина показује да је количина топлоте која се размени између крајњих спољашњих површина зида Q [J] директно пропорционална коефицијенту провођења топлоте λ [W/mK], разлици температура на спољњим површинама једнослојног равнoг бесконачног зида $T_1 - T_2$ [K], површини зида A [m²], времену током којег се одвија провођење топлоте кроз зид због постојања температурске разлике на крајевима зида (у тачкама 1 и 2) τ [s], а обрнуто пропорционална дебљини зида δ [m]. При томе температура у зиду линеарно опада од вредности T_1 до T_2 (слика 3) [1].



Слика 3. Кондукција кроз раван, једнослојан, бесконачан зид [1]

Коефицијент провођења топлоте k [W/mK] за чврсте материје углавном мало зависи од температуре, док је код течности и гасова овај коефицијент јако зависан, а мање од притиска. Код метала је познато да вредност k расте са повећањем чистоће састава метала, па зато легуре имају увек мањи k него чисти метали. Дрво има већи коефицијент провођења топлоте у правцу влакана од вредности коефицијента провођења топлоте у правцу попречно на влакна.

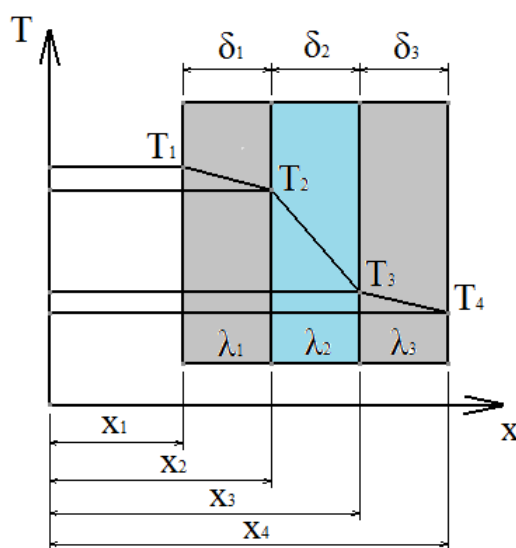
Вредности коефицијента провођења топлоте k за неке од различитих материјала дате су у следећој табели (табела 2).

Табела 2. Вредности коефицијента провођења топлоте λ за неке од различитих материјала [1] [4] [5]

Материјал	λ [W/mK]	Материјал	λ [W/mK]
Бакар, технички	349	Вода на 373 К	0,681
Алуминијум, чист	229	Стакло	0,465-1,05
Алуминијум, технички	203,5	Гума	0,12-0,23
Монел - метал	22,1	Стаклена вуна	0,035-0,045
Месинг	111,6	Азбестна вуна	0,058-0,2
Челик	51	Глицерин	0,279

2.2.2 Провођење топлоте кроз вишеслојан, раван, бесконачни зид

Нека се раван зид састоји из више (три) слоја као на следећој слици (слика 4) где је приказан случај провођења топлоте кроз трослојни зид. Густина топлотног флукса φ [W/m²] кроз вишеслојни раван зид при стационарном провођењу мора бити једнака за поједине слојеве 1,2,...,n.

**Слика 4.** Кондукција кроз раван, вишеслојан, бесконачан зид [1]

Математичка формула која описује предходно речено гласи [1] [2] [3]:

$$\varphi = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (T_1 - T_2) = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (T_2 - T_3) = \frac{\lambda_3}{\delta_3} (T_3 - T_4) \quad (8)$$

Температурски пад у поједином слоју је линеаран, али гледано у целини има законитост изломљене линије. За односни слој вишеструког зида температурски пад износи [1] [2] [3]:

$$\begin{aligned} T_1 - T_2 &= \frac{\varphi \delta_1}{\lambda_1} \\ T_2 - T_3 &= \frac{\varphi \delta_2}{\lambda_2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$T_3 - T_4 = \frac{\varphi \delta_3}{\lambda_3}$$

Укупни температурски пад добија сабирањем појединих падова [1] [2] [3]:

$$T_1 - T_2 + T_2 - T_3 + T_3 - T_4 = T_1 - T_4 \quad (10)$$

Јер постоји једнакост температура између слојева.

Укупни температурски пад $T_1 - T_4$ [K] износи [1] [2] [3]:

$$T_1 - T_4 = \varphi \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) \quad (11)$$

Количина топлоте Q [J] која се проведе кроз зид (слика 4) износи [1] [2] [3]:

$$Q = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} (T_1 - T_4) A \tau \quad (12)$$

Сада се укупни температурски пад може лако одредити за n -ти слој зида [1] [2] [3]:

$$T_1 - T_4 = \varphi \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (13)$$

Односно количина топлоте која се провођењем одведе, или доведе кроз n -ти слој зида износи [1] [2] [3]:

$$Q = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} (T_1 - T_n) A \tau = \frac{1}{R} (T_1 - T_n) \tau \quad (14)$$

Где је са $R = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i A}$ [K/W] означена *топлотна отпорност провођењу топлоте*.

2.3 Конвекција

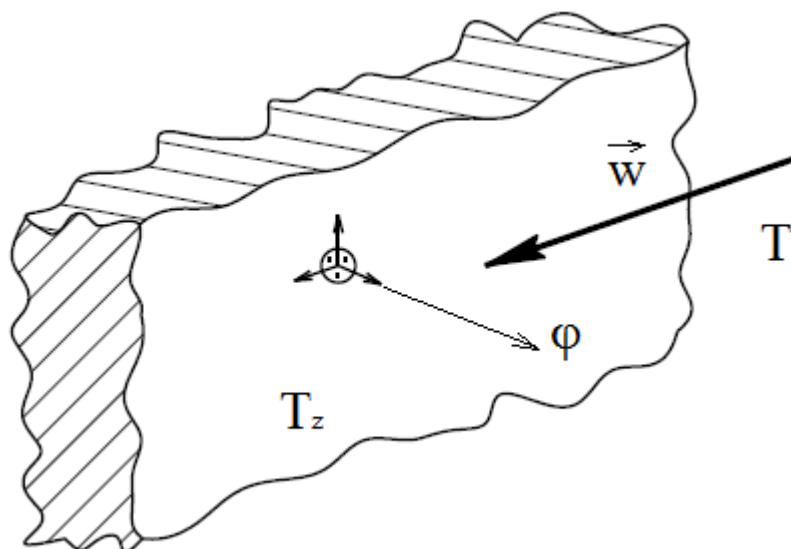
При конвекцији, топлота се простире кретањем делова самог флуида (течности и гаса), и то на неки од следећих начина [1] [2] [3] [4] [5]:

1. кроз флуид;
2. са флуида на чврсту површину;
3. са чврсте површине на флуид.

Простирње топлоте се одвија тако што део флуида (делић материје) прелази из средине са једном температуром у средину на другој температури где се мешају са делићима материје на тој температури. Приликом мешања размењује се унутрашња енергија дела флуида на вишој температури са унутрашњом енергијом дела флуида на нижој температури. Тада се делу флуида на вишој температури смањује температура, док се делу флуида на нижој температури увећава температура. Осим конвекцијом, топлоту је могуће пренети кроз флуид (течност или гас) такође као и кроз чврсто тело са молекула на молекул, тј. кондукцијом. Међутим, такав начин простирања топлоте кроз флуид се може занемарити у односу на простирање топлоте конвекцијом [1] [2] [3] [4] [5].

2.3.1 Коефицијент прелаза топлоте h [$\text{W/m}^2\text{K}$]

Веома често је интересно разматрање случаја када топлота прелази са неког флуида на неку чврсту површину (и обратно). Количина топлоте која се у том случају размени, може се описати следећим математичким обрасцем (слика 5) [1] [2] [3] [4] [5]:



Слика 5. Прелаз топлоте са флуида на чврсту површину [1]

$$Q = \varphi A \tau = h(T_z - T_f) A \tau \quad (15)$$

У изразу (15) T_z [K] је температура чврсте површине (зида), T_f [K] температура флуида који размењује топлоту са чврстом површином, док h [$\text{W/m}^2\text{K}$] представља коефицијент прелаза топлоте који је дефинисао Newton [2].

Коефицијент прелаза топлоте h највећим делом обухвата простирање топлоте у флуиду конвекцијом (кретањем делића материје). Међутим, како се топлота простира у флуиду и провођењем (молекуларно) веома малим интензитетом, коефицијент h и то узима у обзир. Молекуларно простирање зависи од температурског поља, а простирање топлоте кретањем делића материје од брзинског и температурског поља [1] [4] [5].

Пренос топлоте конвекцијом и самим тим h зависи од следећих фактора: врсте флуида, облика и стања површине на којој се размењује топлота, услова и брзине струјања и температурске разлике [1].

Карактеристични случајеви конвективне размене топлоте дешавају се на: површинама равних зидова различитих положаја, површинама зидова цеви, кугли и осталих облика које имају уређаји који се примењују у техници.

Коефицијент прелаза топлоте h [W/m²K] у општем случају је тешко израчунати за све случајеве у техници, па се стога у већини случајева одређује експериментално.

Типичне вредности за овај коефицијент су [1]:

1. *Природно струјање ваздуха* 5-25 W/m²K;
2. *Принудно струјање ваздуха* 10-200 W/m²K;
3. *Природно струјање воде* 20-100 W/m²K;
4. *Принудно струјање воде* 50-10.000 W/m²K.

Код конвекције у непосредној близини зида долази до нагле промене температуре флуида, јер приликом провођења топлоте кроз гранични ламинарни слој флуида се више проводи молекуларно него кретањем делића материје. Ако се гранични ламинарни слој смањи пренос топлоте је већи и обрнуто (храпаве површине имају бољи пренос топлоте конвекцијом).

2.3.2 Reynolds-ов број

Утицај брзине струјања на h процењује се са обзиром на врсту струјања, које може бити: ламинарно (за цеви кружног попречног пресека $Re < 2.320$), прелазно ($2.320 < Re < 4.000$) и турбулентно ($Re > 4.000$, такође важи за цеви кружног попречног пресека).

Re представља бездимензионални Reynolds-ов број [1] [2] [7]:

$$Re = \frac{w d_h}{\nu} \quad (16)$$

Овај број узима у обзир: брзину струјања w [m/s], геометријску карактеристику проточног пресека (хидраулички пречник) d_e [m] и кинематску вискозност флуида ν [m²/s] који учествује у размени топлоте. За цеви кружног пресека $d_e = 4A/O$, где је A [m²] површина проточног пресека, а O [m] оквашени обим истог.

2.3.3 Prandtl-ов број

Утицај врсте флуида на h [W/m²K] може се приказати следећом формулом (Prandtl-ов број) [1] [2] [7]:

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{\nu}{a} \quad (17)$$

У изразу (17) μ [Pa·s] је динамичка вискозност, c_n [J/kgK] специфична топлота при константном притиску, λ [W/mK] коефицијент провођења топлоте, док је a [m²/s] температурска проводљивост.

2.3.4 Grashoff-ов број

Утицај силе узгона услед температурске разлике на h може се приказати следећом формулом (Grashoff-ов број) [1] [2] [7]:

$$Gr = \frac{\beta \Delta T g d_h^3}{\nu^2} \quad (18)$$

У изразу (18) од непознатих величина су: β [1/K] коефицијент термичког напона и g [m/s²] убрзање Земљине теже ($g=9,81$ m/s²).

2.3.5 Nusselt-ов број

Утицај облика и стања површине и врсте флуида на h може се приказати следећом формулом (Nusselt-ов број) [1] [2] [7]:

$$Nu = \frac{h d_h}{\lambda} \quad (19)$$

Све величине које фигуришу у обрасцу (19) су већ познате.

2.3.6 Општа формула за израчунавање Nu броја

Постоји низ формула за израчунавање Nu -броја које су добијене експериментално, које имају следећи облик [1] [2] [7]:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr) \quad (20)$$

Ову функцију су до сада у многобројним експериментима одређивали разни истраживачи за различите геометријске облике и разне Re , Gr и Pr , тако да постоје изрази за Nu -број за низ чврстих површина које се срећу у техници.

Разликују се два основна случаја [1] [2] [7]:

- *Принудна* конвекција;
- *Природна* конвекција.

2.3.6.1 Принудна конвекција

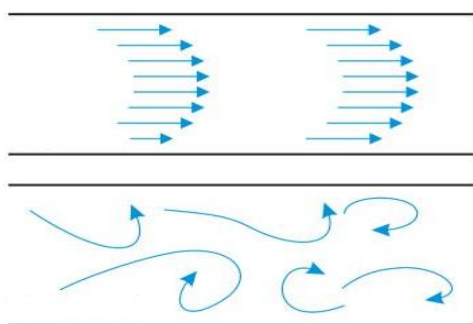
У овом случају конвекције код које се струјање флуида остварује или помоћу пумпи или вентилатора обично можемо занемарити силе узгона, тј. Gr -број. Једино у случају ламинарног струјања у правој цеви овај бездимензиони број има утицаја.

Општи израз за средњи Nu -број при принудној конвекцији може се написати на следећи начин [1] [2]:

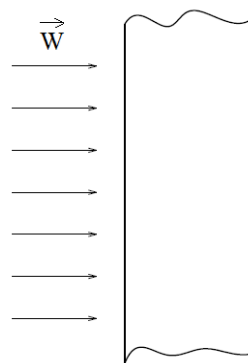
$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot Gr^r \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_z} \right)^{0.25} \quad (21)$$

где је:

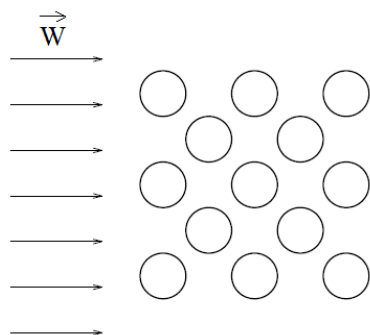
- C, n, m, r [-] - коефицијенти утврђени експериментално и узимају вредности у зависности од режима струјања (слика 6);
- Re [-] - Reynolds-ов број који описује утицај брзине струјања на коефицијент прелаза топлоте;
- Pr [-] - Prandtl-ов број који описује утицај врсте флуида на коефицијент прелаза топлоте;
- Pr_z [-] - Prandtl-ов број зида;
- Gr [-] - Grashoff-ов број који описује утицај силе узгона услед температурске разлике на коефицијент прелаза топлоте.



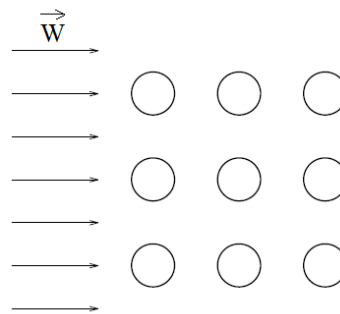
Слика 6а. Струјање у правој цеви (слика горе-ламинарно; слика доле-турбулентно)



Слика 6б. Попречно опструјавање цеви



Слика 6в. Наструјавање цеви у шаховском распореду



Слика 6г. Наструјавање цеви у координатном распореду

Слика 6. Најчешћи режими струјања

2.3.6.2 Природна конвекција

У случају природне конвекције, тј. када струјање настаје само услед разлика у густинама, брзине су тако мале да се силе трења могу занемарити.

У том случају опада зависност Re -броја, тако да је $Nu=f(Gr, Pr)$. Тада образац преко кога се рачуна Nu -број гласи [1] [2]:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_z}\right)^{0.25} \quad (22)$$

2.4 Зрачење топлоте

Сва тела са својих површина зраче топлоту на друге површине помоћу електромагнетних таласа чија се таласна дужина креће од 0,1 до 1000 μm . Свако зрачење топлоте имаће одговарајући интензитет и спектрални распоред који веома много зависи од температуре објекта са којег се зрачи и природе његове површине. На пример, уколико је температура површине једнака температури на површини Сунца од 5.800 К највише енергије се емитује на таласним дужинама од око 0,3 μm . Међутим, када су површине на просечним температурама око 293 К, емитовање топлоте зрачењем дешава се на таласним дужинама од око 10 μm . Ова карактеристика зрачења топлоте доводи до глобалног отопљавања (или ефекта стаклене баште) на нашој планети те и забринутости за нашу судбину. Сматра се да је глобално отопљавање резултат увећане количине угљен-ди-оксида у атмосфери. Овај гас пропушта зрачење топлоте са сунца које је са краћим таласним дужинама, али је непропустан за зрачење топлоте емитовани са земље на већим таласним дужинама. На тај начин топлота се задржава на планети и долази до постепеног загревања атмосфере као што је то случај у „стакленој башти“ [1].

Чврста тела и течности емитују топлоту пуним спектром, тј. у таласним дужинама од ултравиолетних (када је таласна дужина зрачења реда величине близу 0,8 μm) до инфрацрвених (таласна дужина реда величине близу 400 μm). Гасови емитују и апсорбују енергију само одређених таласних интервала – селективно зрачење. Уопштено, може се рећи да ваздух потпуно пропушта зрачење.

Количина топлоте која се преноси зрачењем зависи од: температуре површина између којих се одвија размена топлоте, величине површина и степена црноће површине (сивоћа површине), док не зависи од: размака површина, а понекад и од флуида између њих и температуре флуида између њих.

2.4.1 Сјај површине

Укупна енергија коју зрачи квадратин метар неке површине у јединици времена назива се сјајем површине ϕ_s . У њој може бити садржано [1] [2]:

- Зрачење које је настало у самом телу, тзв. *емитовано зрачење*;
- Зрачење које је настало у другом телу, дозрачено је на посматрано тело па се са његове површине одбија, тзв. *рефлектовано зрачење*;

- Зрачење дозрачено са другог тела и пролази кроз посматрано тело, тзв. *пролазно зрачење*.

2.4.2 Рефлексија, апсорпција и дијатермија

Енергија снопа зрака Q [W] која наиђе на друго тело (слика 7) делом се одбије (рефлектује) од површине Q_r [W], делом апсорбује Q_a [W] и делом пролази кроз тело Q_d [W].

Тада је енергија снопа зрака Q [W] једнака [1]:

$$Q = Q_r + Q_a + Q_d \quad (23)$$

Када се цео израз подели са Q [W] добија се следеће [1] [2]:

$$\frac{Q}{Q} = \frac{Q_r}{Q} + \frac{Q_a}{Q} + \frac{Q_d}{Q} \quad (24)$$

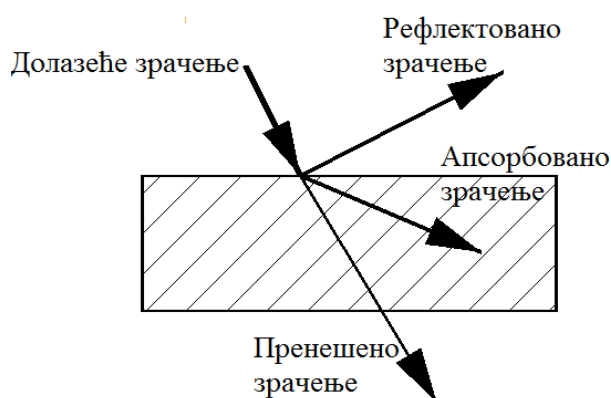
$$1 = r + a + d$$

где је:

$$\frac{Q_r}{Q} = r \quad [-] \text{ - коефицијент рефлексије;}$$

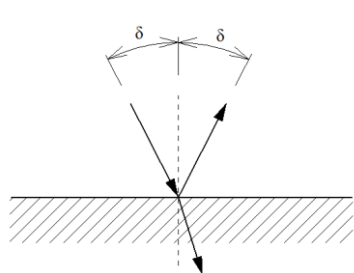
$$\frac{Q_a}{Q} = a \quad [-] \text{ - коефицијент апсорпције;}$$

$$\frac{Q_d}{Q} = d \quad [-] \text{ - коефицијент дијатермије.}$$

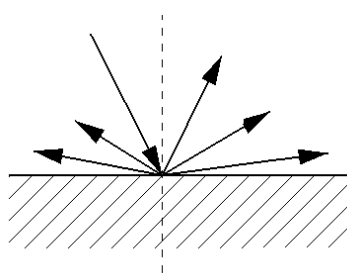


Слика 7. Енергија снопа зрака која наилази на неко тело [1]

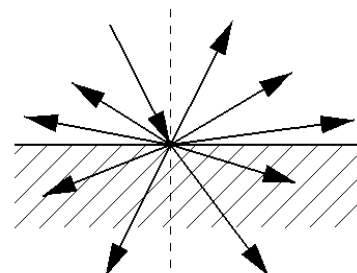
Вредности ових коефицијената зависе од природних особина тела. Осим тога, тела на различите начине реагују у односу на количину енергије зрачења и њихове таласне дужине. Тако нпр. чврста тела већ са неколико μm дебљине апсорбују све топлотне зраке. Течности могу бити пролазне за светлосне зраке, али су увек непролазне за топлотно зрачење. Бели папир добро рефлектује светлосне зраке али апсорбује инфрацрвене. Прозорско стакло је пролазно за светлост, али непролазно за топлотне, инфрацрвене и ултравиолетне зраке. Зависно од вредности појединих коефицијената јављају се и основне особине површина (слика 8).



Слика 8а.



Слика 8б.



Слика 8в

Слика 8. Енергија снопа зрака која наилази на неко тело [1]

Код глатких површина (слика 8а) настаје делимична апсорпција и рефлексија, па је $r+a=1$. Бела површина (слика 8б) углавном рефлектује зраке, али са расипањем. Храпаве површине (слика 8в) апсорбују и рефлектују, али са расипањем.

2.5 Пролаз топлоте

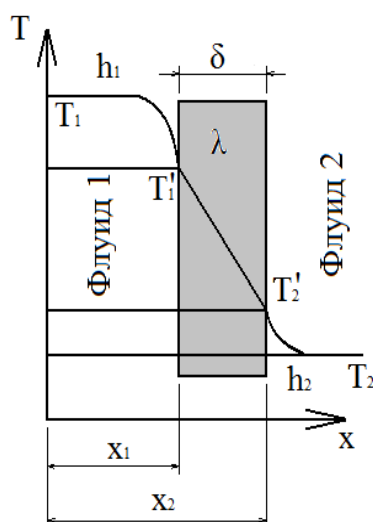
Када топлота Q прелази са неког флуида кроз неки чврсти зид (преграду) на неки други флуид, тада се ради о пролазу топлоте. У том случају се истовремено јављају сви начини простирања топлоте, тј. и кондукција, и конвекција, и зрачење.

У стационарном стању за пролаз топлоте са једног флуида кроз једнослојан зид на други флуид (слика 9) могу се поставити следеће три једнакости [1] [2] [7]:

$$Q = h_1(T_1 - T_1')A\tau \quad (25)$$

$$Q = \frac{\lambda}{\delta}(T_1' - T_2')A\tau \quad (26)$$

$$Q = h_2(T_2' - T_2)A\tau \quad (27)$$



Слика 9. Пролаз топлоте кроз једнослојан, раван зид [1] [2]

Овде су T_1 [K] температура флуида 1, T_1' [K] температура површине зида која је у контакту са флуидом 1, T_2' [K] температура површине зида која је у контакту са флуидом 2, а T_2 [K] температура флуида 2.

Једначина (25) узима у обзир количину топлоте Q [J] која са флуида 1 пређе на зид конвекцијом (и евентуално зрачењем), једначина (26) узима у обзир количину топлоте Q [J] која се проведе кроз зид кондукцијом, а једначина (27) количину топлоте Q [J] која пређе са зида на флуид 2 поново конвекцијом (и евентуално зрачењем.). Површина зида је A [m²], τ [s] је време за које се одвија размена између флуида 1 и флуида 2 преко зида, h_1 [W/m²K] је коефицијент прелаза топлоте са флуида 1 на зид, h_2 [W/m²K] је коефицијент прелаза топлоте са зида на флуид 2, δ [m] је дебљина зида, а λ [W/mK] коефицијент провођења топлоте кроз зид.

Када се из предходних једначина (25, 26, 27) елиминишу температуре површина зидова T_1 и T_2 , добија се [1] [2] [7]:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} (T_1 - T_2) A \tau = K (T_1 - T_2) A \tau \quad (28)$$

У једначини (28) са K [W/m²K] је означен коефицијент пролаза топлоте.

Топлотна отпорност пролазу топлоте је R [K/W] и дефинише се на следећи начин [1] [2] [7]:

$$R = \frac{1}{A} \left(\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \right) = \frac{1}{AK} \quad (29)$$

За случај вишеслојног, равног зида коефицијент пролаза топлоте дефинише се на следећи начин [1] [2] [7]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta}{\lambda_i} + \frac{1}{h_2}} \quad (30)$$

Где је n број зидова (слојева).

3. Размењивачи топлоте

Размењивачи топлоте су термички уређаји (апарати) у којима долази до размене топлоте између, најчешће два, или ређе више, флуида са циљем да се жељени флуид охлади или загреје до одређених параметара [8].

Када је циљ грејање, флуид помоћу кога се врши загревање, назива се грејни, а флуид који се загрева, назива се грејани. Када је циљ хлађење, тада се флуид помоћу којег се врши хлађење назива расхладни, а флуид који се хлади хлађени [2].

Класификација размењивача топлоте према основним критеријумима, дата је у следећој табели (табела 3).

Табела 3. Подела размењивача топлоте према разним критеријумима [8] [9] [10]

Према начину размене топлоте у размењивачу			
Размењивачи топлоте са непосредним контактом флуида		Размењивачи топлоте са посредним контактом флуида	
Према начину протицања флуида кроз размењивач			
Истосмерни	Супротносмерни	Унакрсни	Комбиновани
Према врсти флуида између којих се одвија размена топлоте			
Гас-гас		Течност-течност	
		Гас-течност	

3.1 Расхладни торњеви

Најбољи пример размењивача топлоте са непосредним контактом флуида између којих се одвија размена топлоте је расхладни торањ (кула).

Постоје две основне врсте расхладних торњева [2] [3] [4]:

- Расхладне куле у којима део воде испарава („*влажни*”);
- Расхладне куле у којима део воде не испарава („*суви*”).

Постоје и комбинације ова два типа расхладних торњева, као и комбинације расхладних торњева и водених површина које служе за хлађење.

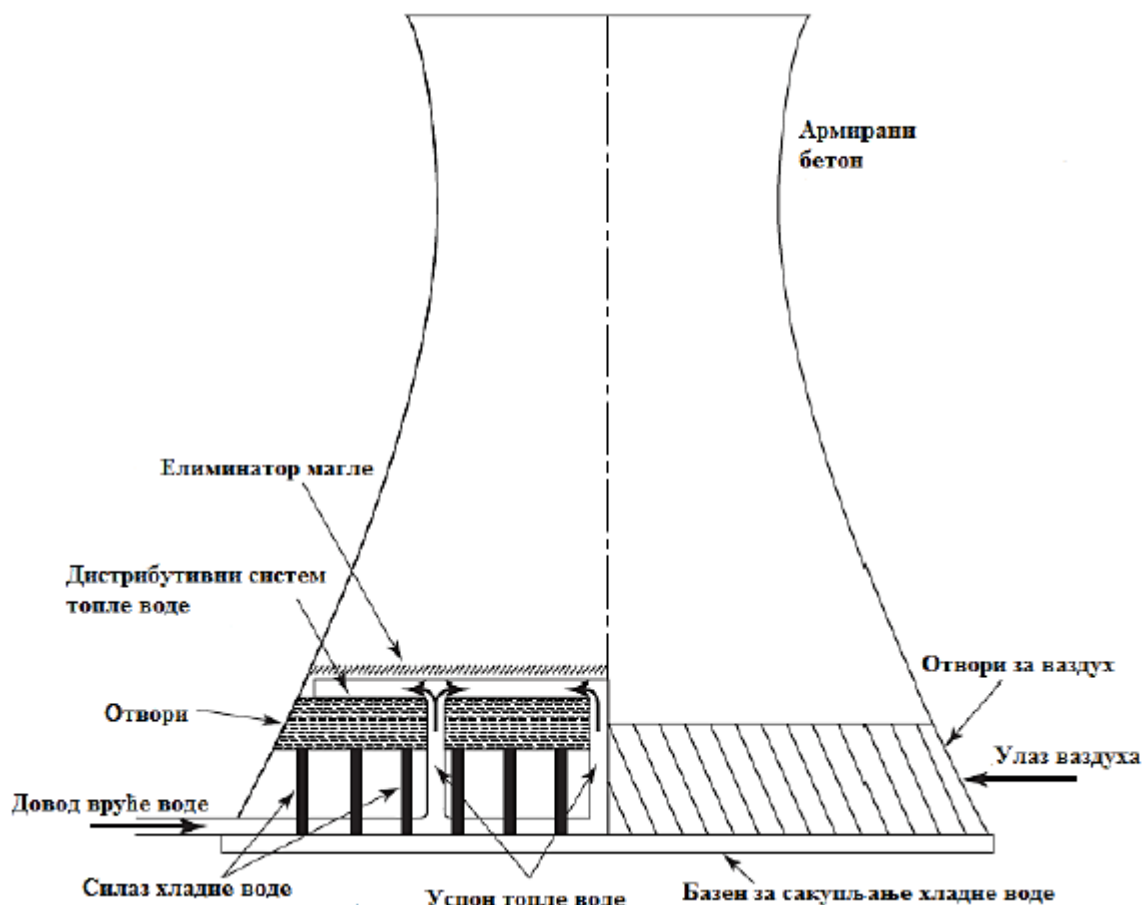
3.1.1 „Влажне“ расхладне куле

У расхладним торњевима овог типа врућ кондензат или вода за хлађење се хлади преносом топлоте у атмосферу и испаравањем самог дела циркулационе воде, чиме се апсорбује из ваздуха и воде латентна топлота испаравања. Расхладни торањ је обично карактеристичног облика изграђен у близини фосилних или нуклеарних електрана. Овакав тип расхладног торња приказан је на слици 10.

Топла вода из кондензатора се прска преко густо поређаних и преплетених цеви. Ваздух се увлачи кроз отворе на дну торња природним путем, а топлота се преноси са воде за хлађење директно на ваздух и додатно се хлади њеним испаравањем. Хладна вода улази, услед гравитације, у базен у коме се сакупља сва вода, и из кога рециркулише назад у кондензатор. Елиминатор магле се налази изнад цеви које формирају решеткаст облик. Обично се облак магле формира изнад куле, посебно по хладном времену. Овај бели облак се често сматра загађивачем, али чињеница је да се он састоји од капљица воде или леда.

3.1.2 „Суве“ расхладне куле

У „сувим“ расхладним торњевима рецикулациона вода протиче кроз ребрасте цеви изнад којих се налази хладан ваздух. У сувим расхладним торњевима сва топлота се преноси у атмосферу. Предности овако конструисаног торња су да вода не испарава и да су јефтинији за одржавање. У недостатке убрајамо скупљу изградњу, као и то да је притисак на турбинама већи што потпомаже смањењу степена искоришћења система.



Слика 10. „Влажна“ расхладна кула [4]

3.2 Размењивачи топлоте са посредним контактом флуида

Размењивачи топлоте са посредним контактом флуида (табела 3) могу се поделити на [2] [3] [4] [5]:

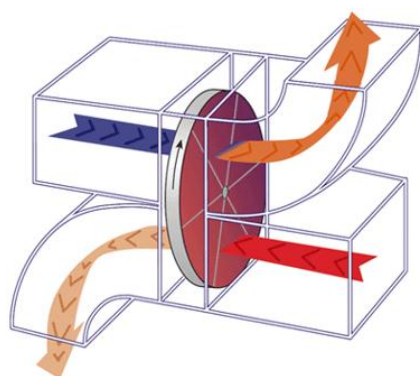
- Размењиваче са флуидизованим слојем;
- Регенераторе;
- Рекуператоре.

За размењиваче топлоте са флуидизованим слојем је карактеристично то што флуиде, који струје одвојено и истовремено, одваја уситњена маса чврстог материјала која ствара флуидизовану средину и повећава специфичну површину за размену топлоте.

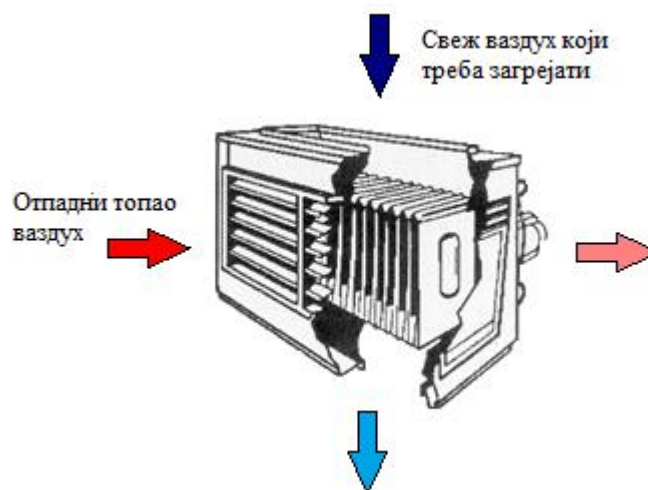
Код регенератора флуиди су одвојени али они не струје истовремено кроз уређај. Флуиди се наизменично пропуштају кроз масу размењивача који акумулира топлотну енергију и у следећем кораку је предаје другом флуиду.

Основи типови регенератора су [2] [8] [10]:

- Регенератори са *покретним* елементима (слика 11а);
- Регенератори са *непокретним* елементима (слика 11б).



Слика 11а. Ротациони диск [11]



Слика 11б. Пасивни регенератори [12]

Слика 11. Типови регенератора

Рекуператори су они размењивачи топлоте код којих флуиди између којих се одвија размена топлоте, размењују топлоту преко површине која их одваја али они струје истовремено кроз дати размењивач.

У рекуператоре спадају [2] [8] [10]:

- *Ваздушни рекуператори* (слика 12);
- *Размењивачи топлоте цев и омотач* (слика 13);
- *Плочасте размењивачи топлоте* (слика 14);
- *Размењивачи топлоте са мешалицом* (слика 15);
- *Размењивачи топлоте за специјалне намене.*

Код ваздушних рекуператора, ваздух је један од флуида који учествује у размени. Како ваздух поседује лоше физичке карактеристике са аспекта размене топлоте (мала густина, ниска топлотна проводљивост, мала специфична топлота) када је ваздух један од флуида у размењивачу топлоте, прибегава се оребрењима цеви уз коришћење вентилатора. Обично су цеви бакарне, а ребра алуминијумска (ређе бакарна) са размаком између њих 2-5 mm.

Типови ваздушних рекуператора су [2] [5] [8] [10]:

- *Ваздушни кондензатори* (када се ваздух користи за кондензацију расхладног флуида);
- *Хладњаци са течношћу* (када се ваздух хлади коришћењем расхладне течности без промене фазе);
- *Хладњаци испаривачи* (када се ваздух користи за испаравање радног флуида).

Размењивачи топлоте цев и омотач, могу се поделити на [2] [5] [8] [10]:

- *Сноп цеви у омотачу* (када се сноп цеви смешта у већу цев, притом размењујући топлоту између флуида који струји кроз сноп цеви и флуида који струји око цеви);
- *Цев у цев* (када се цев мањег пречника стави у цев већег пречника).



Слика 12. Кондензатор са вентилатором [13]



Слика 13. Сноп „У“ цеви у омотачу [14]



Слика 14. Плочасти размењивач топлоте [14]



Слика 15. Размењивач топлоте са мешалицом [14]

Размењивачи типа цев и омотач спадају у најстарије типове размењивача. Одликује их једноставна израда и конструкција и имају широку област примене. Посебно је код ових размењивача занимљив облик унутрашње цеви (праве или „У“ цеви) и начин кретања флуида кроз унутрашњу цев, или сноп цеви (једним или више пролаза).

Размењивачи топлоте са мешалицом највише се примењују у прехранбеној индустрији када се ради са веома вискозним флуидима (чоколада, маргарин итд.). Они су по конструкцији слични типу цев и омотач, само што се у унутрашњу цев ставља мешалица која мешањем треба да омогући бољу размену топлоте и лакше струјање флуида (производа).

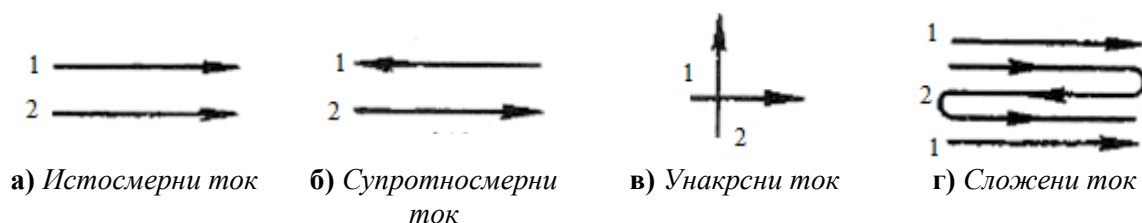
Размењивачи топлоте за специјалне намене изискују специјане конструкције размењивача топлоте у погледу материјала, коефицијента пролаза топлоте, простора који попуњавају, хигијенских карактеристика, безбедности, сигурности итд. Представљају комбинацију предходно наведених типова и имају веома широку област примене.

3.3 Струјање флуида унутар размењивача топлоте

Основна улога размењивача топлоте је да размени топлотну енергију између флуида са циљем да се жељени флуид загреје или охлади.

Како би се дати ефекат постигао, приликом конструкције размењивача води се и о смеру струјања флуида јер он и те како утиче на количину топлоте која се размењује између флуида.

На следећој слици (слика 16) приказани су начини струјања флуида унутар размењивача топлоте.



Слика 16. Начини струјања флуида кроз размењивач топлоте [9]

4. Плочасти размењивачи топлоте

Плочасти размењивачи топлоте (слика 14) су са аспекта размене количине топлоте и активне површине размене најефикаснија врста рекуперативних размењивача топлоте. Имају веома широку област примене. Њихова главна карактеристика је да флуид струјећи у уском простору између две специјално профилисане плоче, већ на ниским Re бројевима ($Re=400-800$ [10]) успоставља турбулентан режим струјања, а тиме се постижу високи коефицијенти прелаза (самим тим и пролаза) топлоте.

Својом конструкцијом, плочасти размењивачи топлоте поседују низ предности у односу на друге рекуперативне размењиваче (нпр. типа „цев у цев“) које се огледају у следећем [15]:

- Висок термички степен корисности $\eta_{raz}[\%] = \frac{dobi\ jeno}{ulo\ zeno} = \frac{Q_{sekundar}[W]}{Q_{primar}[W]}$ (и до 97%);
- Мањи габарити (али не увек);
- Блиска температура приближења (може бити остварена температурна разлика између примарног и секундарног флуида и до 1°C);
- Минимално запрљање (због постизања турбулентног режима струјања флуида који струје кроз масу размењивача, плоча осигурава низак фактор запрљања у односу на друге размењиваче);
- Могућност чишћења (како је струјним режимом обезбеђено минимално запрљање, самим тим се мање пажње поклања чишћењу плочастих размењивача чиме се штеди у новцу и времену);
- Лак приступ (због конструкције самог плочастиг размењивача монтажа и демонтажа су знатно олакшани, тако да се поред чишћења плоча могу и веома лако и једноставно извршити њихова замена);
- Цена је нижа (али не и увек);
- Огромна област примене.

4.1 Историјат плочастих размењивача топлоте

Историјат плочастих размењивача топлоте почиње почетком 20. века када су ови размењивачи почели да се употребљавају најпре у индустрији млека за процес пастеризације (кување, тј. грејање млека на одређеној температури одређени временски период како би се уклониле штетне бактерије из млека чиме се производу продужује

рок трајања). Након тога долази до значајне примене ових уређаја и у другим областима прехранбене индустрије (сокова, воћа...) али и у: хемијској, петрохемијској, машинској, текстилној, фармацеутској, као и у градњи термотехничких и нуклеарних постројења.

Шездесетих година 20. века плочасти размењивачи топлоте почињу да се примењују и у производњи потрошне топле воде, а недуго затим и за грејање воде у инсталацијама грејања стамбених објеката (слика 17).



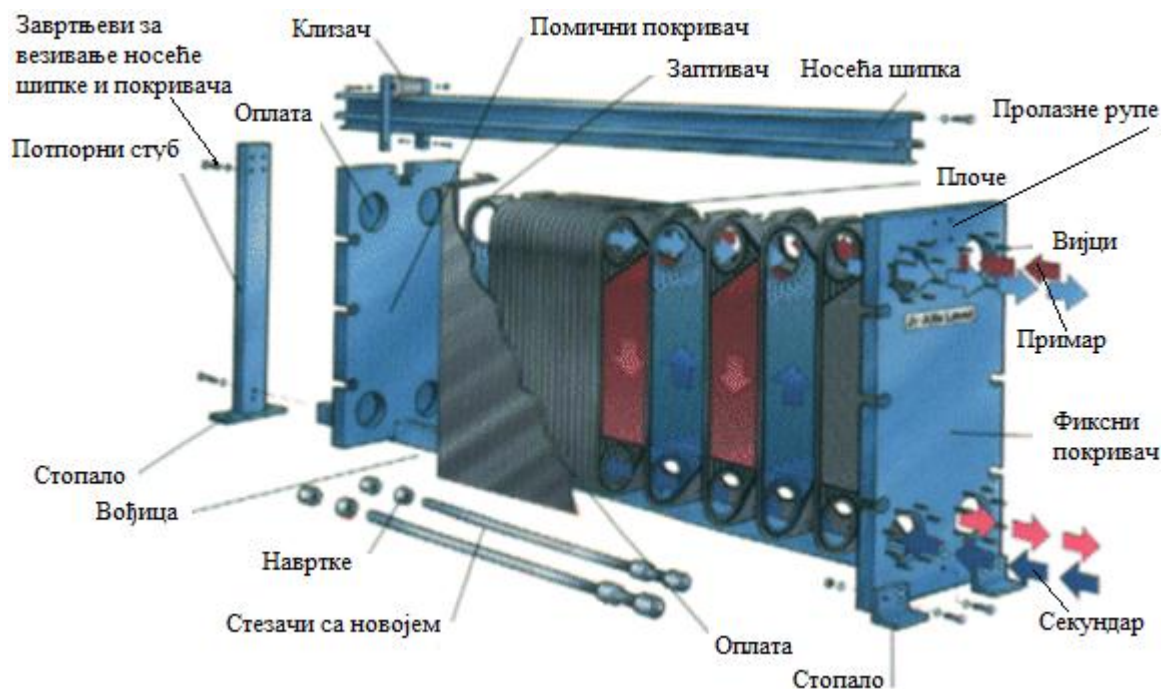
Слика 17. Плочасти размењивач топлоте у инсталацијама грејања објекта [15]

У протекле три деценије у развијеним земљама света омасовљена је примена плочастих измењивача топлоте у системима даљинског грејања и индустријским процесима. Шира примена плочастих размењивача топлоте на нашим просторима јавља се почетком деведесетих година.

4.2 Основни делови плочастих размењивача топлоте

Како плочасти рекуператори имају огромну област примене, треба задовољити све критеријуме који се захтевају од савременог плочастих размењивача: велика активна површина за размену топлоте, велики коефицијет пролаза топлоте кроз површину за размену, компактност, снага размењивача, што већи термички степен корисности, што мањи пад притиска кроз размењивач, што већи опсег радних температура, лако чишћење, одржавање, монтажа и демонтажа, притом водећи рачуна о безбедности, једноставности, радном веку, естетском изгледу и цени [10].

Узимајући све предходно у обзир, конструкција (самим тим и саставни делови) плочастих измењивача је веома разнолика. Основни делови плочастих размењивача топлоте приказани су на примеру класичног размењивача са заптивачима, што је приказано на следећој слици (слика 18).



Слика 18. Основни делови класичног плочастог измењивача топлоте са заптивачима [16]

Крајње плоче плочастог размењивача називају се покривачима. Увек је један покривач фиксиран (непомичан), а други преко клизача остварује везу са носећом шипком (која повезује крајње плоче) чиме је омогућено његово кретање, па се овај покривач назива помичним. Овиме је омогућена једноставна монтажа и демонтажа, лако чишћење и промена броја плоча плочастог размењивача, што дефинише његову снагу. Дебљина ових плоча се најчешће 18, 30, 50 mm у зависности од величине размењивача, а материјали од који се израђују су најчешће Ч 1204, Ч 0562. И фиксни и помични покривач имају стопала (ногице) којима се ослањају на површину на коју се постављају [15] [16].

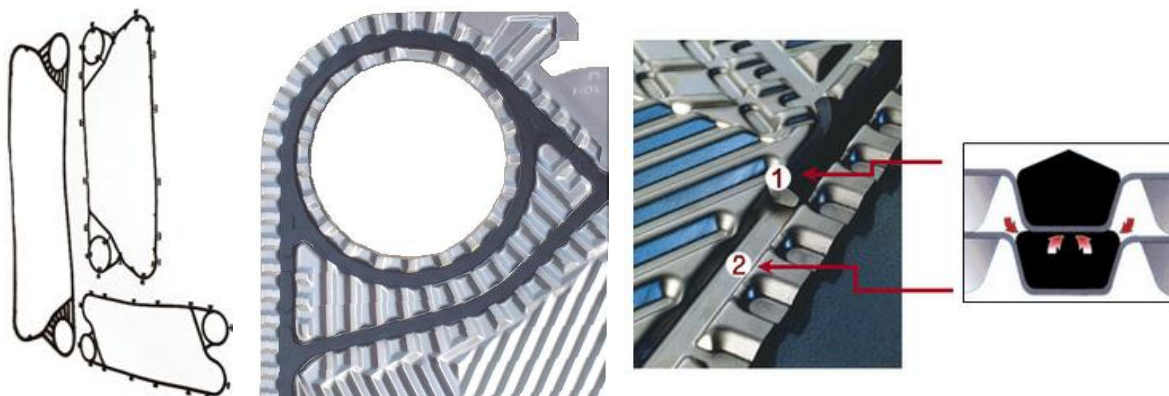
Носећа шипка такође зависи од величине размењивача, а поред тога што представља везу између крајњих плоча, она спречава и дислоцирање унутрашњих профилисаних плоча које учествују у размени топлоте како би се обезбедио правилан рад размењивача и спречавање цурења. Најчешћи материјал носеће шипке је Ч 1221 [15] [16].

Потпорни стуб даје потпору помичном прекривачу, а самим тим и читавом размењивачу, најчешће је од истог материјала као и прекривачи [15] [16].

Оплата се поставља како би се смањило одавање топлоте конвекцијом и зрачењем са површине размењивача у околину, тј. да би се спречили топлотни губици и повећао термички степен корисносни уређаја. Исто тако утиче и на естетику самог размењивача, али се не ставља увек са бочних страна (виде се активне плоче) [15] [16].

Стезачи са навојем и наврткама обезбеђују стезање пакета профилисаних плоча између крајњих плоча на унапред одређену меру стезања. Израђују се од Ч 4732 стандардних димензија M12, M22 и M24 у зависности од величине размењивача [15] [16].

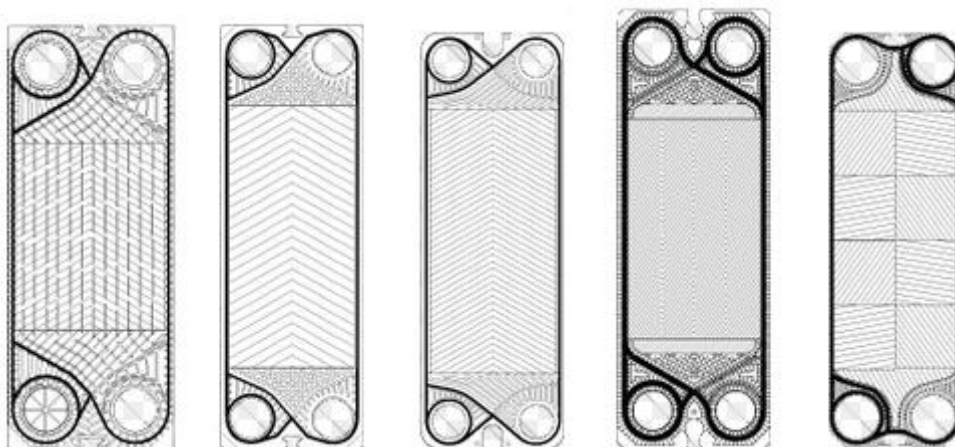
Заптивачи (слика 19) су дизајнирани да спречавају да топли и хладни флуид дођу у контакт (посебно важно ако флуиди између којих се одвија размена ни по коју цену не смеју доћи у контакт), што значи да оне дефинишу проточне канале, тј. путање кретања топлог и хладног флуида. Такође и спречавају цурење из размењивача. Њихов састав (ЕПДМ: етилен-пропилен-терполимер каучук) омогућава примену код веома агресивних флуида и при веома високим температурама [15] [16].



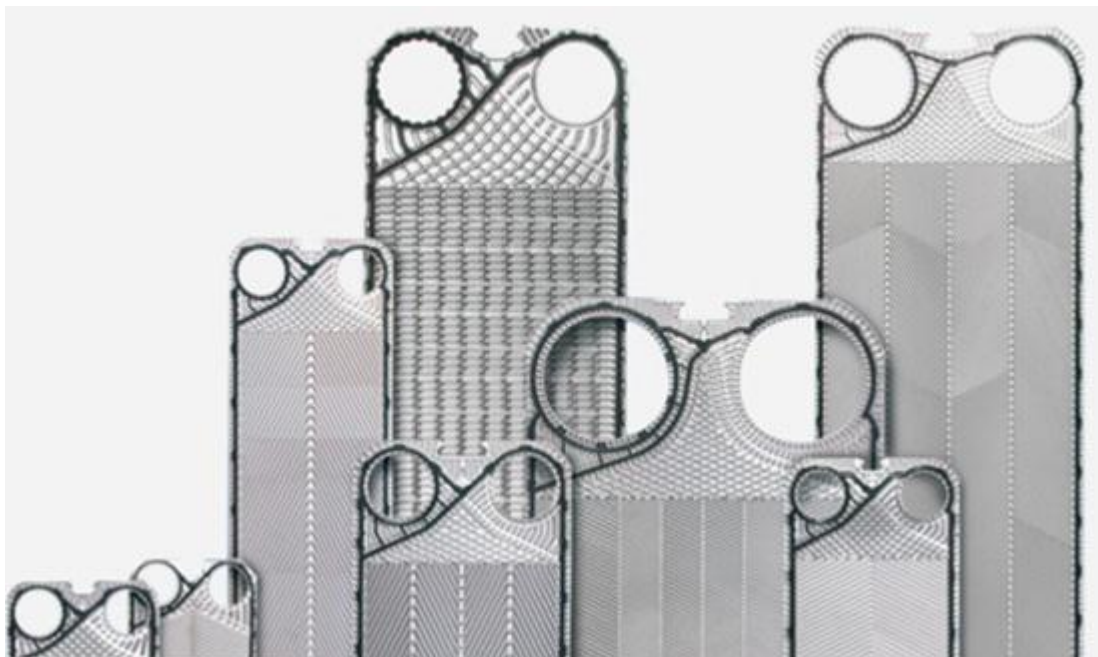
Слика 19. Разни типови заптивача код плочастих размењивача топлоте [17]

Специјално профилисане плоче израђују се технолошким поступком који се назива хладно пресовање. Материјали су високо квалитетни челични лим Ч 4580 или Ч 4573 (прохромски челици који се нарочито примењују у прехранбеној индустрији) дебљине 0.7 mm. Профилисањем плоча обезбеђује се што боље разливање како би што већа површина специјално профилисане плоче била уједно и активна површина за размену топлотне енергије, а исто тако се профилисањем повећава турбулентан режим струјања при мањим брзинама (о чему је већ било речи) флуидног тока и истовремено омогућава лакша монтажа и демонтажа као и самочишћење специјално профилисаних плоча. Пакет профилисаних плоча образује систем паралелних проточних канала [15] [16].

Специјално профилисане плоче су најчешће симетричне и асиметричне. Најразличитији облици и димензије специјално профилисаних плоча приказани су на следећој слици (слика 20).



Слика 20а.



Слика 20б.

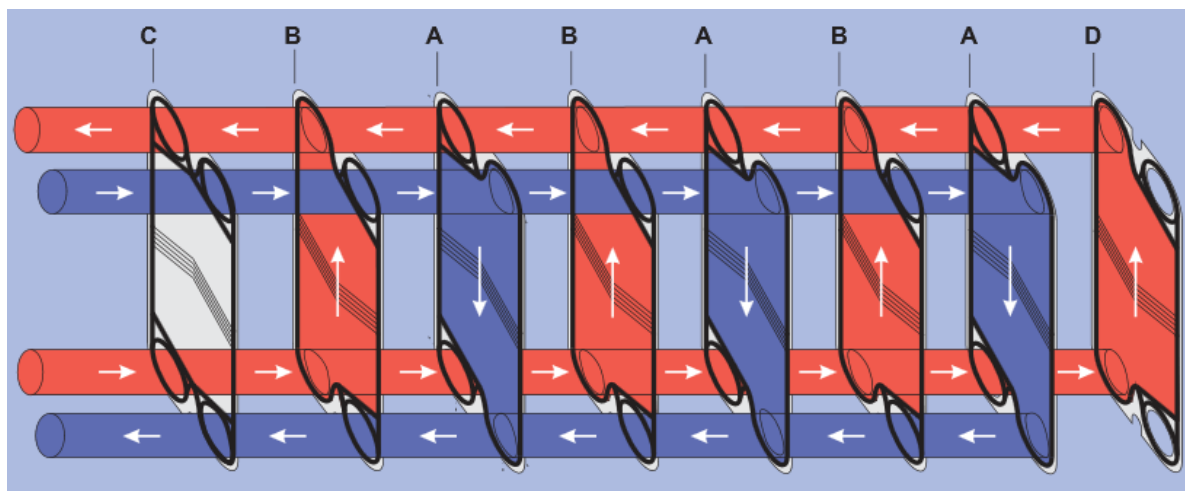
Слика 20. Разни облици и димензије специјално профилисаних плоча [17]

4.3 Принцип функционисања плочастог размењивача топлоте

Међусобна повезаност специјално профилисаних плоча (слика 20) и заптивача (слика 19) омогућава супротномерни проток флуида кроз два одвојена канала без физичког контакта.

Главни заптивач на свакој од плоча усмерава проток вертикално кроз канале између две плоче. Одвојени округли заптивачи око отвора омогућавају проток другог флуида. Улога размењивача је пренос топлоте од једног флуида ка другом, а топлота прелази веома лако кроз танке зидове који одвајају флуиде. Профилисаност плоча, осим што даје чврстоћу и крутост, повећава и степен преноса топлоте од топлијег флуида ка металном зиду и од зида ка другом флуиду.

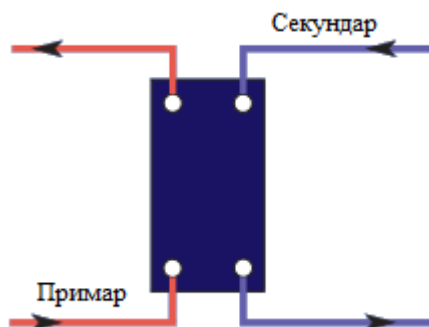
Током процеса размене топлоте (слика 21) температура примарног (топлијег) флуида се снижава, а температура секундарног (хладнијег) флуида расте. Профилисане плоче међу собом формирају минималне просторе, тзв. „проточне канале“, кроз које пролазе флуиди са примарне и секундарне стране независно један од другог, тако да секундарни флуид пролази између прве и друге активне плоче (означене са „С“ и „В“), примарни између друге и треће („В“ и „А“) итд. Прва плоча у пакету („С“) усмерава проток и истовремено, као и последња плоча у пакету („D“), онемогућава додир флуида са крајњим плочама и цурење размењивача топлоте [15].



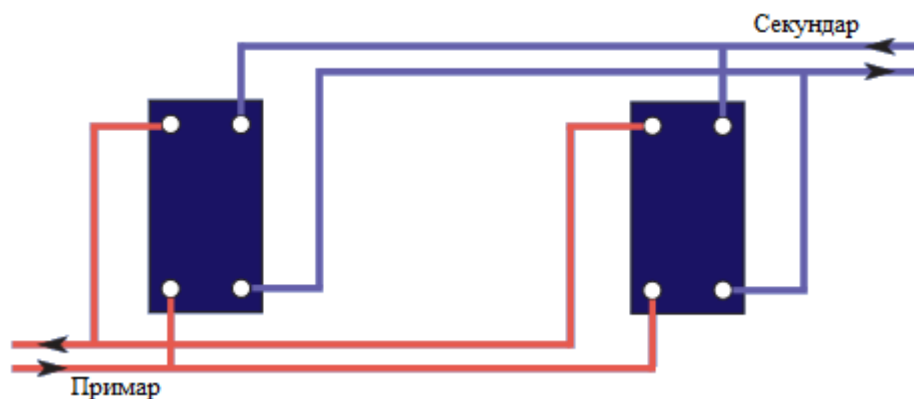
Слика 21. Принциф функционисања плочастог размењивача топлоте [15]

Класични плочасти размењивач топлоте, захваљујући високој ефикасности, задовољава потребе за захтеваним капацитетом и протоком само једним пролазом флуида.

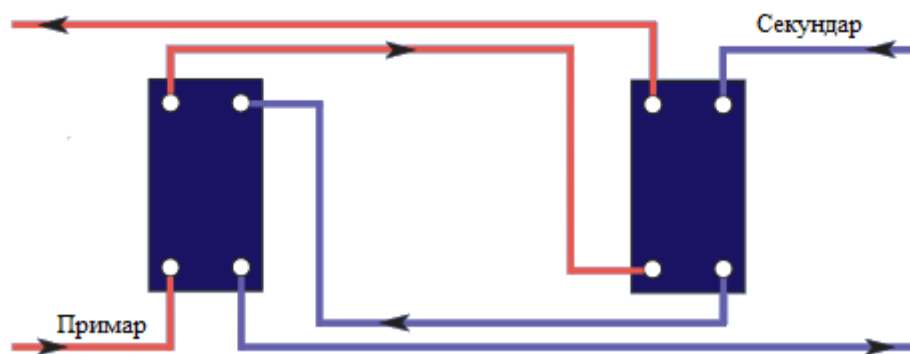
У изузетним случајевима екстремно великих капацитета или малих температурских разлика улаза и излаза примарне/секундарне стране, проблем се решава редним или паралелним повезивањем више размењивача топлоте (слика 22).



Слика 22а. Један размењивач, један пролаз [15] [16]



Слика 22б. Више размењивача, један пролаз – паралелно повезивање [15] [16]



Слика 22в. Више разменјивача, један пролаз – редно повезивање [15] [16]

4.4 Подела плочастих измењивача топлоте

Плочасти разменјивачи топлоте могу се класификовати према начину спајања специјално профилисаних плоча (табела 4).

Табела 4. Подела плочастих разменјивача топлоте [10] [15] [17]

4.4.1 Класични са заптивачима		
Класични широке примене (слика 18)	Испаривачи и кондензатори (слика 23)	Са дуплим зидом
Са графитним плочама	Високих хигијенских захтева	Широког проточног пресека
4.4.2 Лемљени		
4.4.3 Потпуно заварени		
Потпуно заварени класични плочасти		Компактни (слика 24)
Спирални (слика 25)		Плочасто-добошасти (слика 26)
4.4.4 Полузаварени		

4.4.1 Класични са заптивачима

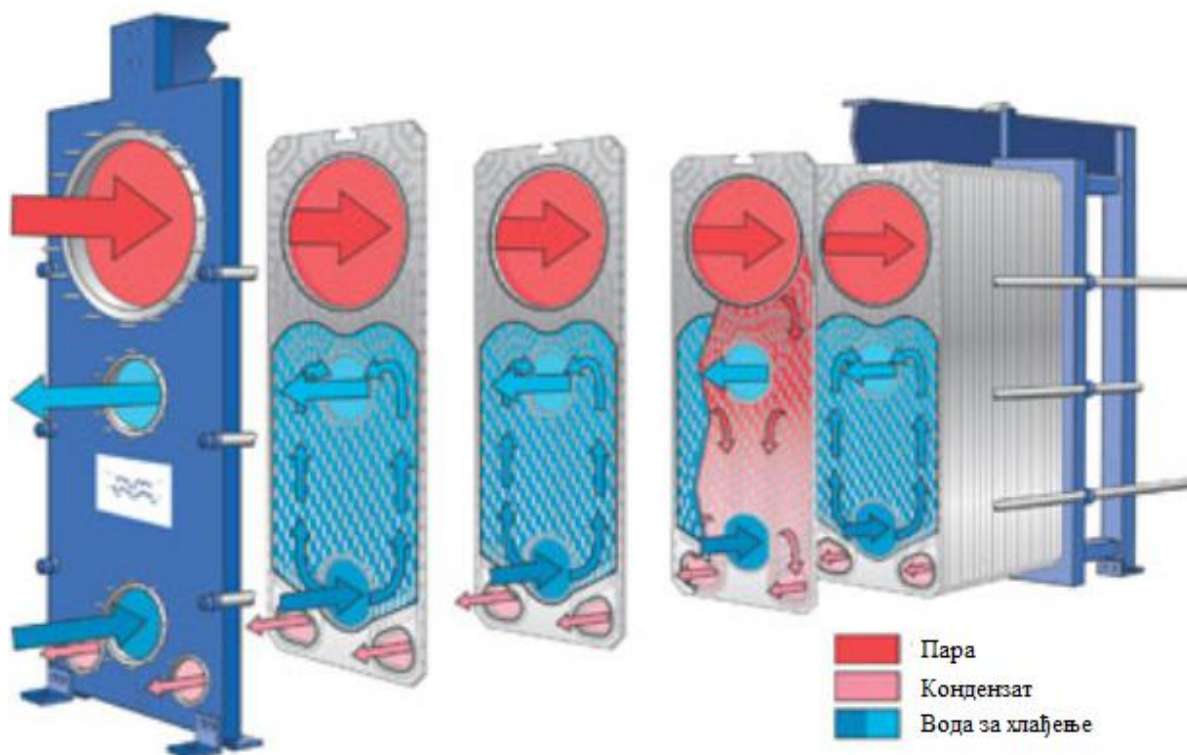
Класични широке примене имају широко радно подручје. Због веома уских проточних пресека (3-5 mm) захтевају рад са чистим флуидима.

Конструкција плочастих разменјивача топлоте се успешно примењује и када се потребно одвођење или довођење латентне топлоте, што је случај код испаривача и кондензатора (увек већи проточни процеси гасовите фазе због веће специфичне запремине).

Плочасти разменјивачи топлоте са дуплим зидом примењују се тамо где треба потпуно искључити и најмању могућност мешања два радна флуида (рецимо стварање експлозивне смеше).

Плочасти разменјивачи топлоте са графитним плочама примењују се у области екстремно високих температура.

У случају када су хигијенски захтеви приоритетни, веома велика важност се поклања материјалима израде. Тада су плочасти размењивачи топлоте израђени од високо-отпорних и квалитетних материјала (метала).



Слика 23. Плочасти измењивач топлоте – кондензатор [10]

Плочасти измењивачи топлоте се примењују и за рад са запрљаним и вискозним флуидима. Тада проточни канали морају бити широки како би било омогућено кретање флуида.

4.4.2 Лемљени

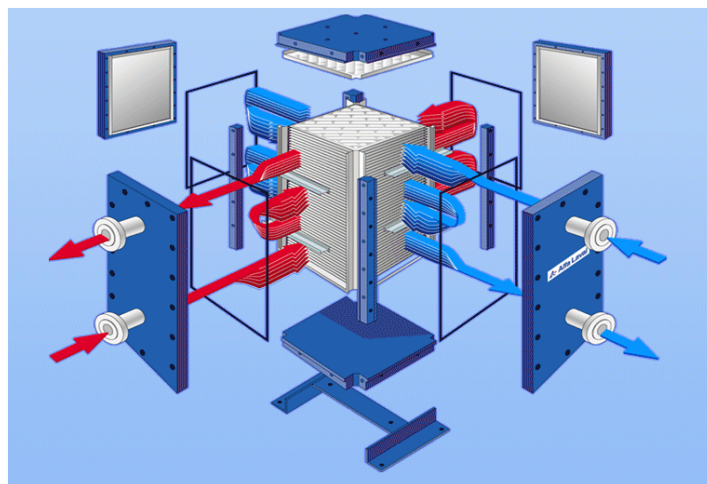
Уколико се не примењују заптивачи, крајеви плоча се могу спајати лемљењем (бакром). Захтев за чистим радним флуидима.

4.4.3 Потпуно заварени

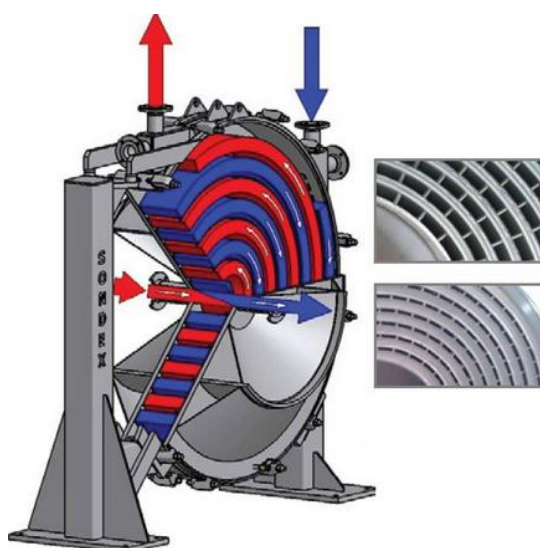
Плоче се могу међусобно заваривати, при чему се постижу компактне целине. Корите се за агресивне, чисте флуиде на високим радним притисцима.

Када су веома битне габаритне мере (слика 24), тада се велика пажња поклања компактности самог размењивача. Код плочастих размењивача топлоте, то се постиже разноразним комбинацијама кретања радних флуида између којих се одвија размена.

Код спиралних плочастих размењивача топлоте (слика 25), плоче се савијају у виду спирале. Коришћењем центрифугалне силе у флуидима постиже се ефекат самочишћења. За запрљане, вискозне флуиде.

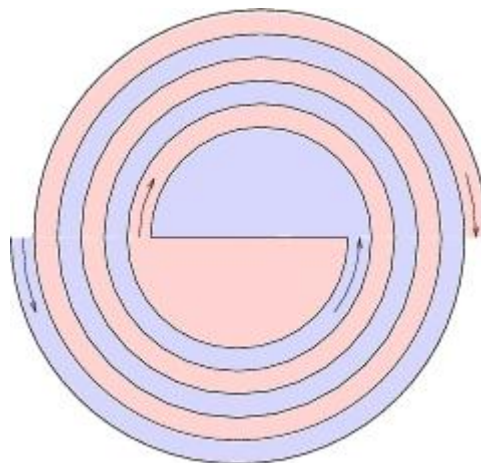


Слика 24. Компактни плочасти размењивач топлоте [10]



Слика 25а.

Слика 25. Компактни плочасти размењивач топлоте [10]



Слика 25б.

Примена добошасто-плочастог размењивача топлоте је веома широка: могу се користити у прехранбеној и нафтној индустрији, као кондезатори и испаривачи, у системима даљинског грејања, у срединама са деликатним сусптанцама попут сумпорне киселине и амонијака. Предности ових измењивача су што подносе велике радне притиске, као и температуре од $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, лако се чисте, а век трајања је продужен у односу на класичне.



Слика 26. Плочно-добошаста размењивач топлоте [18]

4.4.4 Полузаварени

Касетне плоче су направљене од полузаварених плоча. Касетна плоча представља две плоче заједно заварене ласерским заваривањем.

Предност ове конструкције је у томе што су на једној страни заварени канали а на другој страни стандардни канали са заптивком што омогућује лакшу монтажу, спајање и чишћење. На завареној страни су два специјално произведена угаона отвора са заптивком која омогућавају лако састављање касете. На тај начин, је заптивка сведена на минимум са заварене стране.

4.5 Употреба плочастих размењивача топлоте

Плочасти размењивачи топлоте су својом конструкцијом и техничким карактеристикама обезбедили и на почетку 21. века незаменљиву улогу у склопу уређаја и постројења за даљинско грејање стамбених објеката и стамбених насеља, припрему потрошне топле воде, експлоатацију геотермалне и соларне енергије, климатизацију ваздуха (кондензатори, испаривачи, топлотне пумпе, плочасти рекуператори), пастеризацију млека, сокова, пива, прехранбених раствора, у расхладној техници код хлађења рафинисаног, индустријског и термалног уља, воде, у склопу базенске технике и подног грејања, код термоенергетских постројења (слика 29) итд [10] [15] [17].

Плочасти рекуператори (слика 27) су размењивачи топлоте који се користе у системима климатизације и вентилације када се топлота отпадног ваздуха користи за предгревање свежег ваздуха. Спадају у групу унакрсних размењивача, а уградњом ових уређаја постиже се економичност рада читавог система (уштеда енергије за загревање ваздуха).



Слика 27. Плочасти рекуператор у клима комори [19]

Пастеризација у мекарству је хемијски поступак којим се спречава ширење бактерија и микроорганизама у млеку, чиме се производу продужује време трајања. Машине у којима се одвија процес пастеризације су пастеризатори.

Пастеризатор (слика 28) је плочасти размењивач топлоте састављен од специјално профилисаних плоча (пастер плоча) које су груписане обично у три секције. Преко друге секције врши се пријем млека. Идући од друге секције ка трећој, млеко се полако загрева, да би се у трећој секцији „кувало“ на температури погодној за убијање микроорганизама и бактерија. За процес „кувања“ у трећој секцији користи се грејни флуид (врела вода), а сам процес одвија се на високим температурама у тачно одређеном временском периоду. Након убијања микроорганизама на тачно дефинисаној температури у дефинисаном временском периоду, потребно је млеко охладити. Хлађење се одвија његовим поновним проласком, најпре кроз другу секцију, а потом кроз прву секцију. Како се топлота у другој секцији размењује између млека које иде на „кување“ у трећој секцији и млека која напушта трећу секцију, ова секција се назива и рекуператорска секција (рекуперација). Након проласка кроз рекуператорску секцију, млеко одлази у прву секцију где се додатно хлади коришћењем хладне (ледене) воде. Након проласка кроз прву секцију, млеко напушта пастеризатор са одређеном температуром, након чега одлази на даљу обраду [20].

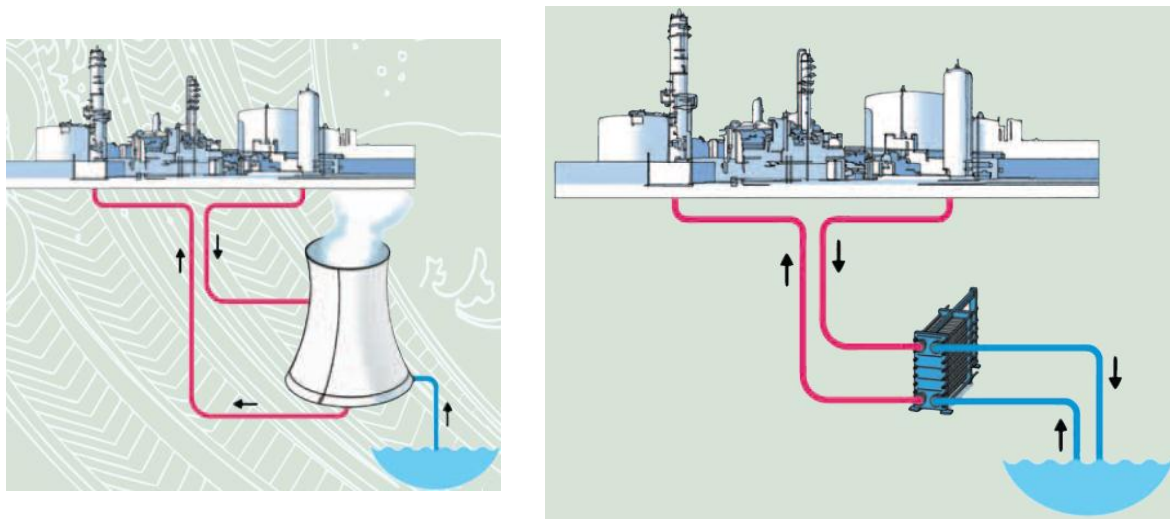


Слика 28. Блок дијаграм пастеризатора [20]

Битно је напоменути да се као грејни флуид у прехранбеној индустрији (па и у индустрији млека) најчешће користи пара одређених параметара. Пара као грејни флуид не сме да се користи директно за „кување“ млека у трећој секцији јер би променила физичко-хемијске особине млека. Зато се у процесу пастеризације користи још један размењивач топлоте (такође плочасти) у коме се размењује топлота између

паре из котла и воде, тј. врела вода која се потом користи за процес пастеризације (слика 28).

Плочасти размењивачи топлоте такође налазе примену и у термоелектранама, за хлађење воде из кондензатора, где замењују расхладне куле (слика 29).



Слика 29. Плочасти размењивач топлоте у улози расхладне куле [21]

5. Прорачун плочастог размењивача топлоте

Укупно размењена количина топлоте у плочастом размењивачу топлоте (под условом занемарених губитака) се може приказати као [10]:

$$Q = m_1 \cdot c_1 \cdot (T_{1u} - T_{1i}) \quad (31)$$

$$Q = m_2 \cdot c_2 \cdot (T_{2i} - T_{2u}) \quad (32)$$

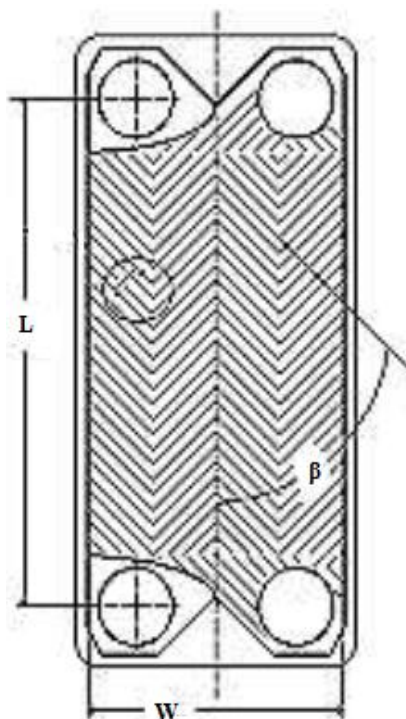
$$Q = A \cdot K \cdot \Delta T_m \quad (33)$$

У обрасцима (31, 32, 33) Q [W] је укупно размењена количина топлоте, m_1 [kg/s] масени проток топлијег флуида, m_2 [kg/s] масени проток хладнијег флуида, c_1 [J/kgK] специфична топлота топлијег флуида, c_2 [J/kgK] специфична топлота хладнијег флуида, T_{1u} [K] улазна температура топлијег флуида, T_{1i} [K] излазна температура топлијег флуида, T_{2u} [K] улазна температура хладнијег флуида, T_{2i} [K] излазна температура хладнијег флуида, A [m²] активна површина размењивача топлоте, K [W/m²K] средњи коефицијент пролаза топлоте у размењивачу, ΔT_m [K] средња логаритамска разлика температура.

Активна површина размењивача топлоте A [m²] се израчунава као [10]:

$$A = (N - 2) \cdot w \cdot L \quad (34)$$

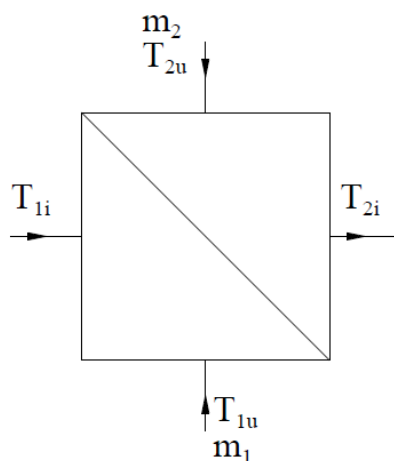
Где су N [-] број плоча размењивача топлоте, w [m] ефективна ширина плоче (до заптивача) и L [m] ефективна висина плоче (слика 30).



Слика 30. Изглед плоче стандардног плочастог размењивача топлоте [10]

Средња логаритамска разлика температура за супротносмерни размењивач топлоте износи (слика 31) [10]:

$$\Delta T_m = \frac{(T_{1u} - T_{2i}) - (T_{1i} - T_{2u})}{\ln \frac{(T_{1u} - T_{2i})}{(T_{1i} - T_{2u})}} \quad (35)$$



Слика 31. Принципа шема супротносмерног размењивача топлоте [10]

Средњи коефицијент пролаза топлоте K [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] у размењивачу се израчунава као [10]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{1}{h_2}} \quad (36)$$

Где су δ_p [m] дебљина плоче, λ_p [W/mK] топлотна проводљивост материјала плоче, h_1 [W/m²K] коефицијент прелаза топлоте са топлијег флуида на плочу, h_2 [W/m²K] коефицијент прелаза топлоте са плоче на хладнији флуид.

Коефицијенти прелаза топлоте h (индекс 1 се односи на топлији флуид, индекс 2 на хладнији) се израчунавају према формули [10]:

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_e} \quad (37)$$

Где су Nu [-] средњи Nusselt-ов број посматраног флуида, λ [W/mK] топлотна проводљивост посматраног флуида, d_e [m] геометријска карактеристика струјања посматраног флуида (хидраулички пречник).

Хидраулички пречник струјања флуида кроз плочасти размењивач топлоте се израчунава као [10]:

$$d_e = \frac{2 \cdot b_p}{\mu_p} \quad (38)$$

Где су b_p [m] дебљина проточног канала (3-5 mm), μ_p [-] фактор набраности плоче.

Овај фактор се израчунава као $\mu_p = \frac{\text{rayvijena površina}}{\text{projektovana površina}}$ плоче. За стандардне плоче фактор μ_p узима вредности од 1,1 до 1,25 [10].

Средњи Nusselt-ов број за турбулентни ток флуида у плочастом размењивачу топлоте се израчунава као [10]:

$$Nu = C \cdot Re^a \cdot Pr^b (\mu_f/\mu_z)^x \quad (39)$$

Где су C , a , b и x [-] коефицијенти, Re [-] Reynolds-ов број флуида, Pr [-] Prandtl-ов број флуида, μ_f , μ_z [Pa·s] динамичка вискозност флуида на средњој температури флуида и на температури зида, респективно.

За различите конструкције плоча коефицијенти C , a , b и x узимају различите вредности најчешће у опсезима [10]:

- $0,15 < C < 0,40$
- $0,65 < a < 0,85$
- $0,3 < b < 0,45$ (уобичајена вредност $b=0,33$)
- $0,05 < x < 0,20$ (уобичајене вредности $x=0,14$ и $x=0,17$)

Постоје и детаљнији обрасци који у обзир узимају додатне, утицајне факторе. Конкретно за тип профила ребра (слика 31) у литератури се може наћи [10]:

$$Nu = (0,2668 - 0,006967 \cdot \beta + 7,244e - 5 \cdot \beta^2) \cdot (20,78 - 50,84 \cdot \mu_p + 41 \cdot \mu_p^2 - 10,51 \cdot \mu_p^3) \cdot Re^{0,728+0,0543 \cdot \sin\left[\left(\pi \cdot \frac{\beta}{45}\right)+3,7\right]} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot (\mu_f/\mu_z)^{0,14} \quad (40)$$

Где је β [°] угао оребрења (слика 30). Једначина (40) важи за $30^\circ \leq \beta \leq 60^\circ$. Синус се израчунава у радијанима [10].

Prandtl-ов број, Pr се читава из табела за дату средњу температуру флуида, а Reynolds-ов број, Re се за плочасти размењивач топлоте израчунава као [10]:

$$Re = \frac{m \cdot d_e}{\frac{(N-1)}{2} \cdot b_p \cdot w \cdot \mu_f} \quad (41)$$

Где је m [kg/s] масени проток посматраног флуида. Израз $m/[(N-1)/2]$, представља масени проток флуида по једном проточном пресеку између две плоче, а израз $b_p \cdot w$ представља површину поменутог проточног пресека.

Када се из једначине (36) израчуна коефицијент пролаза топлоте K и за познату вредност површине A (једначина 34), могу се израчунати непознате температуре према једначинама [10]:

$$T_{1u} - T_{1i} = \psi(T_{1u} - T_{2u}) \quad (42)$$

$$T_{2i} - T_{2u} = \psi(T_{1u} - T_{2u})W_1/W_2 \quad (43)$$

Где су W_1 и W_2 [W/K] водени еквиваленти топлијег и хладнијег флуида, респективно ($W_1 = m_1 \cdot c_1$ и $W_2 = m_2 \cdot c_2$). Коефицијент ψ (супротносмери ток) се израчунава као [10]:

$$\psi = \frac{1 - e^{-\frac{AK}{W_1}(1-\frac{W_1}{W_2})}}{1 - \frac{W_1}{W_2} e^{-\frac{AK}{W_1}(1-\frac{W_1}{W_2})}} \quad (44)$$

Укупан пад притиска у плочастом размењивачу топлоте, Δp_u (Pa) се може израчунати као [10]:

$$\Delta p_u = \Delta p_1 + \Delta p_{tr} \quad (45)$$

Где су Δp_1 [Pa] пад притиска услед локалних отпора (улаз-излаз флуида из зоне размене топлоте) и Δp_{tr} [Pa] пад притиска услед трења. Пад притиска услед локалних отпора се израчунава као [10]:

$$\Delta p_1 = 1,5 \frac{\rho \cdot w_u^2}{2} \quad (46)$$

Где је w_u [m/s] улазна брзина у простор између две плоче. Пад притиска услед трења се израчунава као [10]:

$$\Delta p_{tr} = \frac{f \cdot L \cdot \rho \cdot w^2}{d_e \cdot 2} \quad (47)$$

Где су w [m/s] брзина струјања у међупростору, f [-] коефицијент трења (Дарсу-ев).

Према истом извору, одакле је наведена једначина (40) пад притиска у плочастом размењивачу топлоте се израчунава као [10]:

$$\Delta p_u = \frac{1,03 \cdot 2 \cdot f_F \cdot L \cdot G^2}{(2 \cdot b_p) \cdot \rho} \quad (48)$$

Где је f_F [-] Fanning-ов коефицијент трења ($f = 4 f_F$), G [kg/m²s] масени флуks посматраног флуида [10].

Величина G се израчунава као [10]:

$$G = \frac{m}{\frac{(N-1)}{2} \cdot b_p \cdot w} \quad (49)$$

Fanning-ов коефицијент трења, f_F се израчунава као [10]:

$$f_F = (2,917 - 0,1277 \cdot \beta + 2,016e - 3 \cdot \beta^2) \cdot (5,474 - 19,02 \cdot \mu_p + 18,93 \cdot \mu_p^2 - 5,341 \cdot \mu_p^3) \cdot (\mu_p \cdot Re)^{-(0,2+0,0577) \cdot \sin\left[\left(\pi \cdot \frac{\beta}{45}\right)+2,1\right]} \quad (50)$$

Као и у једначини (40) овде се β замењује у степенима [°], а синус се израчунава у радијанима [10].

6. Закључак

Плочасти размењивачи топлоте имају огромну област примене. Користе се и у систему даљинског грејања стамбених објеката и стамбених насеља, за припрему потрошне топле воде, експлоатацију геотермалне и соларне енергије, климатизацију ваздуха (кондензатори, испаривачи, топлотне пумпе, плочасти рекуператори), пастеризацију млека, сокова, пива, прехранбених раствора, у расхладној техници код хлађења рафинисаног, индустријског и термалног уља, воде, у склопу базенске технике и подног грејања, код термоенергетских постројења (слика 29) итд.

Захтеви које размењивачи топлоте (самим тим и плочасти размењивачи) морају да испуне су велики: велика активна површина за размену топлоте, велики коефицијент пролаза топлоте кроз површину за размену, компактност, снага размењивача, што већи термички степен корисности, што мањи пад притиска кроз размењивач, што већи опсег радних температура, лако чишћење, одржавање, монтажа и демонтажа, притом водећи рачуна о безбедности, једноставности, радном веку, естетском изгледу и цени.

Све горе наведене захтеве треба испунити. А управо се ту јавља проблем. Како се захтева што већи коефицијент прелаза топлоте, јер он утиче на коефицијет пролаза топлоте, треба се обезбедити што већи Re број, тј. турбулентан режим струјања. Како размењивачи требају да обезбеде што мањи пад притиска током струјања флуида са стране примара и секундара кроз њихову масу, све већи Re број утиче на све већи пад притиска. Зато је конструкција и израда савремених концепција размењивача, па и плочастих, изузетно компликован и захтеван процес.

Инжењери су ти који требају све параметре да узму у обзир како би се добило оптимално решење које ће што најприближније испунити све захтеве које размењивач треба да испуни. На крају, све то треба да се упакује да буде естетски лепо, а по доступним ценама.

Литература:

- [1] Бојић, М.: *Термодинамика*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2011.
- [2] Лукић, Н.: Скрипта, *Пренос топлоте и масе*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2013. год.
- [3] Бабић, М.: Скрипта, *Енергија и животна средина*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2012. год.
- [4] Лукић, Н.: Скрипта, *Енергија и животна средина*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2013. год.
- [5] Voronjес, D.: *Tehnološke operacije*, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 1998.
- [6] http://www.vtsnis.edu.rs/Predmeti/termoenergetika/5_prostiranje_toplote_kondukcija.pdf (приступљено 01.10.2015. год.)
- [7] Гордић, Д.: *Пренос снаге флуидом-хидраулика*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2007.
- [8] <http://www.datacenterknowledge.com/wp-content/uploads/2008/11/heat-wheel-diagram.png> (приступљено 01.10.2015. год.)
- [9] Гордић, Д.: Скрипта, *Енерго-еко менаџмент у индустрији намештаја*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2014.
- [10] Лукић, Н.: Скрипта, *Термоенергетски уређаји и постројења*, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2014.
- [11] http://web.tradekorea.com/upload_file2/sell/58/S00012658/Air_Cooled_Condenser.jpg (приступљено 03.10.2015. год.)
- [12] <http://www.ami-exchangers.co.uk/wp-content/uploads/2013/07/DSC08505-e1384336555665.jpg> (приступљено 03.10.2015. год.)
- [13] <http://alangmarinesolution.com/images/products/plate-heat-exchangers.jpg> (приступљено 06.10.2015. год.)
- [14] <http://read.nxtbook.com/wiley/plasticsengineering/april2014/industrynews/image1.png> (приступљено 06.10.2015. год.)
- [15] http://www.traco.rs/Catalogues/traco_izmenjivaci_toplote_katalog_2007.pdf (приступљено 05.10.2015. год.)
- [16] http://www.iklimnet.com/expert_hvac/heat_exchangers_PHE.html (приступљено 05.10.2015. год.)
- [17] <http://www.tranter.com/Pages/products/plate-heat-exchangers/configurations.aspx> (приступљено 05.10.2015. год.)
- [18] <http://www.inovacionifond.rs/euro-heat-d-o-o/> (приступљено 05.10.2015. год.)
- [19] <http://aliquantum.rs/wp-content/uploads/2011/12/07-Predavanje-Sistemi-klimatizacije.pdf> (приступљено 05.10.2015. год.)
- [20] Marković, D.: *Priručnik za mlekarstvo*, Imlek, 1998.
- [21] <http://www.gea-heatexchangers.com/us/products/plate-heat-exchangers/fully-welded-plate-heat-exchangers/geaflex/> (приступљено 05.10.2015. год.)