

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Урбано инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Предмет: Енергетска ефикасност објеката

Број индекса: 917/2016

Дајана Д. Микић

**Топлотне пумпе и њихова примена у
зградарству**

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Данијела Николић - ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране:

Оцена: _____

У оквиру завршног рада кандидат треба да:

- Прикаже све врсте топлотних пумпи, са основним карактеристикама, и опише могућности њихове примене у сектору зградарства.
- Прикаже конкретне примере инсталација са топлотним пумпама које се користе у стамбеним и нестамбеним зградама.

Препоручена литература:

[1] Проф. Др Станиша Стојиљковић, Наташа Цакић, дипл. инг. арх.; *Соларна топлотна конверзија, инсталације и потенцијали*, 2014.

[2] Kazimierz Brodowicz, Tomasz Dyakowski; *Heat Pumps*; Butterworth-Heinemann Ltd Linacre House, Jordan Hill, Oxford 1993.

[3] A. Bhatia; *Heat Pumps for Heating and Cooling*; Continuing Education and Development, Inc., Stony Point, NY

Крагујевац, 16.07.2020.

Ментор:

Др Данијела Николић, доцент

Резиме:

Процењује се да у свету ради око 140 милиона топлотних пумпи. То доказује да је опрема коју је осмислио Lord Kelvin давне 1852. године коначно продрла на тржиште. У последњих 20 година топлотна пумпа је побољшана како у погледу површина за топлотну размену, компресора, тако и у систему управљања и одмрзавања. Технологије топлотних пумпи се широко користе за надоградњу амбијенталне топлоте из одрживих извора, као што су ваздух, вода, земља и отпадна топлота, на температуре грејања. Могу се користити за грејање стамбених и пословних простора, хлађење и грејање воде, хлађење и у многим индустријским процесима. У производњи топлоте називају се топлотним пумпама и такмиче се са фосилним котловима и директним електричним грејањем. Овај дипломски рад говори о функцији коју топлотне пумпе пружају за декарбонизацију сектора грејања и хлађења, објашњавајући зашто ће технологија топлотних пумпи бити централна компонента будућег енергетског система.

Abstract:

It is estimated that about 140 million heat pumps are working in the world. This evidences that the equipment conceived by Lord Kelvin back in 1852 has finally penetrated into the market. In the last 20 years the heat pump has improved both regarding the thermal exchange surfaces, the compressor, and the control and defrosting systems. Heat pump technologies are widely used for upgrading ambient heat from sustainable sources, such as air, water, the ground and waste heat, to heating temperatures. They can be used for residential and commercial space heating, cooling and water heating, refrigeration and in many industrial processes. In producing heat, they are called heat pumps and they compete with fossil fired boilers and direct electric heating. This thesis discusses the function that heat pumps provide for the decarbonization of the heating and cooling sector, explaining why heat pump technology will be a central component of the future energy system.

Кључне речи: топлотне пумпе, енергија, обновљиви извори енергије, вода, ваздух, земља, грејање, хлађење, животна средина, коефицијент перформанси (COP)

Садржај

1. Увод	1
2. Топлотне пумпе	2
2.1. Расхладни циклуси топлотних пумпи	4
2.1.1. Теоретски расхладни циклус	6
2.1.1.1. Процес испаравања	7
2.1.1.2. Процес компресије	8
2.1.1.3. Процес кондензације	8
2.1.2. Коефицијент хлађења и грејања	9
2.2. Компоненте топлотних пумпи	10
2.2.1. Компресори	11
2.2.1.1. Клипни компресори	12
2.2.1.2. Ротациони компресори	15
2.2.1.3. Вијчани компресори	16
2.2.1.4. Центрифугални компресори	16
2.2.2. Измењивачи топлоте	17
2.2.3. Испаривачи	19
2.2.4. Кондензатори	20
2.2.5. Аутоматика	21
2.2.6. Расхладни флуид	22
3. Топлотни извори топлотних пумпи	24
3.1. Природни топлотни извори	24
3.1.1. Ваздух	26
3.1.2. Вода	28
3.1.3. Земља	31
3.1.3.1. Подземни хоризонтални топлотни колектори	32
3.1.3.2. Подземне топлотне сонде	34
3.1.4. Сунчева енергија	35
4. Сорпциони расхладни уређаји	36
4.1. Апсорпционе топлотне пумпе	37
4.1.1. Апсорпциони чилери	39
4.1.2. Адсорпциони системи	43
4.1.2.1. Адсорбер необложеног типа	47
4.1.2.2. Адсорбер обложеног типа	48

5.	Примена топлотних пумпи у зградарству	50
5.1.	Пример 1. Амадео: прва стамбена ниско-енергетска зграда у Србији	54
5.2.	Пример 2. HVAC решење: Комбиновани пословни и стамбени објекти	55
5.3.	Пример 3. Зграда Office Südwestmetall у Немачкој	57
5.4.	Пример 4. Примене топлотних пумпи са извором воде	59
5.5.	Пример 5. Алтернативе за британска домаћинства	59
5.6.	Пример 6. Топлотне пумпе извора земља у Ирској	61
5.7.	Пример 7. Топлотна пумпа ваздух-вода	62
6.	Примена геотермалне енергије у Србији	63
7.	Закључак	68
8.	Литература	69

1. Увод

Последњих година много се говори о потреби смањења потрошње енергије, односно повећања енергетске ефикасности. Убрзан глобални раст становништва и убрзана индустријализација мање развијених земаља, као на пример Индије, Вијетнама, Нигерије, Анголе су један од разлога све веће потражње фосилних горива.

Резерве фосилних горива су ограничене и троше се таквим темпом да се може очекивати њихово исцрпљивање већ током или најдуже до краја овог века. Коришћењем ове врсте горива емитују се разне честице и гасови стаклене баште, који у великој мери угрожавају животну средину и самим тим долази до појаве климатских промена. Из тог разлога у свету је покренут низ акција за примену технологија искоришћавања обновљивих извора енергије, као што су: енергија биомасе, соларна енергија, енергија ветра, воде и геотермална енергија.

Један од начина за ефикасну употребу енергије из природе, јесте примена геотермалне енергије кроз технологију топлотних пумпи. Уз помоћ најсавременијих технологија и решења ову енергију могуће је искористити на више начина, као што је: припрема воде или ваздуха за грејање, а уједно и за хлађење. У односу на стандарне облике грејања, ефикасност геотермалног грејања је знатно већа. На пример, геотермална енергија је 48 % ефикаснија од котлова на гас и више од 75 % од пећи на лож уље. Искоришћавањем ове енергије се испушта веома мало штетних гасова у атмосферу, па је овај вид грејања/хлађења еколошки врло прихватљив.

У Србији се током дужег временског периода живело у својеврсној заблуди да се под појмом геотермална енергија подразумевају извори у којима је температура воде већа од 45 °C. Геотермална енергија подразумева ону енергију која се може преузети из воде, земљишта и стена, чија температура прелази 10 °C. Ова врста енергије у смислу (топли извори и бушотине) помиње се у смислу декларативног залагања за развој потенцијала Србије у том сектору, али без конкретних мера и решења. Појам нискотемпературне енергије не постоји у садашњој Стратегији енергетике Србије.

Међутим у нашим условима, преко 50 % произведене електричне енергије троши се у зградама за становање, првенствено за загревање простора и санитарне воде, за шта се ефикасно може користити геотермална енергија [1]. Стратегијом енергетског развоја одређене су темељне смернице енергетског развоја које се изражавају кроз:

- повећање енергетске ефикасности,
- смањење емисија, првенствено CO₂, SO₂ и NO_x, из постојећих енергетских објеката,
- смањење употребе фосилних горива,
- употребе коришћења еколошки прихватљивих енергената обновљивих извора енергије,
- увођење и подстицај другачијег начина понашања конкретним мерама економске политике [2].

2. Топлотне пумпе

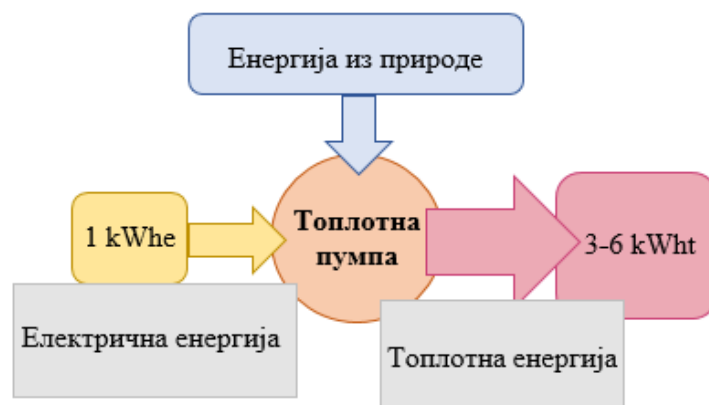
Прве теоријске информације о могућности коришћења топлотне пумпе за грејање дао је *W. Thomson (Lord Kelvin)* 1852. године [3]. Он је описао отворен циклус који користи ваздух, са компресором и два резервоара за воду који раде као високо- и нискотемпературни извори топлоте. Упркос многим покушајима практичне експлоатације ова идеја је остала нереализована дуги низ година. 1880-их почео је развој расхладне технологије, коришћењем циклуса компресије паре која ради на амонијаку. *T.G. Haldane* 1928 [3] саградио је инсталацију за грејање сопственог дома, али није успео даље да је популарише. Прве практично имплементирани топлотне пумпе циклуса компресије паре исправно технички и раде континуирано током многих година, биле су релативно велике снаге. 1940-их, појавом широке употребе органских радних течности, топлотне пумпе мале снаге за грејање појединих кућа појавиле су се на тржишту. Интересовања за примену компресорских топлотних пумпи у сфери економије су се значајно повећала током 1980-их. Процењено је да је до краја 1986. године инсталирано око 40 великих топлотних пумпи, укупно 600 MW топлотне енергије (снаге).

Прва топлотна пумпа домаће производње у Југославији је вероватно она у Херцег Новом, коју је пројектовао професор Сава Вујић, из Београда. Пумпа је израђена 1963., са „Југостројевим“ компресором (по лиценци фирме „*J. E. Hall*“) [3]. Расхладно средство је било метитхловид, а топлотни извор земља. Последњу деценију XX века карактерише најезда топлотних пумпи за индивидуалну употребу тзв. „сплит“ (раздвојивих) топлотних пумпи за грејање и хлађење. Након тога масовно се примењују и веће јединице и то како са електропогоном компресора, тако и са гасним моторима.

Употреба топлотних пумпи постаје све чешћа, како у индустрији тако и у општинским привредама.

Већина топлотних пумпи у масовној употреби користи се за грејање појединачних кућа. Снага таквих топлотних пумпи креће се од неколико до десетине (тако ретко до 50) kW на нивоу извора високе температуре. То су у великој мери циклуси компресије паре, обично опремљени клипним компресорима које покрећу електрични мотори. Већина црпи топлоту из атмосферског ваздуха. Често се ове пумпе комбинују са другим, електричним или централним системима грејања, који се користе серијски или паралелно. Велики део ових пумпи ради као топлотне пумпе зими, а као клима уређаји током лета [3].

Принцип рада топлотних пумпи представљен је на слици 1. Путем измењивача топлоте могуће је ефикасно искористити топлотну енергију земље уз мали утрошак електричне енергије. На тај начин се може обезбедити око 80 % енергетских потреба објекта, док се 20 % мора утрошити у виду електричне енергије. Правилан одабир одговарајућег система и величине топлотне пумпе веома је важна фаза у пројектовању ових инсталација. Он треба да економично загрева/хлади кућу током године, али и да се избори са најхладнијим и најтоплијим данима [4].



Слика 1. *Принцип рада топлотне пумпе*

Топлотне пумпе мале снаге, у распону од неколико kW, могу се користити за обезбеђивање малих количина топле воде у домаћинству. У таквој примени топлотна пумпа обезбеђује одговарајуће температуре и високу ефикасност, нарочито током лета. За грејање већих простора, као што су складишта за трговину, или за грејање воде у базенима користе се топлотне пумпе снаге од десетак kW. То су обично типови циклуса компресије паре, опремљени клипним компресорима, са нискотемпературним извором топлоте атмосферским ваздухом или алтернативно из површинских или подземних вода.

Веће топлотне пумпе (тип циклуса компресије паре), снаге неколико MW, захтевају употребу проточних компресора, које је тешко произвести. Из тог разлога топлотне пумпе типа сорпционог циклуса могу бити веома атрактивне у таквим применама.

Ове инсталације се углавном користе за грејање стамбених објеката или за снабдевање топлим водом. Све се више користе и у индустрији.

Посебно повољни услови за уградњу топлотних пумпи постоје у неколико случајева:

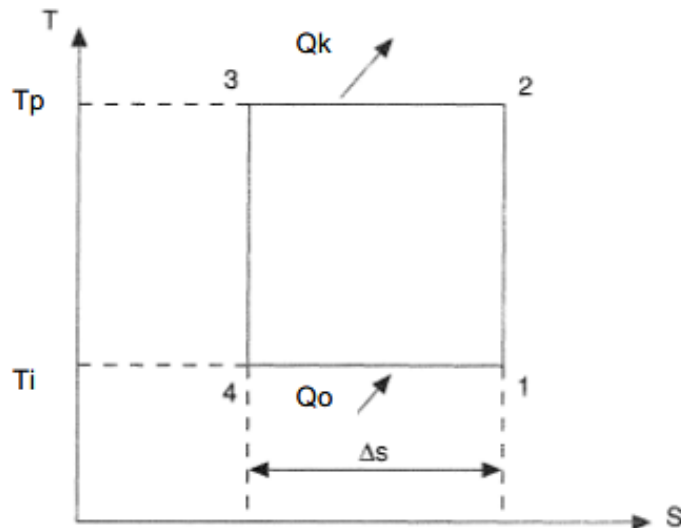
1. Тамо где већ постоји извор испусне топлоте на прениској температури (али још увек вишој од температуре околине) да би се користила без пумпе за загревање и где у исто време и место постоји потреба за топлотном енергијом;
2. Ако постоји потреба за грејањем (или, прецизније, за енергијом коју топлотна пумпа ослобађа на нивоу високе температуре топлоте) и за ефектима хлађења (тј. за енергију која се апсорбује на нискотемпературној топлоти ниво извора за потребе хлађења) - ови захтеви могу бити истовремено или сезонски променљиви;
3. Где у индустријском постројењу постоји велики проток енергије који се може преокренути употребом топлотне пумпе (тако да се енергија више не испоручује на улазу и празни на излазу). Примери таквих случајева су у климатизацији, сушилици, испаривачи, инсталације за прање опреме или боце у прехранбеној индустрији;
4. Ако у индустријској инсталацији већ постоји опсежан систем регенерације топлоте и употреба топлотне пумпе може побољшати овај систем;
5. Тамо где се енергија преноси на значајне удаљености, тако да се коришћењем топлотне пумпе (посебно топлотног трансформатора) на прихватном крају може значајно смањити трошак капиталних инвестиција [3].

2.1. Расхладни циклуси топлотних пумпи

Топлотна пумпа користи исти принцип циклуса компресије паре и има исте основне компоненте попут традиционалног клима уређаја (компресор, кондензатор, испаривач и уређај за ширење), осим што може да преокрене циклус хлађења или другим речима, замени функције два измењивача топлоте (кондензатора и испаривача) [5]. Принципијелна разлика између расхладних циклуса види се превасходно у томе што класичан процес хлађења има за циљ постизање ниских температура (при томе се не мисли на процес хлађења у климатизационим системима), док топлотна пумпа тежи постизању виших температура. Како би се смањила количина утрошеног рада, тј. енергије, примењује се класичан процес хлађења, који ће охладити робу или применити расхладни циклус у неком технолошком процесу. Такође, циљ топлотних пумпи је довести топлотну енергију процесу или роби са што мање утрошеног рада [6].

Код парних компресорских расхладних уређаја промена стања флуида је континуална и у теоретском смислу циклуси се заснивају на левокретном *Karnoovom* циклусу. На слици 2, приказан је идеалан циклус који пружа највећу могућу ефикасност у раду између две константне температуре. Термодинамички гледано, циклус чине следеће фазе;

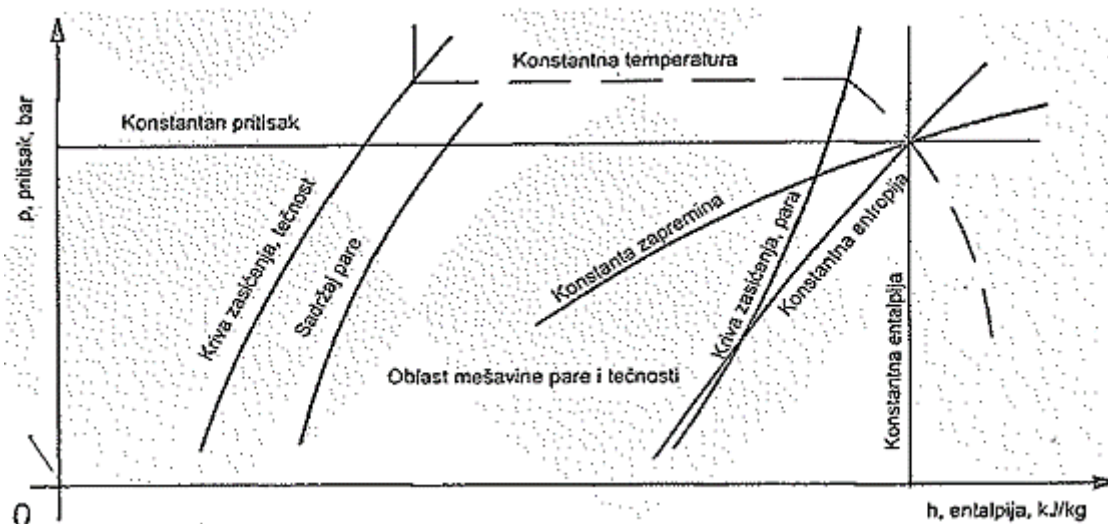
- 1-2 изентропска компресија ($S = \text{конст.}$);
- 2-3 изотермско хлађење или кондензација ($t_p = \text{конст.}$);
- 3-4 изентропска експанзија ($S = \text{конст.}$);
- 4-1 изотермско загревање или испаравање ($t_i = \text{конст.}$).



Слика 2. *Karnoov* циклус [6]

У повратном кружном процесу, у коме учествује и објекат који се загрева (2-3), објекат који се хлади (4-1), разлике температура између објеката и радне материје, којом се изводи циклус, бесконачно су мале. Површина између тачака 1, 4, 5 и 6 се добија од количине топлоте коју радна материја прима и износи Q_o . Количина топлоте коју радна материја преда је Q_k и представља површину између тачака 2, 3, 5 и 6. Компресор $Q_k - Q_o$ доводи енергију радној материји и она је представљена површином 1-2-3-4, на слици 2.

Могућност да се истовремено у обзир узму промене стања расхладног флуида у току циклуса и њихов утицај на циклус, без памћења свих диференцијалних нумеричких вредности које утичу на ток циклуса, могуће је уз коришћење дијаграма на којем се графички приказују комплетни циклуси. Дијаграм притисак-енталпија (ph) и дијаграм температура-ентропија ($T-S$) често се користе у анализи расхладних циклуса, али је у пракси ширу примену нашао дијаграм ph приказан слици 3.



Слика 3. ph дијаграм [6]

На приказаном ph дијаграму, свака тачка представља стање расхладног флуида деформисаног два величина стања, а са кога се такође могу очитати и друге термодинамичке особине. Дијаграм који је приказан на претходној слици, подељен је на три области које су линијама zasiћене течности и паре одвојене једна од друге. Област на дијаграму са леве стране линије засићења је потхлађена област. Расхладни флуид је у течном стању у свакој тачки ове области на температури која је испод температуре засићења. Прегрејана област је област која се налази десно од линије засићене паре, тј. област прегрејане паре. Област мешавине течности и паре је део између линија засићења и представља промену стања расхладног флуида између течног и парног стања. Растојање између две тачке на линији константног притиска представља латентну топлоту испаравања односно кондензације расхладног флуида на том притиску. Латентна топлота расхладног флуида мења се са променом притиска на којем се јавља промена фазе, па тако линије засићене течности и засићене паре нису паралелне.

Прелазак паре у течност на дијаграму одвија се у смеру, с десна на лево, док се промена фазе из течног у парно стање одвија прогресивно с лева на десно. У близини линије засићене течности, удео у мешавини паре и течности је велики, док са приближавањем линији засићене паре повећава удео паре у мешавини. Вертикалне линије представљају константну енталпију, а хоризонталне линије константан притисак.

У потхлађеној области, линије константне температуре, скоро су вертикалне на дијаграму и паралелне са линијама константне енталпије. Промена стања расхладног флуида у средишњем делу, врши се при константној температури и притиску. Линије константне температуре су паралелне и подударају се са линијама константног притиска.

На линији засићене паре:

- линије константне температуре мењају правац;
- у области прегрејане паре линије опадају ка апсциси.

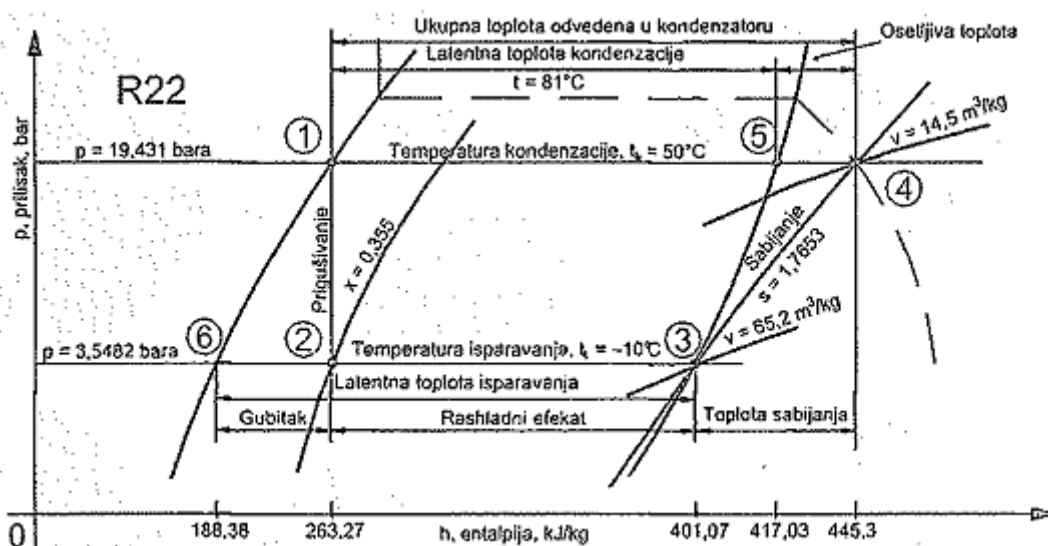
Оне које се стрмо простиру преко области прегрејане паре јесу линије константне ентропије. Криве које са малим нагибом пролазе кроз област прегрејане паре јесу линије константне запремине.

На дијаграму ph директно се читавају вредности променљивих величина расхладног флуида, које су важне за расхладни циклус. Особине расхладног флуида које немају значај у појединим тачкама циклуса, нпр. у области течности или области промене фазе (средишњи део) вредности ентропије и запремине, изостављају се при поједностављеном приказу дијаграма.

Како је дијаграм ph базиран на 1 kg масе расхладног флуида, дата запремина представља специфичну запремину. Енталпија се изражава у kJ/kg, а ентропија у kJ/kgK. Притисак (bar) се читава на ординати.

2.1.1. Теоретски расхладни циклус

Теоретски циклус хлађења је циклус где се претпоставља да пара расхладног флуида излази из испаривача и улази у компресор као засићена на температури и притиску испаравања, а да течност излази из кондензатора и улази у пригушни орган као засићена течност на температури и притиску кондензације. Упоредне анализе расхладног циклуса стварне машине за хлађење и теоретског циклуса су важне за дефинисање параметара расхладних циклуса при разним радним условима [6].



Слика 4. Дијаграм ph теоретског расхладног циклуса на граници засићења (R22)

Овај циклус приказан је на дијаграму ph (слика 4). На дијаграму је расхладни циклус приказан тачкама 1-2-3-4-5 и у циљу лакшег праћења процеса, дат је за конкретан расхладни флуид R22.

Стање у којем је расхладни флуид близу излаза из кондензатора, где се процес кондензације завршава и где је расхладни флуид засићена течност на температури и притиску кондензације, представља тачку 1 на дијаграму. Особине расхладног флуида у овој тачки могу се очитати са дијаграма или приказати табеларно.

Усисавањем паре на линији засићења код теоретског циклуса, подразумева се да нема промене особина (стања) течног расхладног флуида док он струји кроз течни цевовод од кондензатора до пригушног органа.

Проласком течности кроз пригушни орган, када се притисак мења са притиска кондензације на притисак испаравања, описан је процес који се јавља у почетним и крајњим тачкама стања 1-2. Такође, проласком течности кроз отвор пригушног органа температура течности се мења са температуре кондензације на температуру испаравања. Овај процес од тачке 1-2 је пригушивање и представља адијабатски процес при коме се енталпија радног флуида не мења. Претпоставка је да у цевима и вентилима нема добитак и губитак топлоте, нити повећања рада. Тачка 2 се налази на пресеку линије константне енталпије и линије која одговара температури и притиску испаравања, пошто се енталпија расхладног флуида у овом процесу не мења. Притисак или температура кондензације морају бити познати, како би се пронашла тачка 1. Као резултат делимичног испаравања расхладне течности у току процеса 1-2, расхладни флуид је у тачки 2 мешавина течности и паре.

2.1.1.1. Процес испаравања

Испаравање расхладног флуида у испаривачу јесте процес 2-3. То је изотермски и изобарски процес, па се самим тим тачка 3 налази на изобари, на којој је и тачка 2, која сече линију засићене паре. Расхладни флуид у тачки 3 је потпуно испарио и представља засићену пару на температури и притиску испаравања. На ph дијаграму или у парној табели величина стања дате су особине расхладног флуида.

Проласком расхладног флуида кроз испаривач и апсорбовањем топлоте из хлађеног простора у току процеса 2-3, енталпија расхладног флуида расте. Ефекат хлађења јесте количина топлоте коју расхладни флуид у испаривачу апсорбује и једнака је разлици вредности енталпија у тачкама 2 и 3. Стога, уколико су h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 и h_6 енталпије расхладног флуида у тачкама 1-2-3 и 4-5-6, онда је ефекат хлађења (kJ/kg):

$$q_i = h_3 - h_2 \quad (1)$$

Али, како је h_2 једнако h_{xt} онда је:

$$q_i = h_3 - h_1 \quad (2)$$

Разлика енталпија између тачака 6 и 3 на дијаграму ph представља укупну латентну топлоту испаравања 1 kg расхладног флуида на притиску испаравања. Како је разлика енталпија у тачкама 2-3 користан ефекат хлађења, разлика енталпија у тачкама 6-2 је губитак ефекта хлађења.

2.1.1.2. Процес компресије

Уситњавањем на граници засићења у теоретском циклусу, претпоставља се да расхладни флуид не мења стање док протиче кроз усисни цевовод од испаривача до компресора.

Процес 3-4 са повећањем притиска паре дешава се у компресору, односно компресијом од притиска испаравања до притиска кондензације. За теоретске циклусе 3-4 је по претпоставци изентропски процес.

Специјалан тип адијабатског процеса који се одвија без трења у ствари представља изентропску компресију. Она се понекад дефинише као компресија "адијабатска без трења", или компресија "константне ентропије".

Тачка 4 на дијаграму ph налази се праћењем линије константне ентропије, од тачке 3 до пресека са линијом притиска кондензације пошто у току процеса 3-4 нема промене ентропије. У овој тачки расхладни флуид је прегрејана пара. На дијаграму ph могу се прочитати вредности расхладног флуида у тачки 4. Како вредности t , h и v захтевају интерполацију, оне су само апроксимирани. Енергија (енталпија) паре се повећава за величину једнаку извршеном механичком раду у току процеса компресије 3-4. Рад (топлота) компресије, по килограму расхладног флуида који циркулише q_p , изражава се са:

$$q_p = h_4 - h_3 \quad (3)$$

Топла пара која се потискује из компресора је прегрејана, тј. њена температура је виша од температуре кондензације и то је резултат апсорбовања топлоте компресије. Процесу кондензације претходи потхлађивање прегрејане паре до температуре кондензације.

2.1.1.3. Процес кондензације

Хлађење паре до температуре кондензације се одвија у кондензатору и то углавном у току процеса 4-5. Овај процес се одвија у горњем делу кондензатора и делимично у цевоводу топлог гаса. Притисак паре остаје константан у току овог процеса, а тачка 5 се налази праћењем линије константног притиска од тачке 4 до пресека са кривом засићења.

Расхладни флуид у тачки 5 је засићена пара на температури и притиску кондензације. Прегревање, односно количина осетне топлоте одузете од 1 kg паре у кондензатору, при хлађењу са температуре потиса до температуре кондензације, јесте разлика између вредности енталпија расхладног флуида у тачкама 4 и 5 ($h_4 - h_5$). Процес 5-1 је кондензација паре у кондензатору која се одвија при константном притиску и температури. У току овог процеса, топлота ослобођена од кондензујућег флуида, једнака је разлици енталпија расхладног флуида у тачкама 5 и 1 ($h_5 - h_1$).

У кондензатору се одвијају оба процеса (4-5 и 5-1), па је тако укупна количина одведене топлоте од расхладног флуида предата секундарном флуиду, топлотном понору, и то је збир количина ослобођене топлоте у току ова два процеса. Укупна количина топлоте предата медијуму за хлађење у кондензатору је разлика између енталпије прегрејане паре у тачки 4 и засићене течности у тачки 1. Стога је:

$$q_k = h_4 - h_1 \quad (4)$$

где је q_k у kJ/kg, ослобођена топлота у кондензатору расхладног флуида који циркулише.

Расхладни флуид је завршио циклус на повратку до тачке 1, па укупно одведена топлота од расхладног флуида мора да буде једнака топлоти коју он прима у току процеса. У једноставним циклусима, енергија расхладног флуида се повећава само од топлоте апсорбоване од хлађеног простора испаравањем расхладног флуида у испаривачу и топлоте која је еквивалентна механичком раду компресије у компресору. Стога је:

$$q_k = q_i - q_p \quad (5)$$

Уколико је познат укупни расхладни учинак Q , проток расхладног флуида $\dot{m}$, одређује се из једначине:

$$\dot{m} = \frac{Q}{Q_i} \quad (6)$$

Учинак кондензатора дефинише се једначином:

$$Q_k = \dot{m} \cdot Q_k \quad (7)$$

док се топлотна енергија еквивалентна раду компресије расхладног капацитета Q_p добија из једначине:

$$Q_p = \dot{m} \cdot Q_p \quad (8)$$

2.1.2. Коефицијент хлађења и грејања

Коефицијент хлађења идеалног *Karnoovog* циклуса, у расхладним системима дефинише се као:

$$KH_c = \frac{Q_i}{Q_p - Q_i} = \frac{T_p}{T_p - T_i} \quad (9)$$

Као што је већ речено, за систем топлотних пумпи битан је ефекат добијања топлотне енергије, па се коефицијент грејања дефинише на следећи начин.

Аналогно изразу (9) следи:

$$KG_c = \frac{Q_p}{Q_p - Q_i} = \frac{T_p}{T_p - T_i} \quad (10)$$

где су:

KG_c - *Karnoov* коефицијент грејања,

Q_p - топлота размењена на страни топлотног понора,

Q_i - топлота размењена на страни топлотног извора,

T_p - апсолутна температура понора,

T_i - апсолутна температура извора.

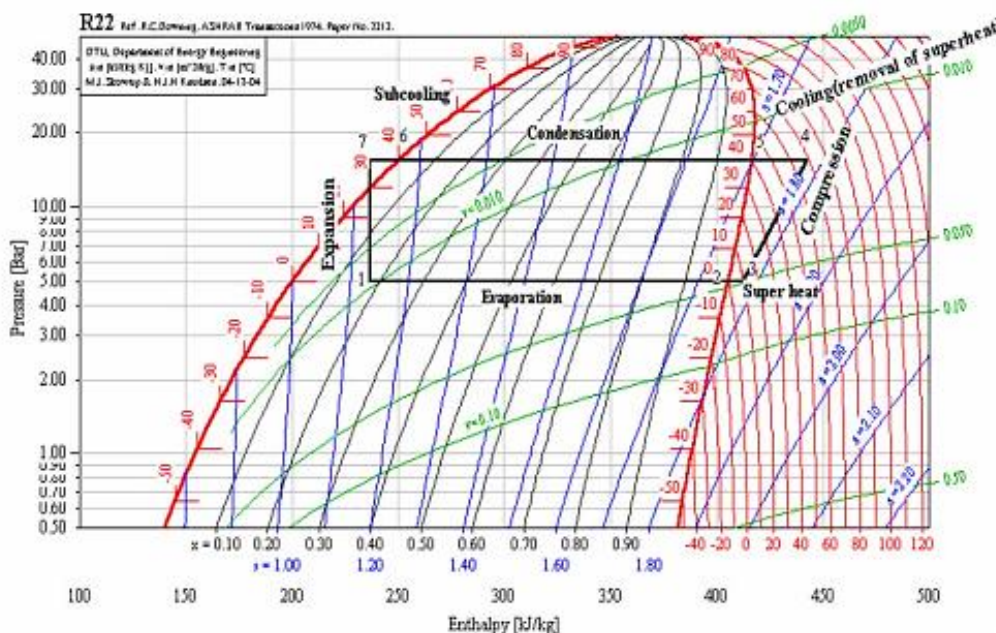
У *Карновом* процесу, у односу на реалне процесе, коефицијенти хлађења и грејања су мањи. Теоретски коефицијент хлађења KH расхладног циклуса је одраз ефикасности циклуса и формулише се као степен апсорбоване топлоте у хлађеном простору у односу на еквивалентну топлоту која се доводи компресору:

$$KH = \frac{h_3 - h_1}{h_4 - h_3} \quad (11)$$

Коефицијент грејања KG дефинише се као степен апсорбоване топлоте у кондензатору у односу на еквивалентну топлоту која се доводи компресору, аналогно коефицијенту хлађења. Коефицијент хлађења се често обележава са b (домаћа литература), или са COP (енглеска литература – „coefficient of performance”).

Реални расхладни циклуси

Ови циклуси одступају од теоретских из разлога одређених претпоставки за теоретске циклусе, које не важе за реалне циклусе: занемаривање пада притиска у цевоводима, испаривачу, кондензатору, ефекат потхлађивања течности и прегревања усисане паре или изентропска компресија. Радни циклус реалне топлотне пумпе са расхладним медијумом, приказан је на слици 5.



Слика 5. Радни циклус топлотне пумпе која ради са расхладним медијумом R22 [6]

2.2. Компоненте топлотних пумпи

Годинама уназад за топлотне пумпе су коришћене компоненте расхладних уређаја и постројења. У жељи да топлотне пумпе буду што економичније у експлоатацији, развијане су њихове „специјалне” компоненте. Компоненте коришћене у расхладној техници се по својим конструкционим карактеристикама још увек мало разликују у односу на новонастале. Због те мале разлике, технологија производње топлотне пумпе је веома слична оној за потребе расхладних елемената.

У основи, по својим називима и функцији, скоро све важне компоненте топлотних пумпи истоветне су са расхладним елементима. То су:

- компресори са погонским мотором;
- размењивачи топлоте;
- судови под притиском (сепаратори, одвајачи, скупљачи расхладног флуида);
- аутоматика;
- арматуре и цевоводи;
- електрокомандни уређаји;
- расхладни фиуид.

Све компоненте, било да су намењене топлотним пумпама или расхладним уређајима, морају задовољити одређене опште услове. Често је у расхладним постројењима погонски мотор компресора предимензионисан. Самим тим је потрошња енергије за погон компресора повећана, а тиме и коефицијент грејања смањен. У мањим топлотним пумпама, које се производе у великим серијама, снага електромотора компресора се врло прецизно утврђује за одређене стандардне услове, чиме се добија оптималан коефицијент грејања. Промена режима рада топлотне пумпе мења и коефицијент грејања.

У размењивачима топлоте расхладних постројења на страни расхладног флуида, уобичајени пад притиска је чак десет пута већи од онога у топлотним пумпама. Свако повећање пада притиска, у било ком делу система, изазива повећане енергетске губитке, а тиме смањење коефицијента грејања.

Средња температурна разлика између расхладног флуида и радног медијума, при прорачуну површине размењивача топлоте обично износи од 5 °C до 15 °C. Смањење коефицијента грејања би произашло из ове температурне разлике у испаривачу и кондензатору у топлотним пумпама. Због тога се, посебно у испаривачу и кондензатору, мора тежити постизању што је могуће мањој температурској разлици између расхладног флуида и радног медијума, било понора, или извора. Ово смањење температурске разлике мора бити праћено једновременим постизањем најмањег пада притиска.

Како би укупан економски ефекат био што повољнији, степен искоришћења компонената постројења топлотних пумпи, као што су вентилатори, пумпе, грејачи, аутомати и слично, мора бити што већи. То се постиже правилним димензионисањем за тачно одређене услове.

Велики број топлотних пумпи служи истовремено за грејање и за хлађење. Проблем оптималне конструкције код оваквих пумпи је сложенији. Оне по правилу раде дуже од топлотних пумпи за грејање, због чега морају имати дужи век трајања.

2.2.1. Компресори

Као елеменат топлотне пумпе, компресор представља најважнију компоненту, која директно утиче на учинак топлотне пумпе [6]. Топлотне пумпе углавном користе волуметријске компресоре. Могу бити и повратни и ротациони компресори [7]. Компресор значајно утиче на поузданост рада пумпе, њен експлоатациони век, ниске погонске трошкове, мању шумност, једноставност одржавања, сигурност и др.

Компресор мора радити најмање пет година, код мањих капацитета и много дуже, па тек након тога долази до генералне поправке. То значи да компресор при нормалној експлоатацији издржава више од 25 000 радних сати, или преко 14 сати дневног рада.

Радне карактеристике компресора морају одговарати температурском опсегу испаравања од $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, а у индустријским погонима и преко $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, док је температура кондензације $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Морају имати могућност доброг регулисања капацитета због променљивих оптерећења топлотне пумпе. Топлотни губици компресора се морају свести на што је могуће мању меру, да би се што већа количина топлоте предала топлотном понору. Степен искоришћења самог компресора и његовог погонског мотора мора бити што већи. Истраживања су показала да се средства уложена у компресор са већим степеном искоришћења, врло брзо враћају кроз његову економичнију експлоатацију.

Компресори конструисани само за топлотне пумпе су једино и право решење. Они који су посебно конструисани или прилагођени за топлотне пумпе, данас имају знатно боља конструкциона решења од оних урађених за потребе хлађења или климатизације. Самим тим је побољшан рад вентила, смањени су губици у штетном простору, повећана аеродинамичност усисних и потисних канала, чиме су смањени падови притиска. Нарочито је важан утицај штетног простора, од кога директно зависи запремински коефицијент.

У топлотним пумпама, као и у расхладним постројењима, најчешће се користе четири врсте компресора:

- клипни;
- ротациони;
- вијчани и
- центрифугални

2.2.1.1. Клипни компресори

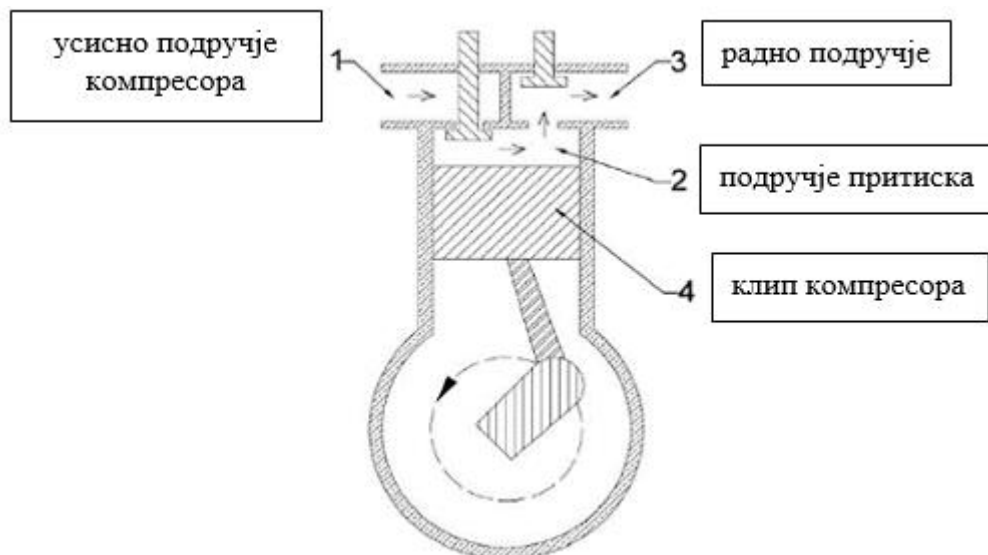
По својим конструкционим карактеристикама, клипни компресори се деле на отворене, полухерметичке и херметичке компресоре. Отворени компресори, иако једноставни за одржавање, имају доста недостатака, нарочито када се користе у системима са топлотном пумпом. Топлотни губици су им знатни и због тога што се овакви компресори не раде посебно за топлотне пумпе, него су обично прилагођени новој намени. Њихово регулисање, и то већих јединица, обично се врши преко вентилских плочица. Мање јединице не могу се регулисати. У отвореним компресорима, максимални радни притисак износи 25 bar, када им је пречник цилиндара 120 mm, а када су пречници већи, максимални дозвољени радни притисак је 22 bar. Разлика притисака између усиса и потиса је око 18 bar. Ове вредности умногоме зависе од услова и врсте уља за подмазивање. Од врсте расхладног флуида и конструкције самог компресора, зависи опсег рада топлотних пумпи са отвореним компресорима, а режими рада су приказани у табели 1 [6].

Табела 1. *Режим рада топлотних пумпи*

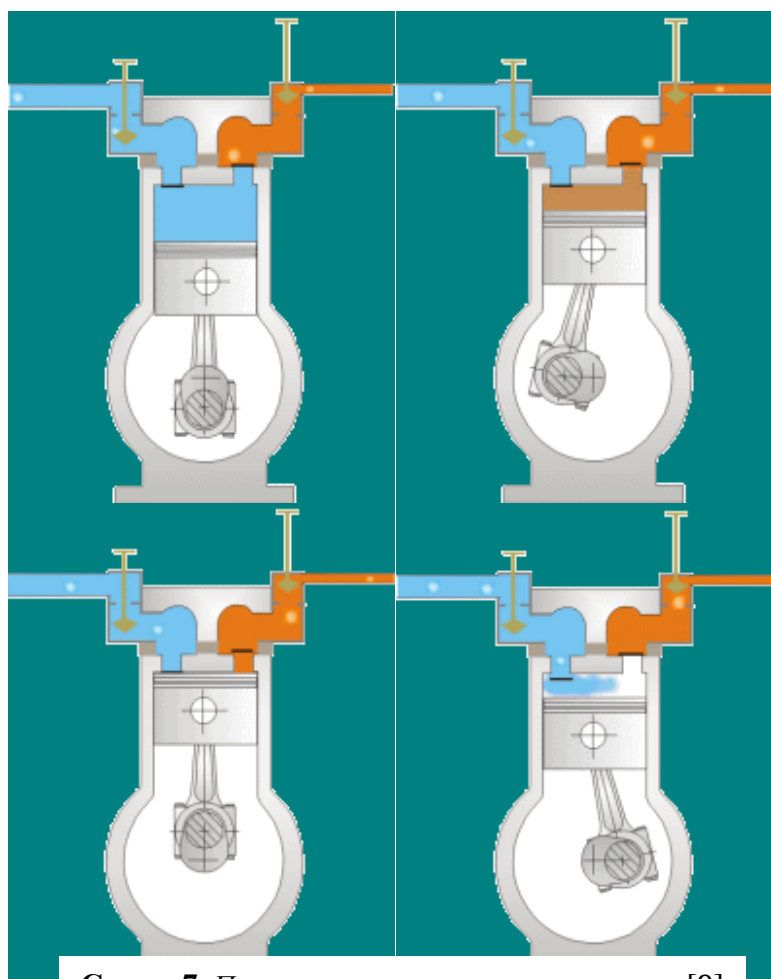
Расхладни флуид	Радни режим
R22, NH	55-60 °C
R134a	75-80 °C
R114	90-100 °C

Класификација клипних компресора према (Рубик, 2006) се врши са следећим карактеристикама [8]:

- систем и број вентила,
- систем и број цилиндара,
- конструкција затварања кућишта компресора,
- број ступења компресије и
- врста расхладног средства [8].



Слика 6. Поједностављени дијаграм клипног компресора [8]

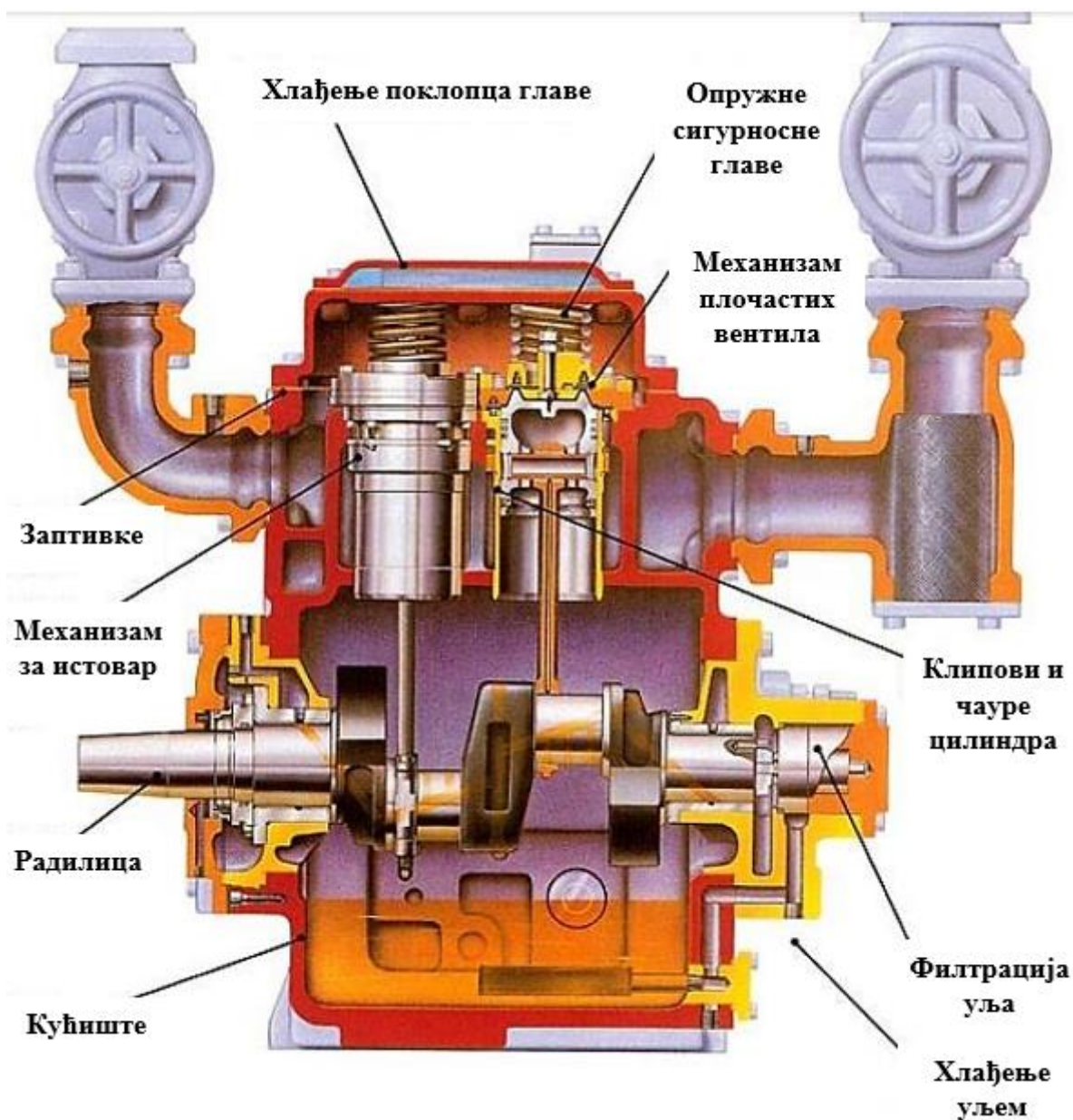


Слика 7. Процес кретања клипног компресора [9]

Полухерметички и херметички клипни компресори конструкционо више одговарају примени у топлотним пумпама.

Полухерметички компресор садржи компресор и електромотор у једном раздвојивом кућишту, тако што су, најчешће, компресор и електромотор повезани заједничким вратилом. Оваквом конструкцијом се може користити више топлотне енергије од самог компресора и електромотора. Кућиште полухерметичког компресора је раздвојиво, па се може лако одржавати и могу се мењати дотрајали делови.

Херметички компресори у односу на полухерметичке имају затворено кућиште компресора, па се не могу поправљати нити им се могу замењивати делови. Ови компресори су за исте расхладне учинке најјефтинији и најлакши, имају најдужи век трајања. Омогућавају највећи степен искоришћења топлоте као и механички и електрични коефицијент искоришћења. У оваквим компресорима уље се не мења током читавог века трајања [6].



Слика 8. Клипни компресор [10]

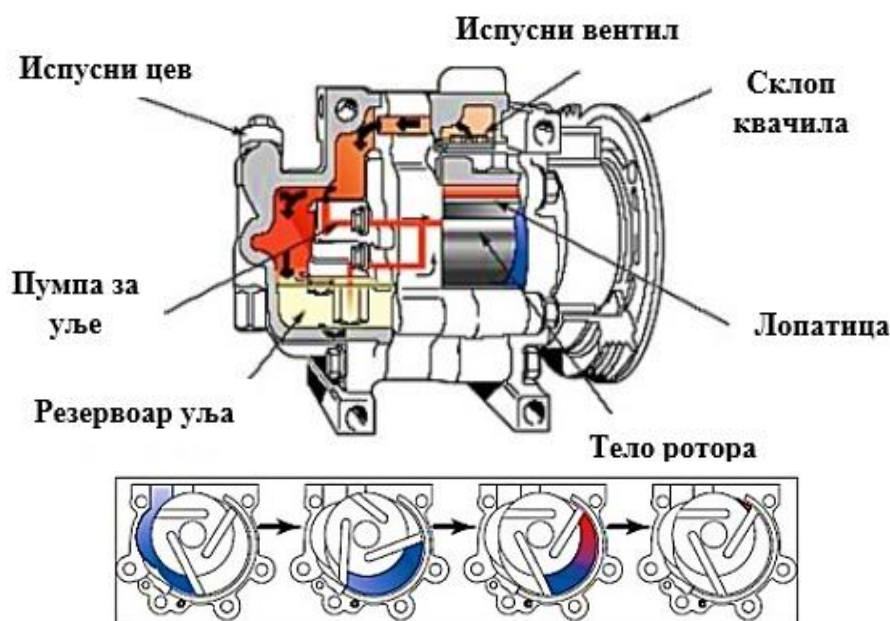
2.2.1.2. Ротациони компресори

Ротациони компресори се састоје од клипа који се обрће око ексцентричног вратила, истовремено се котрљајући по зиду цилиндра. Немају усисни вентил, те практично немају штетан простор, ни запремински губитак због штетног простора [6]. Сечиво, под потиском опруге, поред површине клипа, дели простор у компресору цилиндра на два дела: усисавање и притисак [8]. Запремински губици постају већи при већим разликама усисног и потисног притиска, као последица протицања паре расхладног флуида из простора са вишим притиском у простор са нижим притиском. Повећањем броја обртаја клипа, ови губици се могу смањити, као и интензивнијим подмазивањем клипа и цилиндра. Овај тип компресора користи расхладне флуиде који се слабо растварају у уљима за подмазивање.

Основне предности ротационих у односу на клипне компресоре су следеће:

- У ротационом компресору нема штетне размене између хладне паре расхладног флуида и зида топлог цилиндра.
- Попречни пресек улаза у цилиндар нема утицаја на штетан простор.
- Због карактеристичног облика компресионе коморе, потисни вентили раде много мирније.
- Век трајања као и искоришћење су им много дужи од класичних клипних компресора.
- Релативно мали број обртних делова.
- При стартовању се не појављује пена уља. Потисна комора не дозвољава да уље одлази у инсталацију, односно служи као сепаратор уља.
- Није потребан усисни вентил.

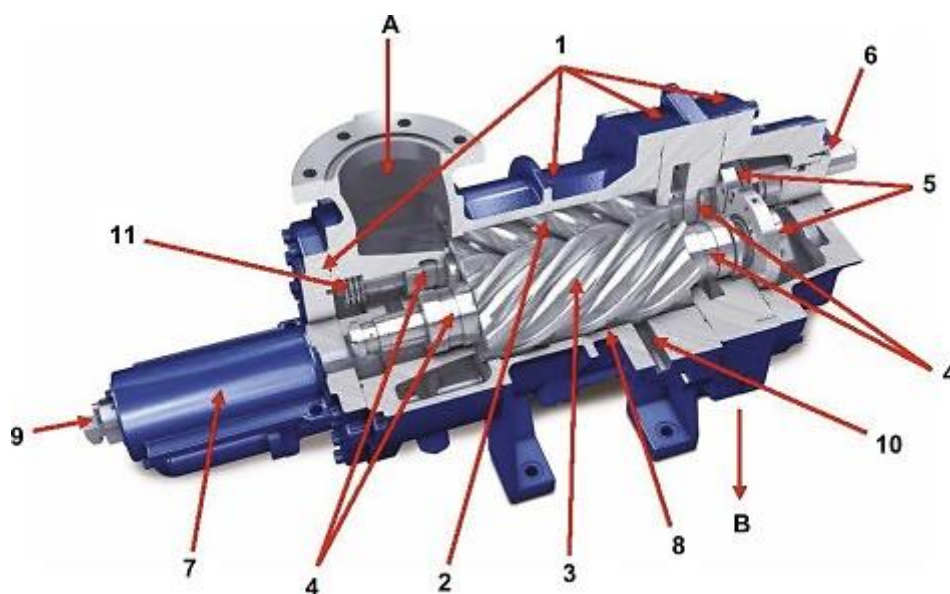
Сваки вишак топлоте, настао због губитака у компресору и мотору, може се вратити грејном флуиду и поново корисно употребити уколико се постави предхладњак. Губици у мотору не утичу на искоришћење компресора. Ови компресори су по величини мањи за око 30 % од клипних, који имају исте учинке.



Слика 9. Ротациони компресор [6]

2.2.1.3. Вијчани компресори

Вијчани компресори се могу убројити у ротационе компресоре, због ротора који обликом подсећа на вијке [6]. Њихови главни структурни елементи су два спирална ротора који се разликују у броју зуба и прореза. Они су поређани паралелно један у другом у затвореном телу са два поклопца [8]. Запремински губици настају од претакања паре из простора са вишим, у простор са нижим притиском, кроз зазоре између ротора. Код вијчаних компресора у њихов радни простор се убризгава уље, због чега се непосредно иза поменутог простора постављају одвајачи уља. Производе се као отворени и полухерметички. Полухерметички се користе најчешће са фреоном као расхладним флуидом [6].



Слика 10. Вијчани компресор [11]

Табела 2. Значење ознака на слици 10 [11]

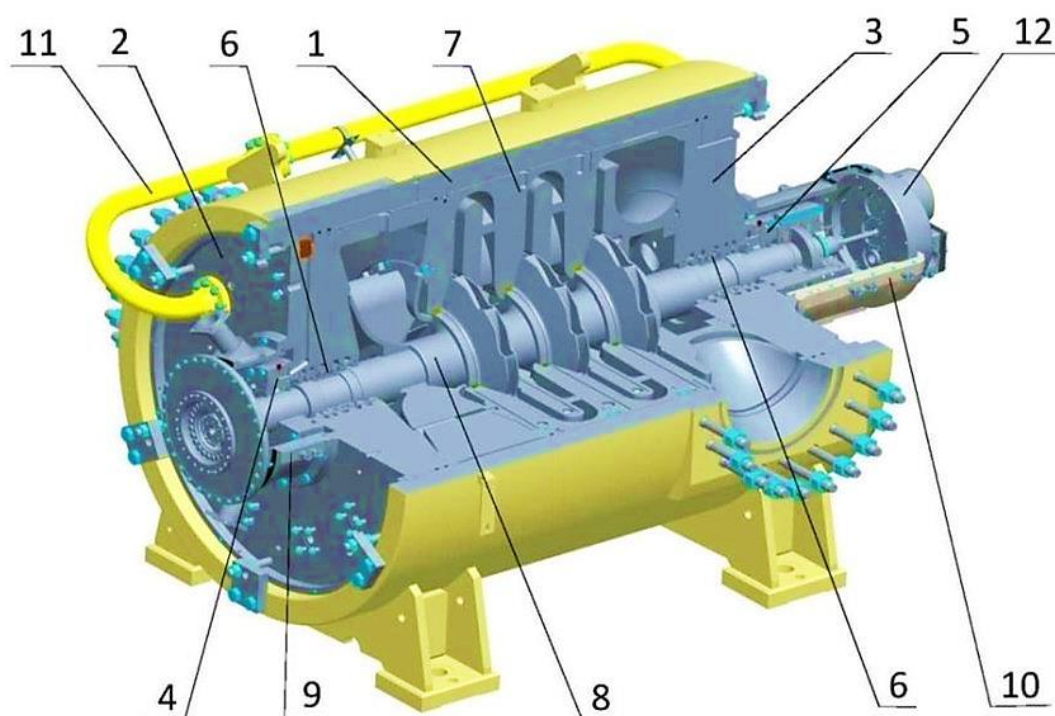
A - Довод	B - Пражњење (није видљиво)
1 Кућиште	6 Заптивач вратила
2 Мушки (главни) монитор	7 Хидраулични цилиндар клизног вентила
3 Женски (секундарни) ротор	8 Клизни вентил за капацитет (није видљив - испод ротора)
4 Радијални лежајеви	9 Сензор положаја вентила за клизни капацитет
5 Аксијални (потисни) лежајеви	10 Отвор за убризгавање уља
11 Клип уравнотежења потиска	

2.2.1.4. Центрифугални компресори

У центрифугалном компресору пражњење расхладног средства настаје дејством центрифугалне силе. Поред тога, повећање статичког притиска може се добити захваљујући дифузору (смањењем протока расхладног средства). Смер тока може се подесити помоћу водилица. Зависно од смера протока паре расхладног средства, разликујемо **аксијални компресор** и **радијални компресор**, али за изградњу топлотних

пумпи обично се користе **радијални компресори**. Центрифугални компресори се најчешће користе у топлотним пумпама велике снаге.

Да би се постигла довољно висока ефикасност компресора протока, најмања брзина испаравања расхладног средства, која се исушује из последњег степена компресије, треба да буде $0,2 - 0,3 \text{ m}^3/\text{s}$, брзином ротације $n = 83,5 - 167 \text{ 1/s}$ (Рубик, 2006) [8]. Предност центрифугалног компресора је уклањање зупчаника током фазе пројектовања, што доноси додатне предности: смањење броја лежајева и поједностављење система подмазивања. Све ове карактеристике доводе до смањења механичких губитака који настају у компресору и утичу на поузданост рада [8].



Слика 11. Центрифугални компресор [12]

Табела 3. Значење ознака на слици [12]

1 - спољно кућиште	6 - заптивач са сувим гасом
2 - предњи поклопац	7 - унутрашње кућиште
3 - задњи поклопац	8 - ротор
4 - лежај дневника	9, 10 - кућиште
5 - лежај за потискивање	11 - цевовод
12 - пумпа за уље	

2.2.2. Измењивачи топлоте

Апарати у којим се врши размена топлоте, односно прелаз топлоте расхладног флуида са једног на други радни флуид, називају се **измењивачи топлоте**. Овај процес може да се одвија на три начина:

- провођењем (кондукцијом);
- конвекцијом и
- зрачењем.

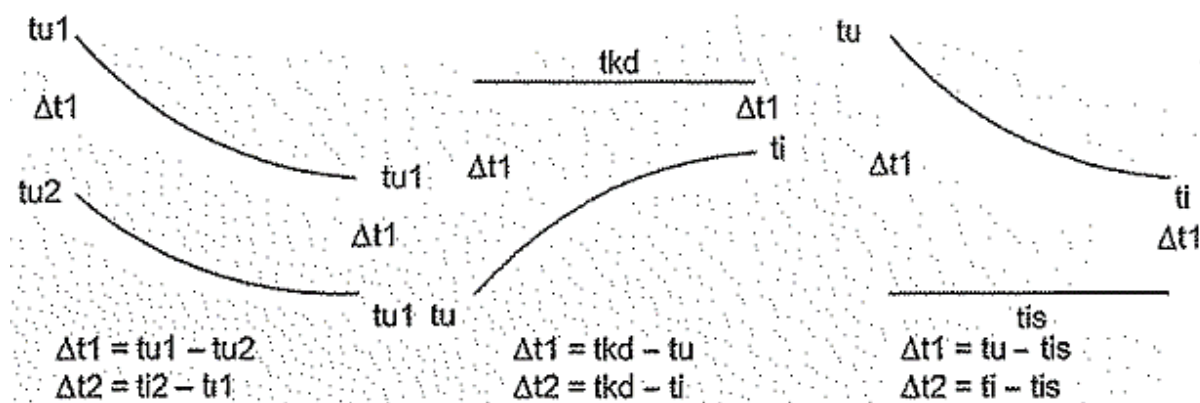
Размена топлоте **провођењем** врши се при међусобно директном контакту два тела различитих температура. Приликом **конвекције**, у којој нема промене агрегатног стања, размена топлоте врши се између течности или гаса са једне стране, и чврстог тела са друге стране. Кретање течности и гаса може бити **природно** или **принудно**, што директно утиче на интензитет размене топлоте. Размена топлоте конвекцијом и провођењем увек је везана за материју, док размена топлоте зрачењем није.

При размени топлоте подразумева се да нема промене агрегатног стања флуида који се креће и тада је размењена количина топлоте једнака производу масеног протока, специфичне топлоте и разлике температура флуида.

$$Q = G \cdot c_p \cdot (t_{u1} - t_{iz}) \quad (12)$$

Општи израз за размену топлоте је:

$$Q = k \cdot F \Delta t_{log} \quad (13)$$



Слика 12. Средња логаритамска температурска разлика (Δt_{log}) [6]

Коефицијент k , поред начина размене топлоте (конвекције и провођења), карактерише и конструкција размењивача топлоте,

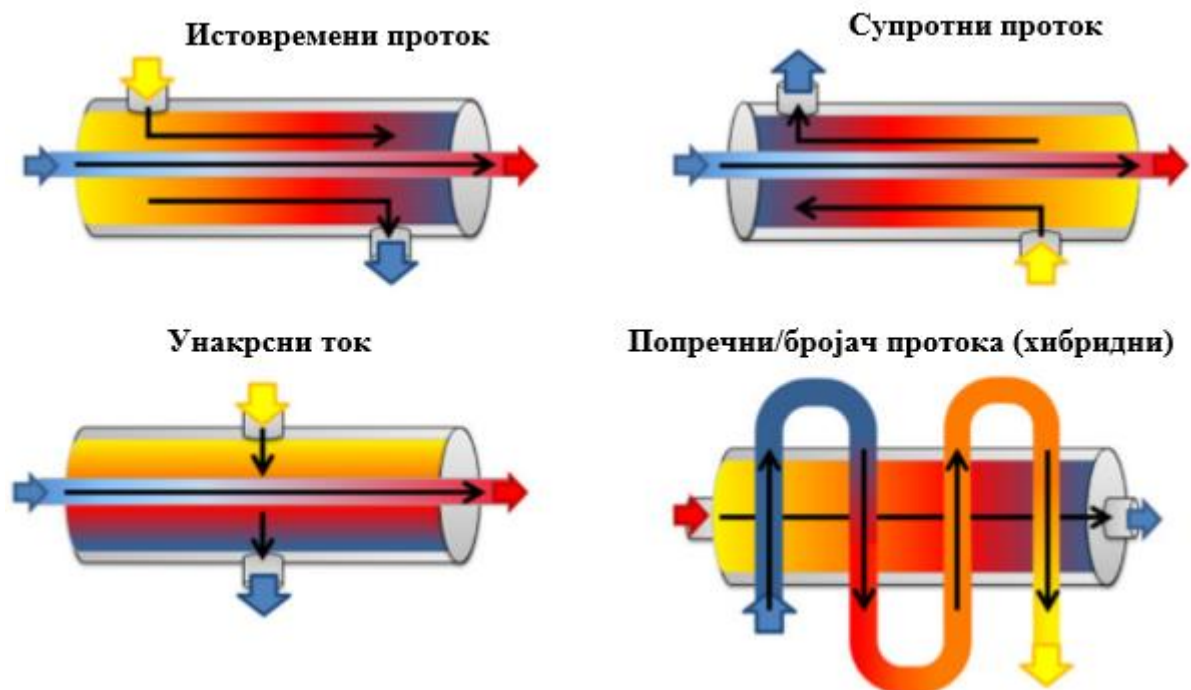
$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_{sp}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\delta_i} + \frac{1}{\alpha_{un}} \quad (14)$$

Утицај задрљања површине размењивача при прорачуну и конструкцији размењивача топлоте, често је један од битних фактора правилног прорачуна његове површине. Задрљање површине може смањити коефицијент прелаза топлоте и до 70 % и може бити последица:

- таложења (седиментације);
- кристализације;
- хемијских реакција;
- биолошких микроорганизама и
- корозије.

За оцену економичности топлотне пумпе важна је величина измењивача топлоте. На вредност коефицијента грејања, директно утиче остварена температурна разлика између радног медијума топлотног извора или понора и расхладног флуида.

На укупну економичност утиче инсталисана снага за погон вентилатора, пумпи и аутоматике везане за размењиваче топлоте. Повећавање коефицијената прелаза топлоте ради побољшавања ефикасности размењивача топлоте, па тако и целе топлотне пумпе, могуће је остварити конструкционим решењима и избором оптималних термодинамичких параметара и расхладног и радног флуида, топлотног понора или извора. Површина размењивача се одређује према неповољнијем режиму и обично је то режим испаравања. На повећање пада притиска, може директно утицати повећани коефицијент прелаза топлоте, што има исти ефекат као и већа температурна разлика расхладног и радног флуида. Пад притиска у расхладним инсталацијама од 0,1 до 0,3 bar је дозвољен, што представља око 3–4 K температурске разлике. У топлотним пумпама, где се посебно води рачуна о економичности размењивача топлоте, овај пад притиска не сме бити већи од 0,1 bar. У целини гледано, оптимална величина размењивача топлоте поред пролаза топлоте и пада притиска, зависи и од трошкова производње самог размењивача топлоте као и погонских трошкова [6].

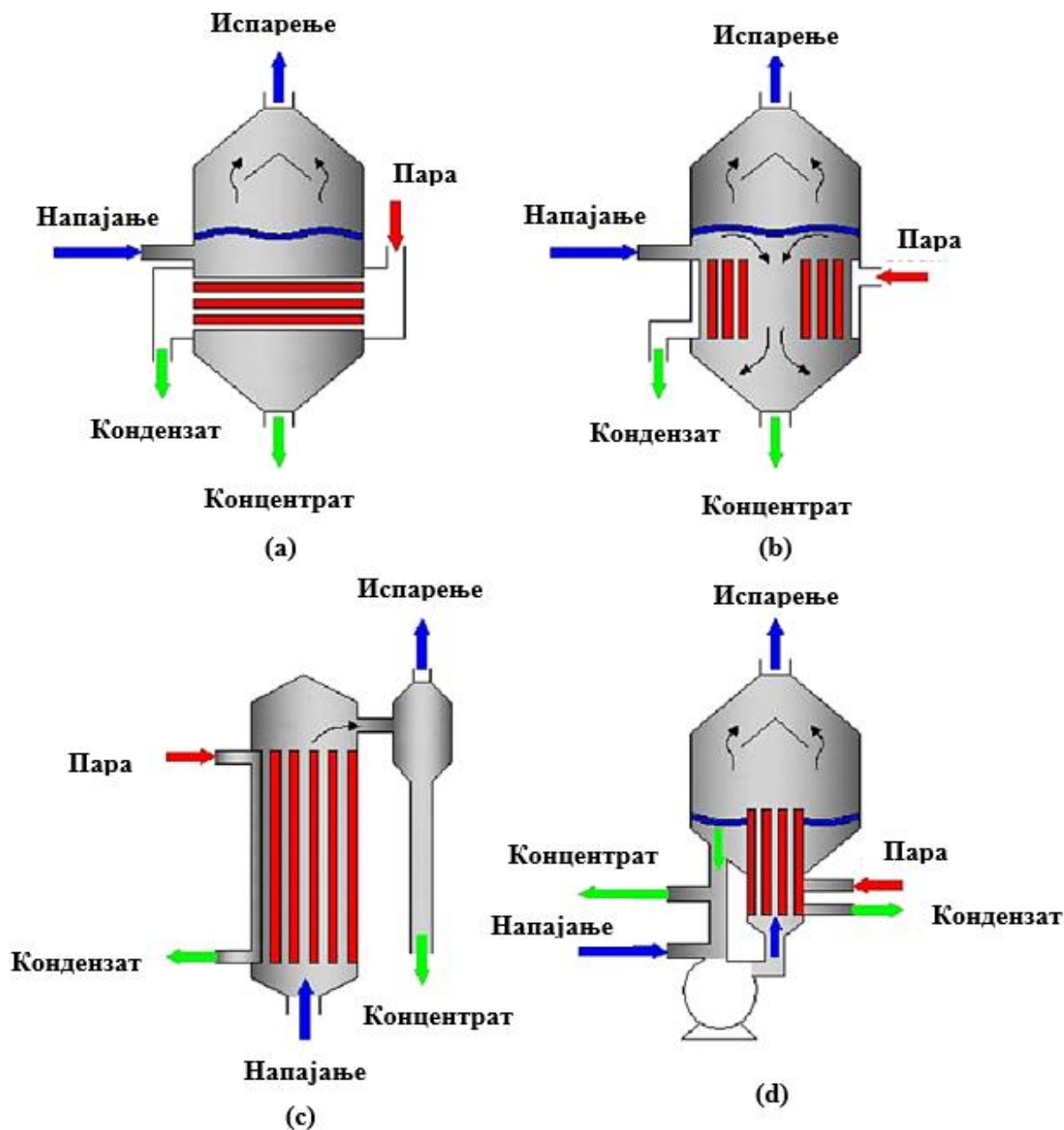


Слика 13. Конфигурације протока размењивача топлоте [13]

2.2.3. Испаривачи

Испаривач је део топлотне пумпе у коме расхладни флуид испарава захваљујући топлоти одузетој од топлотног извора [6]. Грађен је као систем цеви намотаних у завојницу површином у коју улази расхладни медијум на нижој температури и преузима топлоту из тла, воде или ваздуха. Испаривач је функцијски грађен као и кондензатор [1]. У зависности од конструкције испаривача, испаравање расхладног флуида може бити око цеви у великој запремини, или у цевима. Механизам испаравања расхладног флуида у испаривачу је врло сложен процес и познавање тог механизма посебно је важно при оптимизацији величине испаривача у односу на топлотни извор, када се конструкција испаривача не може посматрати одвојено од топлотног извора.

Испаривачи се деле према врсти, односно према агрегатном стању топлотног извора на испариваче за одузимање топлоте од ваздуха или других гасова, и испариваче за течност. Испаривачи у којима расхладни флуид потпуно испарава у запремини, називају се „сувим испаривачима”, а они у којима течност расхладног флуида не испари потпуно називају се „преплављени испаривачи” [6].



Слика 14. Врсте испаривача (a) хоризонтална цев, (b) вертикална цев, (c) вертикална дуга цев и (d) присилна циркулација [14]

2.2.4. Кондензатори

Кондензатор је измењивач топлоте у коме се пара расхладног флуида кондензује и предаје топлоту топлотном понору. У кондензатору, количина топлоте која се преда радном флуиду топлотног понора састоји се из три дела: топлоте хлађења паре од притиска сабијања до притиска кондензације, топлоте кондензације и топлоте потхлађивања течности. Сва три дела топлотне енергије се предају, најчешће, у једном

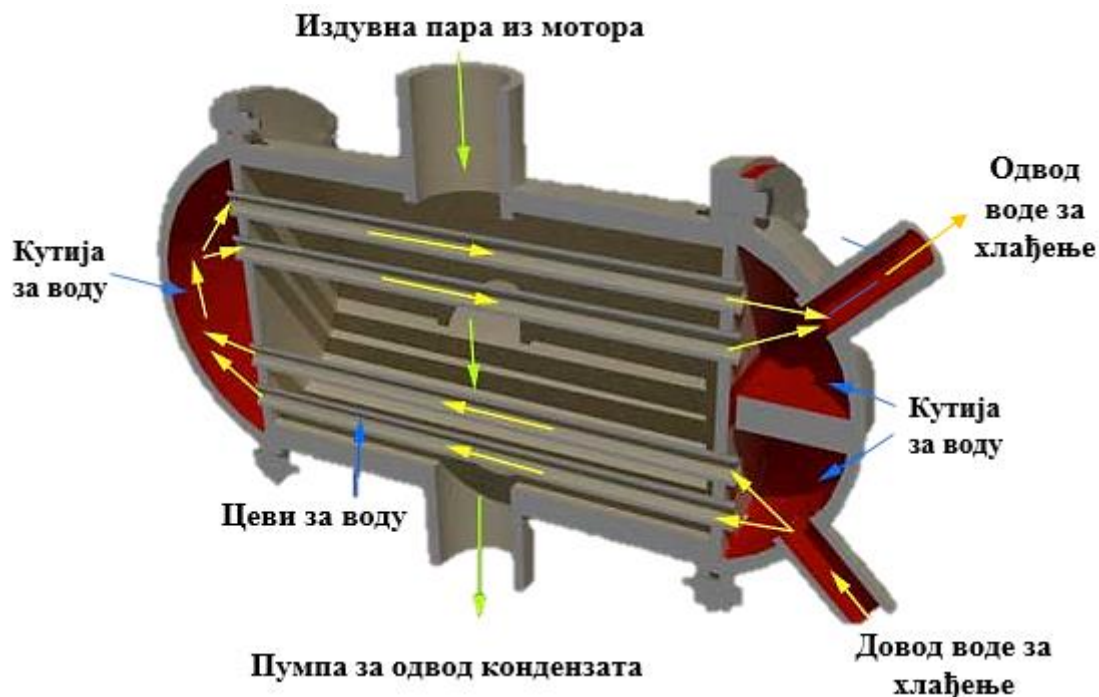
измењивачу топлоте – кондензатору. У топлотним пумпама кондензатор је изолован, јер је основни циљ његове примене дати што више топлотне енергије радном флуиду топлотног понора, без већих губитака. Кондензаторе у основи можемо поделити на оне:

- за грејање воде (они су по конструкцији врло слични добошастим испаривачима „преплављеног” типа у којима се расхладни флуид налази у простору добоша око цеви, кроз које протиче вода односно радна материја топлотног понора);
- за грејање ваздуха.

За прецизан прорачун средње логаритамске температурске разлике треба узети у обзир све три зоне и колико су тачно дефинисани услови струјања [6].

Централни површински кондензатор протока

Код ове врсте површинског кондензатора усисна цев пумпе за усисавање ваздуха постављена је у средину гнезда цеви, што узрокује да кондензат радијално тече ка центру, као што показују стрелице на слици 15.



Слика 15. Централни површински кондензатор протока [15]

Кондензат одлази на дну места где се налази пумпа за одвод кондензата. Ваздух се повлачи из средишта гнезда цеви. Ова метода је побољшање врсте доњег протока, јер се пара усмерава радијално према унутра (око гнезда цеви), тако да има приступ целом ободу цеви [15].

2.2.5. Аутоматика

За топлотне пимпе, што се тиче елемената аутоматике и контролних уређаја, највећи број истих, користи се за класичне расхладне и климатизационе уређаје. Аутоматика за топлотне пумпе, у односу на ону за расхладне и климатизационе уређаје, мора имати карактеристике које је у примени чине особеном:

- Мора постојати могућност регулисања термостата у широким температурним границама. Термостати у кругу топлотног извора су потпуно идентични са већ познатим термостатима, јер се ради о температурама до 30 °C. За више температуре треба користити термостате за грејање, на страни топлотног понора.
- Пресостати морају обезбедити регулисање притисака у ширим границама. Постоје два типа: **ниског притиска** одговарају онима код расхладних уређаја, док пресостати **високог притиска** за топлотне пумпе морају радити посебно.
- Уколико се ради о топлотним пумпама са максимално дозвољеном температуром кондензације, магнетни вентили морају бити прилагођени вишим радним и пробним притисцима, јер су у инсталацијама топлотних пумпи виши притисци.
- Термостатски експанзиони вентили се најчешће производе посебно за топлотне пумпе, јер они служе за регулацију температуре испаравања у условима експанзије расхладног флуида са већим разликама температура, односно притисака испаравања и кондензације. Исти ови услови важе и за друге регулационе елементе, који раде на страни ниског притиска, а служе за регулисање температуре испаравања.
- Губици енергије услед рада појединих елемената аутоматике морају бити сведени на најмању могућу меру, да би се сачувала економичност рада топлотне пумпе. То се односи пре свега на падове притиска и поузданост рада уређаја.

Велики број топлотних пумпи може радити са класичном аутоматиком за расхладна постројења, уколико је радни опсег топлотних пумпи исти као и класичних расхладних постројења. Тако на пример топлотне пумпе чија је температура испаравања од -5 до 10 °C, а кондензације до 45 °C, могу користити аутоматику расхладних постројења.

Све ово се односило на аутоматику која се користи у расхладној техници и климатизацији, као и за топлотне пумпе и то на страни расхладног флуида. Остала аутоматика на страни радног медијума топлотног понора и извора, сасвим одговара познатој аутоматици за радне параметре флуида топлотног понора и извора.

Изузетак је регулациони вентил за топлотне пумпе који се користи за промену циклуса. Регулациони вентил за промену циклуса мења правац тока расхладног флуида на страни усиса и потиса компресора, тако да испаривач постаје кондензатор, а кондензатор испаривач. Регулациони магнетни вентил контролише собни термостат за отапање. Магнетни вентил игра улогу пилот-вентила.

2.2.6. Расхладни флуид

Расхладни циклус и топлотна пумпа се не могу посматрати одвојено. Као радне материје се, бар за сада, користе флуиди расхладних система, због чега ћемо их називати расхладним флуидима, иако они, у принципу, у истом циклусу имају нешто другачију улогу. У већини случајева се ради о флуороугљоводонику (фреон), који се по међународној класификацији означава словом R, иза кога стоји одговарајући број. Квалитет расхладног флуида за топлотну пумпу огледа се пре свега у величини односа притисака (температура) испаравања и кондензације и величине топлоте испаравања и кондензације, да би се обезбедио високи коефицијент грејања уз мали проток масе и у физичкохемијским подобностима у спрези са осталим компонентама система.

Табела 4. *Расхладни флуиди* [6]

Расхладни флуид	Замена	Температура кондензације за 26 bar у °C	Температура испаравања за 1 bar у °C
R22	R502, R12	63	-41
R401A	R12	80	-33
R401B	R12	77	-35
R409A	R12	75	-34
R134A	R12, R22	80	-26
R404A	R502	55	-47
R407A	R502	56	-46
R407B	R502	53	-48
R407C	R22	58	-44
ISCEIN 59	R22	68	-43
R410A	R22, R13B1	43	-51
R411B	R12, R22, R502	65	-42
R717 (амонијак)	R22, R502	60	-33
R600a изобутан	R114	114	-12
R290 пропан	R12, R22, R502	70	-42
1270 пропилен	R12, R22, R502	61	-48

Особине расхладног флуида у великој мери утичу на коефицијент грејања, као и степен прегревања на усису. Од расхладних флуида ван породице халогених угљоводоника треба за сада поменути само дехидриран амонијак (NH_3). У објектима где бораве људи, није пожељна примена амонијака као расхладног флуида R7I7 у топлотним пумпама, али у индустријским објектима се врло често употребљава. Особине овог расхладног флуида су веома сличне онима које има R22, и због своје цене још увек је незаменљив у врло великим постројењима, где је велико учешће расхладног флуида [6].

3. Топлотни извори топлотних пумпи

Избор топлотног извора је сложен проблем и зависи од низа познатих и непознатих фактора. Већина топлотних извора је природног порекла, односно налази се у природи. Познавање њихових карактеристика пре и у току експлоатације топлотне пумпе несумњиво је најважнији моменат у избору топлотних извора. Такође, за избор, потребно је утврдити карактеристике топлотног извора с обзиром на корисника топлотног извора.

Да би се топлотна пумпа равномерно снабдевала енергијом, топлотни извор мора имати велики капацитет (издашност). Оно што директно утиче на економичност, јесте велика издашност тог извора која омогућава повишење температуре испаравања. На висину трошкова експлоатације, пресудно утичу физичке особине топлотног извора. Да би трошкови преноса енергије били мањи, специфична топлота треба да буде велика. Улагање у топлотни извор и цена постројења за његову експлоатацију не би требало да буду већи од 20 % од цене постројења топлотне пумпе.

У одређеним условима експлоатације, за топлотни извор треба стално плаћати - или доприносе водоводној организацији, или, рецимо енергију потребну за допремање топлотног извора до топлотне пумпе. Ови трошкови се морају обавезно узети у обзир и не би требало да угрозе економичност и рентабилност топлотне пумпе. Врло важни чиниоци су са гледишта инвестиција и одржавања, механичка чистоћа топлотног извора и неагресивност у односу на инсталацију топлотне пумпе. Често се дешава да потреба за додатним пречишћавањем задржаних и/или агресивних извора топлоте представља тако крупан проблем да елиминише топлотни извор из примене.

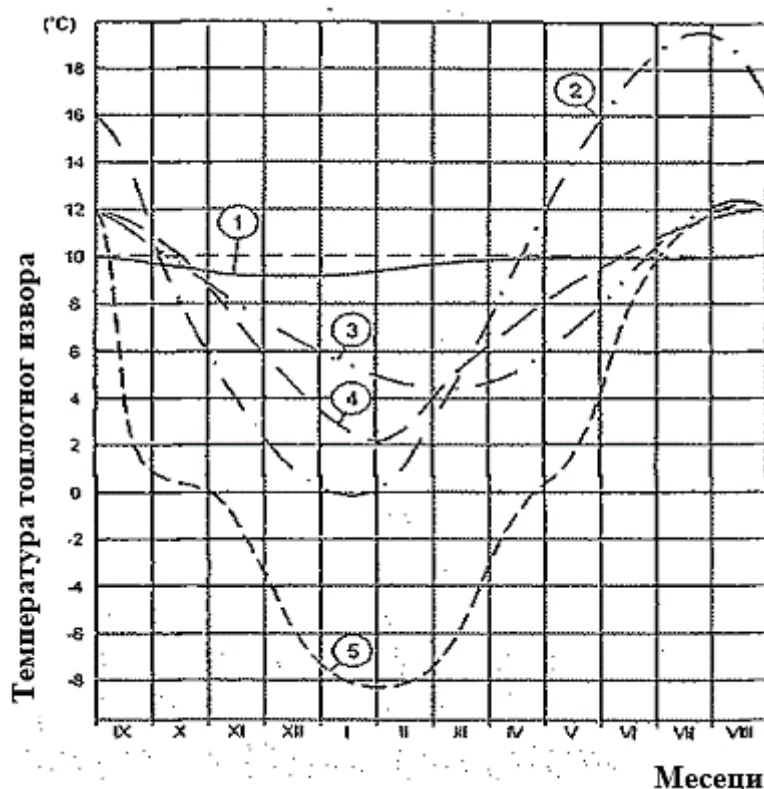
Постизање реалног оптимума је основни услов економичности једног система, па се због тога, ако се не може наћи један „идеалан” топлотни извор, треба прибегавати решењу са комбинацијом више њих. Те комбинације настају са једне стране као последица метеоролошко-географских услова и са друге стране захтева корисника.

За избор топлотног извора, прва идеја је била да то буде земља, јер ваздух као топлотни извор, био је нестабилан. Међутим, пораст производње топлотних пумпи доводи до појаве низа проблема у њиховој монтажи, пре свега оних које као топлотни извор користе земљу. Самим тим долази до смањења производње ових пумпи и израде оних које као топлотни извор користе ипак ваздух. Оне су имале мање коефицијенте грејања, нарочито у крајевима са изузетно ниским спољним температурама. Због свега овога, све се чешће јављају топлотне пумпе чији је топлотни извор вода (50%), а затим ваздух (36%) и земља (7%). Пошто је топлотна пумпа још увек инвестиционо најскупљи топлотни извор, њену величину треба одредити према неком оптимуму, који мора подразумевати локалне метеоролошке услове и намену пумпе, као и сезонску динамику њеног коришћења.

3.1. Природни топлотни извори

Природни обновљиви извори топлоте се налазе у нашој околини и најчешће су „бесплатни”, односно могу се користити без посебне надокнаде. Најбоље од свега је што топлотна пумпа, као и коришћење природних извора топлоте, не загађују човекову околину.

Ови извори немају постојане параметре током целе године, а нарочито не у периоду коришћења топлотне пумпе (када се њоме греју просторије), па се морају посебно и пажљиво анализирати. Промене температуре топлотног извора у току године приказане су на дијаграму 1. Ту се јасно види да најповољнији енергетски параметар - температура топлотних извора није у директној пропорцији са потребама грејања (јануар и децембар месец).

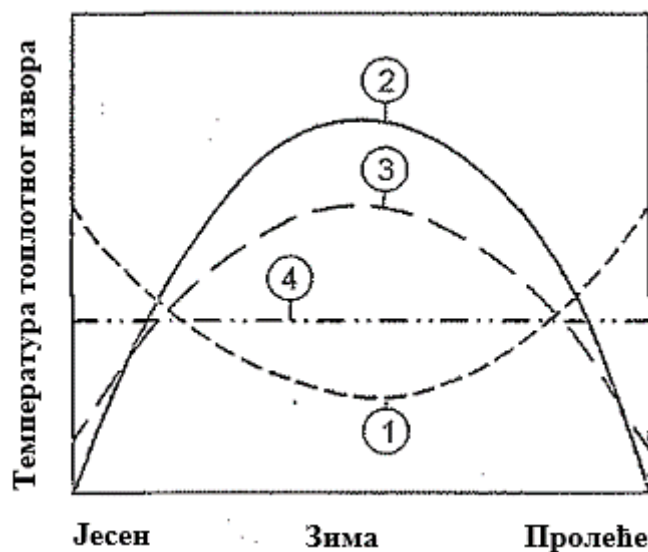


Дијаграм 1. Средња температура природних топлотних извора у функцији годишњег доба [6]

Табела 5. Значење ознака на дијаграму 1

1 - подземне воде
2 - речне воде
3 - воде језера на дубини од 10 m
4 - речна вода на већој дубини
5- околни ваздух

Дијаграм 2 показује могућност топлотног извора са аспекта температурног нивоа да у току целе године задовољи потребе грејања, тј. кохерентност могућности топлотног извора и потреба за енергијом.



Дијаграм 2. Међусобна зависност топлотног извора и годишњег доба

Табела 6. Значење ознака на дијаграму 2

1 - некохерентност топлотног извора (ваздуши)
2 - топлотни губици
3 - кохерентност топлотног извора
4 - температура у грејаном простору

На дијаграму 2, крива означена бројем 2, јесте природа топлотних губитака и показује усаглашеност, односно кохерентност топлотног извора (крива 3) када је потреба за грејањем праћена температурном могућношћу топлотног извора. Насупрот овом, некохерентност за случај ваздуха као топлотног извора (крива 5) одговара неусаглашеним потребама за грејањем и току температурног нивоа у грејној сезони.

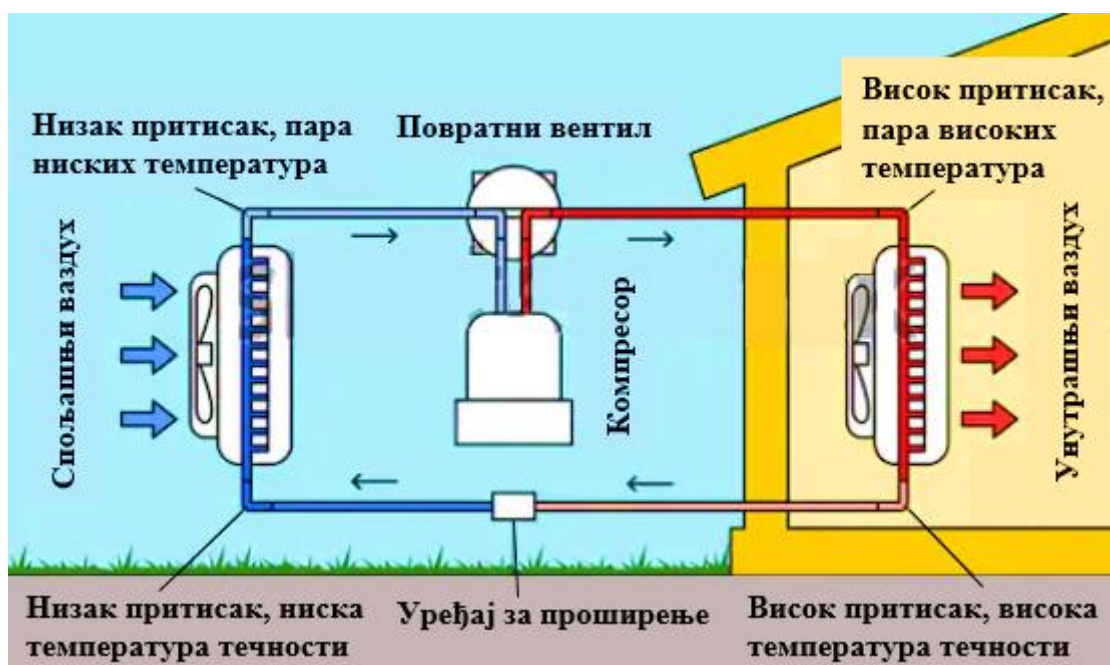
3.1.1. Ваздух

Могућности коришћења ваздуха као топлотног извора су наповољније, јер је то топлотни извор кога има у највећим, боље рећи неограниченим, количинама, који је „бесплатан”. Међутим, његови недостаци као топлотног извора су његова некохерентност, променљивост температуре током године, као и врло неповољне термичке особине. Могу се јавити одређени технички проблеми код избора, односно конструисања и димензионисања испаривача за топлотне пумпе услед ниске специфичне топлоте, малог коефицијента провођења топлоте и стварања леда на нижим температурама. У последње време, решено је доста недостатака, па је самим тим омогућено коришћење топлотне пумпе са ваздухом као извором топлоте, и за снаге преко 50 kW.

Највећи број мањих јединица које су у току досадашњег развоја произведене су баш пумпе које као топлотни извор користе ваздух. То су топлотне пумпе типа ваздух-ваздух, којима се, због одсуства потребе за посредником између топлотне пумпе и топлотног понора, омогућују релативно повољни коефицијенти грејања у већем делу грејне сезоне. На дијаграму 1 се могло видети да овај тип топлотне пумпе има велики недостатак, јер

природа потребе за енергијом грејања не одговара природи расположивог грејног учинка. Међутим, овај период је врло кратак (дијаграм 2) [6].

Топлотне пумпе **ваздух-ваздух** раде по истом принципу на коме раде клима уређаји, једина разлика, а одлучујућа је та да прве функционишу обрнуто у односу на друге. Топлотне пумпе извора ваздуха извлаче топлоту из спољних маса ваздуха и преносе га у компресор унутрашње јединице пумпе. Овај процес се у потпуности заснива на принципу преноса топлоте, који је подржан својством расхладног средства пумпе за снижавање температуре ваздуха који пролази кроз уређај. Дакле, топлотна вредност долазног ваздуха је испод нивоа температуре околине, што доводи до топлотне изолације ваздушне топлоте. Резултат накнадне компресије је брз пораст температуре расхладне течности (расхладног средства), што ствара идеалне услове за пренос произведене топлотне енергије у просторију. Изводи се циклично понављање горе описаног поступка, што осигурава да се топлота која долази из спољног ваздуха преноси у просторију која захтева грејање, пружајући на тај начин економичан и еколошки прихватљив начин за загревање просторија [16].



Слика 16. Топлотна пумпа извора ваздуха (циклус грејања) [17]

На испаривачу се формира лед, када температура испаравања у ваздушној топлотној пумпи падне знатно, испод $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Овај лед утиче пре свега на смањење коефицијента прелаза топлоте и повећава отпор струјању ваздуха, због чега се нагло смањује учинак испаривача, па самим тим и економичност топлотне пумпе. До неравномерније испоруке топлотне енергије кориснику, долази услед чешћег отапања веће количине леда. Разлика између температура околног ваздуха и испаравања је обично између $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, што значи да лед почиње да се ствара при температури спољашњег ваздуха од $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Прекидом рада топлотне пумпе и даљом циркулацијом ваздуха, ако је температура ваздуха изнад $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, лед на испаривачу се отапа. Испаривач постаје кондензатор, односно отапање се мора вршити реверзибилном методом и то када су температуре ваздуха испод $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. То се такође може извршити додатном енергијом или водом. Уколико је температура испаравања изнад $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, настају веће количине влаге, па се у оваквим

ситуацијама могу очекивати и нешто већи коефицијенти прелаза топлоте, са незнатним повећањем струјања ваздуха преко ламела испаривача [6].

Предности топлотне пумпе ваздух/ваздух [16]:

- Топлотне пумпе ваздух-ваздух су универзалне у погледу обезбеђивања грејања током хладне сезоне и хлађења ваздуха у врелим летњим данима.
- Ниски трошкови инсталације. Није потребно бушити бушотине или користити скупу опрему да би се инсталирала топлотна пумпа ваздух-ваздух.
- Ове пумпе поседују значајан капацитет преноса топлоте.
- Нема потребе за уградњом сложених система за дистрибуцију топлоте, попут радијатора или подног грејања.
- Једноставност употребе обезбеђена је аутономним термостатима за контролу климе, који аутоматски прате радне параметре пумпе.
- Укупни трошкови пумпе (трошкови уградње и погона) не смеју да пређу нивое са којим би особа са просечним примањима била у могућности да је угради.
- Топлотне пумпе ваздух-ваздух су веома ефикасне, са њиховим степеном ефикасности (SCOP), који достижу 3,0 - 4,0, што значи да на сваких 1 kW електричне енергије настаје 3 до 4 kW топлоте.
- Позадинска бука пумпе је безначајна и стога не представља фактор сметње за људе који ће се наћи у истој просторији са унутрашњом јединицом пумпе.
- Топлотне пумпе ваздух/ваздух не утичу на унутрашњу климу у соби.
- Грејање објекта топлотном пумпом са извором ваздуха еколошки је прихватљиво. Топлотна пумпа не испушта никакве штетне гасове или компоненте у атмосферу.

3.1.2. Вода

Због својих одличних термодинамичких особина, вода као природни топлотни извор представља идеално решење за топлотну пумпу [6]. Када говоримо о води као топлотном извору за топлотне пумпе, мислимо на топлотну енергију површинских, подземних или отпадних вода [1]. Специфична топлота воде је у односу на ваздух четири пута већа, па је и у јединици масе већа садржина топлоте, те су протоци воде четири пута мањи. Поред тога, коефицијент прелаза топлоте је много већи, што дозвољава знатно мање површине размењивача топлоте. Температуре речних вода зими крећу се од 2 °C до 11 °C, а лети и до 20 °C. Коришћење енергије речних вода за топлотне пумпе у нашој земљи за сада није посебно правно регулисано, док у западној Европи већ постоје прописи о тој примени. Изузетно велико искоришћење енергије из речних вода као топлотног извора, када је водостај река низак, а проток мали, може довести до потхлађивања воде, а тиме и до термичког „загађења”. Мора се предвидети грубо пречишћавање вода, речна вода обично са собом носи чврсте предмете (камење, дрвеће и сл.). Овакво пречишћавање може знатно да смањи трошкове одржавања испаривача. Због непосредног контакта веће количине воде са испаривачем, а тиме и мањих температурских разлика између воде и расхладног флуида, добијају се повољнији коефицијенти грејања од оних када се користе **добошасти** или **плочасти испаривачи**. У оваквим случајевима врло је значајан проблем одржавања водозавхвата и самог испаривача. То подразумева периодично пражњење и чишћење водозавхвата као и чишћење површине испаривача. Због велике количине расхладног флуида и саме

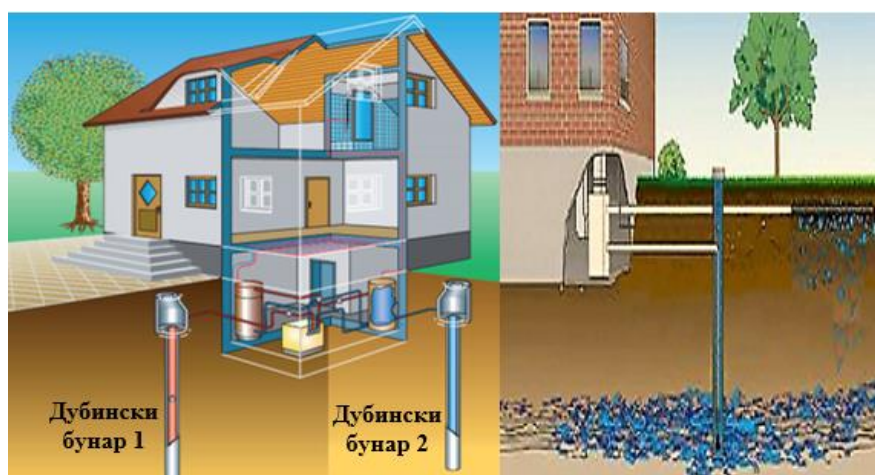
конструкције, овакви испаривачи су врло скупи и не сме се дозволити никакво оштећење које би изазвало застој целог система.

Оно што директно утиче на рентабилност топлотне пумпе, јесте то да уколико се вода транспортује цевима до топлотне пумпе, потребно је оптимизовати пумпно постројење. Вода се обично транспортује цевима постављеним у земљу и оне могу, али не морају, бити изоловане, што зависи од дубине и дужине на којој се постављају. Уколико се искоришћена и потхлађена вода враћа у реку, то треба учинити у низводном току, јер је речна вода обично таквог квалитета да је не треба обрађивати, али треба водити рачуна о њеној нечистоћи.

Језерска вода је по могућностима примене врло слична речној, осим што се због спорог кретања воде, мање користе уроњени испаривачи. У језерској води је чешћа појава алги, па ако се у њу урањају испаривачи, они се раде у облику плоча, ради лакшег чишћења и бољег опструјавања воде. Када се користе добошасти испаривачи, водозахват мора бити посебно изведен, тако да се избегне враћање охлађене воде у њега. Због веома израженог температурног градијента, дубину са које треба узимати воду треба пажљиво одабрати. Ако топлотна пумпа ради у току целе године, потребно је предвидети два усисна отвора, нижи за зимске, а виши за летње услове.

Температуре подземних и бунарских вода до око 20 m дубине, крећу се од 5 °C до 15 °C и више, са малим колебањем у току године. Такође, температура воде зависи од дубине са које се узима и она је стабилнија уколико се вода црпи са веће дубине.

Земљу као топлотни извор врло често користимо преко подземних вода, које се доводе до топлотних пумпи и тиме посредно одводи топлота из земље. За такве системе вода се из земље преко бунара, подземних канала, пукотина и сл., доводи до топлотне пумпе. Карактеристична су три случаја приказана на слици 17. **Први** је када постоји само један бунар из кога се вода узима и враћа. **Други** систем је са два бунара (слика 17а), један служи за изузимање воде, а у други се враћа искоришћена вода. **Трећи** случај је са једним бунаром (слика 17б), при чему се одвођење воде врши у отворене воде (река или језера). Квалитет и квантитет воде, веома су важни за ове системе, и то се мора испитати пре него што се приступи реализацији система. Такве системе третирамо као топлотне пумпе типа **вода-вода** или **вода-ваздух** [6].



Слика 17. Бунар као топлотни извор; а) - систем са два бунара [18], б) - систем са једним бунаром са одводом у површинске воде [6]

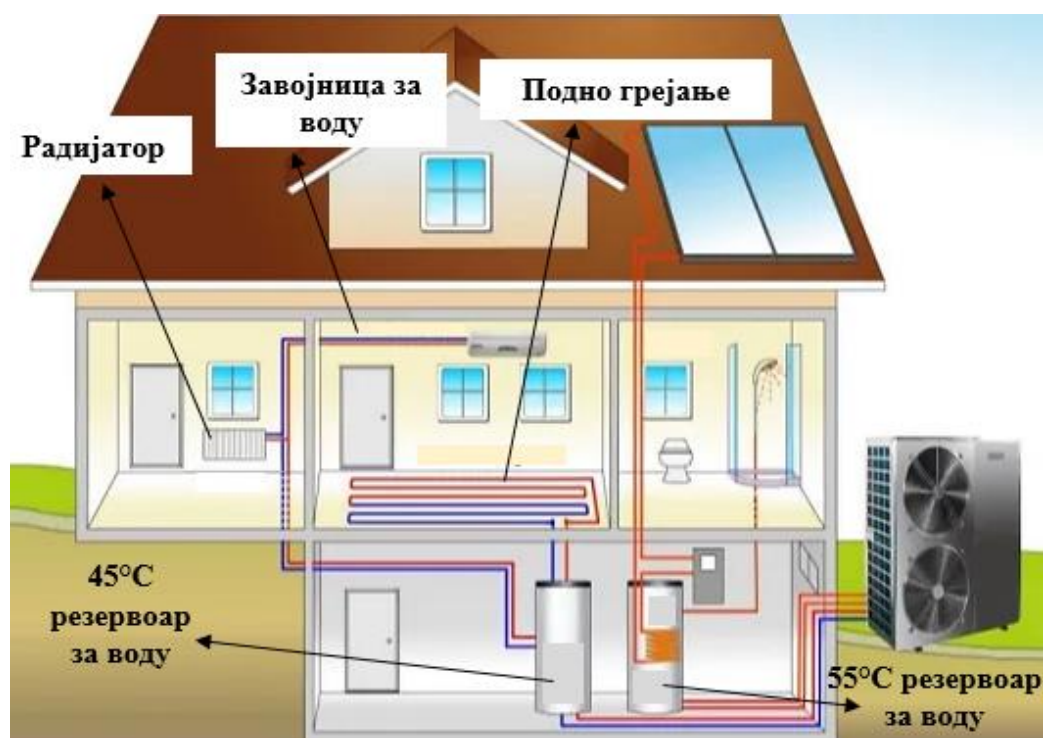
За доношење одлуке о коришћењу подземних вода, обично се врше претходна истраживања и то пробним бушотинама, према којима се утврђују ниво, издашност, температура и састав воде. Прво се ископају један или два бунара, док растојање између бунара треба да буде веће (најмање 15 m), да се не би образовала кратка веза. Веће растојање омогућује да вода прими топлоту земље (геотермалну енергију). Приближно потребна издашност бунара за топлотни учинак од 20 kW је од 2 m³/h до 3 m³/h. Ради одстрањења песка и муља, вода из бунара мора се врло често пречишћавати, нарочито ако се та вода не користи за пиће. Квалитет воде треба да буде у границама максимално дозвољених вредности.

Табела 7. Границе максимално дозвољених вредности

Дозвољене вредности	
Фактор рН	6-8
Оксиди гвожђа	до 1 mg/l
Манган	до 1 mg/l
Слободни СО	до 10 mg/l
Сулфат	до 100 mg/l

У градовима није потребно градити бунар за одвођење воде, јер се градска канализациона мрежа може користити за одвод охлађене воде, али само за мање топлотне учинке. За веће топлотне пумпе мора се правити посебан колектор-прикључак [6].

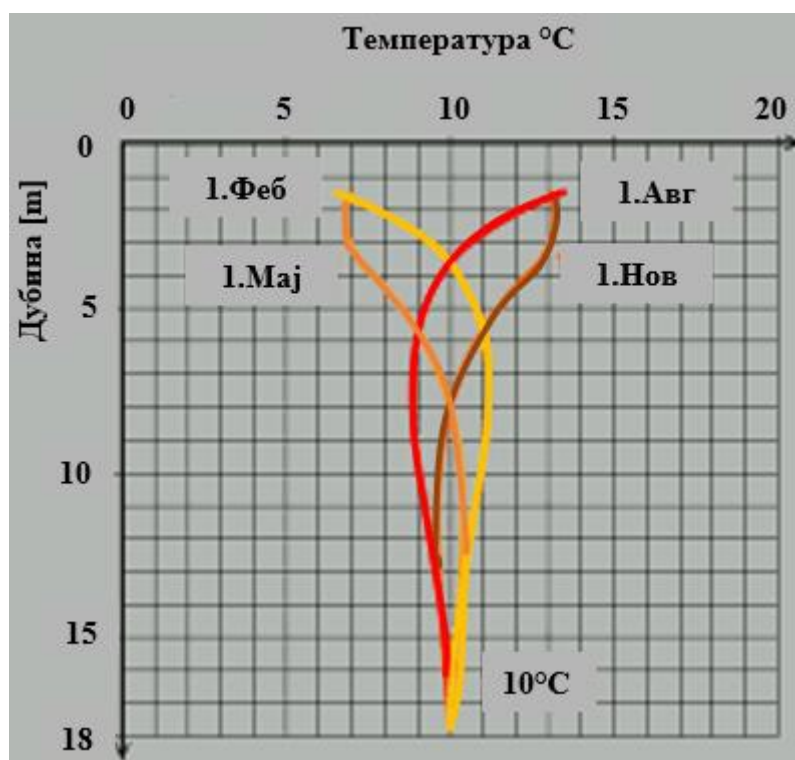
Када је у питању топлотна пумпа ваздух-вода, та енергија се прикупља из околног ваздуха. Код геотермалних пумпи се врши апсорпција топлотне енергије из земље или подземних вода. Прикупљена енергија се догрева у самој пумпи и на тај начин свака пумпа за 1 kW утрошене електричне енергије произведе 3 до 5 kW топлотне енергије [19].



Слика 18. Принципи рада топлотне пумпе ваздух-вода [20]

3.1.3. Земља

Земља, због своје релативно константне температуре током године, погодна је као топлотни извор топлотне пумпе. Има је у великим количинама и у непосредној близини коришћења нису, бар за сада, потребне никакве дозволе за њено коришћење у ову сврху. Површински и подземни делови земље апсорбују топлотну енергију која највећим делом долази од сунчеве енергије која је до тла дошла зрачењем или изменом топлоте с падавинама. С обзиром да су температуре унутар земље током читаве године у распону од 7 °C до 13 °C, земља је добар акумулацијски резервоар, па та чињеница омогућава искоришћавање те енергије током целе године. Температура земље кроз дубину по месецима кроз годину приказана је на слици 19. Геолошким и термодинамичким испитивањима доказано је да се температура до око 10 m дубине тла током године мења док је на већим дубинама размерно стална.



Слика 19. Горња температура земље

За искоришћавање топлоте тла користе се топлотне пумпе земља-вода [1]. Топлотна пумпа, чији је топлотни извор земља, јесте систем који користи измењивач топлоте у облику цевне змије пројектован тако да од земље одводи или у земљу доводи топлоту. Близак контакт са земљом обезбеђен је, обично, једном или више пластичних цевних змија, укопаних вертикално или хоризонтално у земљу [6]. За измену топлоте користе се измењивачи топлоте који се укопавају у тло, а они могу бити **подземни топлотни колектори** или **подземне топлотне сонде**. Флуид, вода, раствор или расхладни флуид, циркулишу кроз цеви преносећи топлотну енергију до измењивача топлоте топлотне пумпе или од њега. У класичној реверзибилној топлотној пумпи размењивач топлоте може бити или испаривач или кондензатор, у зависности од тога да ли се топлотна пумпа користи за грејање или за хлађење [6].

За посредни медијум користе се раствори или гликоли смесе које имају ниско ледиште па онемогућавају смрзавање у цевима и смањивање падова притиска при поласку кроз цеви. Посредни медиј преузима топлоту тла те је предаје радној материји на испаривачу топлотне пумпе [1].

3.1.3.1. Подземни хоризонтални топлотни колектори

Подземни топлотни колектори служе за измену топлоте посредног медијума и површинских слојева тла, до дубине од 2 m, код примене топлотних пумпи земља-вода. Основне перформансе таквих измењивача топлоте су **хоризонтална колекторска поља** (која могу имати серијски или паралелно повезане цеви), **канални** (компактни или колектори у јарку), те **спирални колектори**. Начини извођења земљаних колектора приказани су на слици 20 [1].



Слика 20. Начини извођења земљаних колекторских поља [21]



Слика 21. Примери земљаних колектора [22] [23]

Измењивач топлоте се у тло може поставити у облику снопа водоравних цев на дубини од 1,2 m до 1,5 m, с међусобним размаком цеви од 0,5 m до 1 m, зависно од врсте и

састава тла. Цеви се разводе по секцијама, због опасности од превеликог пада притиска, при чему једна секција не сме бити дужа од 100 m, а све секције требају бити приближно једнаке дужине чиме се постижу идентични падови притиска, а тиме и подједнаке проточне захтеве. Полазна вредност коју користимо код димензионисања подземног топлотног колектора, расхладни је ефекат испаривача на топлотној пумпи.

Пажњу треба обратити на:

- састав тла јер од њега зависи топлотни капацитет, могућност регенерације тла, те измене топлотне расположивости тла као топлотног извора (да ли га можемо користити целу годину или само део године);
- начин рада састава грејања с топлотном пумпом (моновалентан или бивалентан);
- расположиву површину земљишта;
- преформансе, односно начин полагања колектора;
- дужину и димензију (пречник) цеви.

Цеви колектора морају се постављати на дубини од 20 cm – 30 cm испод нивоа смрзавања тла, односно на подручјима где се не очекује смрзавање, најмање на 80 cm дубине, јер у противном постоји опасност од превеликог утицаја на биљни свет. У обзир треба узети могуће смрзавање слојева тла око цеви, што додуше не утиче на измену топлоте, но негативна последица може бити издизање тла изнад колектора, па самим тиме и смањени пренос топлоте.

Све радове на постављању колектора требало би изводити најмање месец дана пре почетка сезоне грејања, како би се тло слегло, те тако омогућило добру измену топлоте. Када се заврши ископавање, да се цеви колектора не би оштетиле, потребно је поставити слој од финог песка у који се постављају цеви. Трака за означавање поставља се 30 cm изнад цеви. Колекторски састав пуни се смесом воде и гликола у размери 70 % – 30 % уз помоћ пумпе, при чему притисак пуњења износи 2 – 2,5 bar. Начин извођења и делови који се користе при извођењу топлотне пуме земља-вода са земљаним колектором приказани су на слици 22 [1].

Подела топлотних пумпи с обзиром на извор топлоте:

Земља као извор топлоте:

- варијанта извођења са **земљаним колекторима**;
- варијанта извођења са **земљаним сондама** [21].



Слика 22. Начин извођења и делови за извођење топлотне пумпе са земљаним колектором [1]

Табела 8. Значење ознака на слици 22 [1]

Земља као извор топлоте
1.Земљани колектор с пластичним цевима (тип: РЕ) полаже се на дубину од 1,2 - 5 m, а цеви су међусобно размакнуте 80 - 160 cm. Једна секција цеви не сме бити дужа од 100 m. Полазна температура 10 °C. Земљана сонда се умеће у предходно избушене рупе дубине сса, 100 m и њена полазна температура износи 10 °C.
2.Топлотна пумпа земља-вода ефикасна је током целе године, с полазним температурама до 60 °C, може се користити за загревање простора (преферира се подно грејање) и потрошне топле воде (ПТВ).
3.Резервоар за складиштење воде користи се хидраулично раздвајање масених протока у кругу топлотне пумпе и додатног котла за централно грејање.

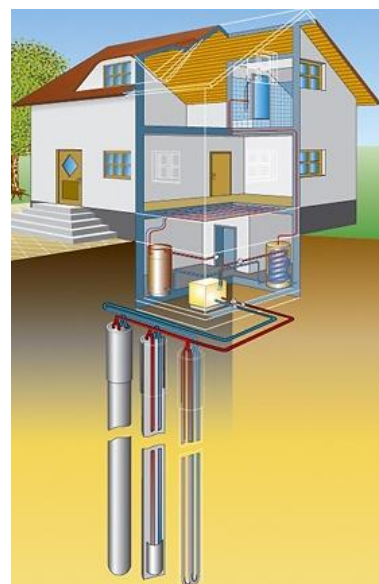
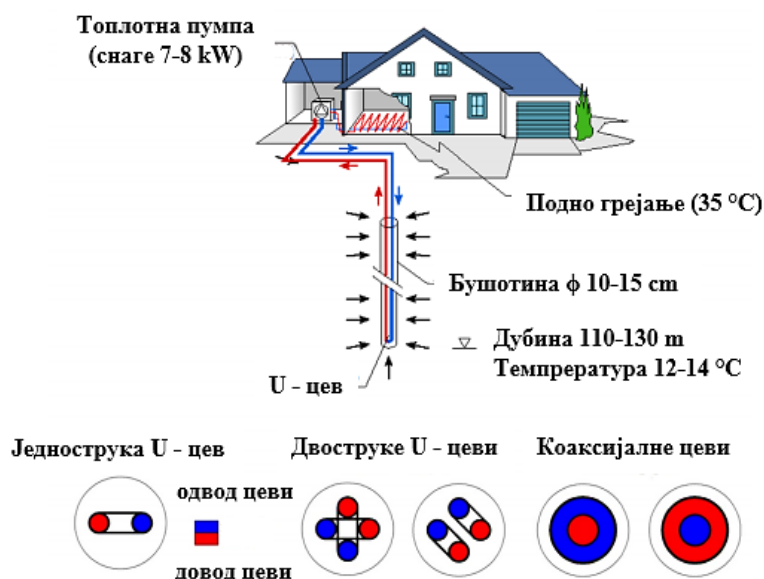
3.1.3.2. Подземне топлотне сонде

Код примене топлотних пумпи земља-вода, подземне топлотне сонде служе за измену топлоте посредног медијума и дубоких слојева тла. Када на располагању нису веће слободне површине земљишта, користе се вертикални измењивачи топлоте. Оно што утиче на дубину, пресек и број бушотина у које се уграђују цеви измењивача, јесу потребе зграде за грејањем или хлађењем.

За постављање земљаних сонди потребно је само неколико сати с модерним уређајима. С обзиром да се бушење изводи изнад 100 m, треба тражити одобрење управе за рударство, најчешће се бушења врше само до те дубине, те су за те дубине надлежни ограни водовода. Дубина и број бушотина у које се уграђују цеви измењивача, зависе од потреба објекта за топлотном те о расхладном учинку топлотне пумпе.

Најчешће извођење подземне топлотне сонде је двострука U - цев од полиетилена, код које кроз један крак улази охлађени посредни медијум из топлотне пумпе, а кроз други се враћа загрејан. Као посредни медијум за подземне сонде такође се користи смеша воде и гликола у размери 70 % - 30 %. Слика топлотне пумпе с подземном топлотном сондом приказана је на слици 23. Специфична топлота коју тло даје подземној сонди променљива је вредност у распону од 25 - 100 W/m дужном, а велики утицај на топлотну проводљивост имају састав и квалитет тла, односно количина воде и порозност.

Након што је бушење изведено и сонда је постављена, међупростор је потребно попунити прикладном смесом - бетонитом. Како би се лакше попунио међупростор бетонитом, сонда се пуни водом, а глава сонде (најнижи део) оптерећује се теретом. Размак између суседних бушотина за сонде дужине до 50 m минимално мора бити 5 m, а за дуже сонде минимално 6 m.



Слика 23. Пример подземне топлотне сонде [24] [1]

Трошкови извођења једног бушења, што укључује постављање сонде, креће се око 50 €/m. Ако се претпостави да дужни метар сонде у просеку даје 50 W, сонда дужине 100 m код које добијемо 5 kW, кошта око 5000 € [1].

3.1.4. Сунчева енергија

О могућностима коришћења сунчеве енергије дуго је размишљано, да би тек у последње време постало предмет озбиљнијих изучавања. Сунце се користи на разне начине, а његова енергија се издваја конверзијом топлоте преко колекторских површина. Количина издвојене енергије директно зависи од сунчевог зрачења. Међутим, пошто је сунчево зрачење обрнуто пропорционално потреби за грејањем, то је директно коришћење овог зрачења за потребе грејања у нашим условима скоро немогуће. Пријемници сунчеве енергије су много ефикаснији у спреси са топлотном пумпом, јер колектори раде са нижим улазним температурама, односно већим степеном искоришћења.

4. Сорпциони расхладни уређаји

Велики број процеса је заснован на сагоревању фосилних горива, где се након производње нпр. паре, одређени део топлоте предаје околини, као отпадна топлота. Отпадна топлота се може искористити за производњу расхладне енергије применом топлотом погоњених чилера или топлотних пумпи, попут оних са апсорпционим расхладним циклусом. У летњим месецима овакви системи могу да смање оптерећење електричне мреже и да позитивно утичу на смањење емисија CO_2 из процеса сагоревања горива и смањење употреба система са фреонима. За коришћење нискотемпературних извора енергије, могу се користити топлотне пумпе за подизање температурног нивоа које користе за тај процес електричну енергију или топлотни извор код пумпи са адсорпцијом паре или сорпцијом гаса, где се користи термохемијска енергија повратне хемијске реакције за промену температурног нивоа доступне топлотне енергије. Општи процес се одвија у две фазе:

- адсорпција/синтеза/продукција и
- десорпција/регенерација/декомпозиција

где је процес синтезе заправо фаза хлађења, након које долази фаза регенерације током које долази до декомпозиције. Топлотом погоњени чилери обезбеђују хлађење за климатизацију простора у стамбеним зградама. За системе климатизације, обично је потребна хладна вода од 6 - 16 °C. Овде су погодни апсорпциони и адсорпциони чилери. У случају примене у прехранбеној индустрији, често треба достићи ниске температуре, нпр. у сврху хлађења (од 0 до -30 °C), па се због тога користе апсорпционе машине амонијак-вода [6].

Расхладна енергија има примену у многим сферама људског живота, нпр. у процесној прехранбеној индустрији, за климатизацију, у фармацеутској индустрији итд. Конвенционални расхладни циклуси, који раде по циклусу са компресијом паре, доносе следеће проблеме када је у питању одрживи развој:

- **доприносе глобалном порасту потрошње примарне енергије:** Традиционални расхладни циклуси захтевају употребу електричне или топлотне енергије, која значајно повећава потрошњу електричне енергије и фосилних горива. По проценама Интернационалног института за хлађење у Паризу (*The International Institute of Refrigeration - IIR/IIR*) око 15 % укупно произведене електричне енергије у свету се користи за хлађење и климатизацију у разним процесима, док је процењена потрошња енергије за климатизацију чак 45% укупне потрошње енергије за стамбене и комерцијалне зграде. Популаризацијом клима уређаја, јављају се вршна оптерећења у летњем периоду.
- **расхладни флуиди који се традиционално користе носе са собом низ последица по животну околину:** Типични расхладни флуиди (фреони) имају негативан утицај на озонски омотач и доприносе глобалном загревању. Након протокола у Монтреалу 1987, тежи се смањењу емисија ових једињења у атмосферу. Европске регулативе 2037/2000, усвојене октобра 2000. указују на низ мера за контролу и смањење употребе свих супстанци које утичу на озонски омотач, и предлаже се забрана употребе ових једињења 2015.

Из наведених разлога, новија истраживања су усмерена ка развоју технологија које нуде смањење потрошње енергије, смањење вршне потрошње електричне енергије, смањење трошкова енергије и сл. Поред овога, води се рачуна о одржавању па чак и побољшању услова комфора за апликације хлађења и климатизације. Један од праваца развоја је и соларно хлађење, које се заснива на употреби сорпционих технологија. Ове технологије нуде низ предности из разлога што њихова примена нема поменуте негативне ефекте конвенционалних расхладних технологија, а поред тога, највећи интензитет соларне радијације тј. највећа доступност соларне енергије, подудара се са периодом највећих потреба за хлађењем.

Соларна енергија се може трансформисати у топлотну или електричну енергију, па применом сорпционих машина, овако добијену енергију је могуће користити у сорпционим расхладним циклусима. У последњих пар деценија ефикасност фотонапонске соларне конверзије се повећала незнатно, (расхладни системи са електричним погоном), ограничава се могућност употребе соларних технологија за погон ових система. Поред овога, цена фотонапонске конверзије је још увек доста висока.

Данашњи системи за хлађење који користе соларну топлотну енергију се углавном заснивају на процесу сорпције:

- процес апсорпције течности и гаса, и
- процес адсорпције чврстог тела и гаса.

Адсорпциони процес подразумева промену фазе супстанце из једне фазе, праћене акумулацијом или концентрацијом на површини друге супстанце. Са друге стране, апсорција је процес где материја прелази из једне фазе у другу (нпр. течну), продирући у другу фазу и стварајући раствор. Уопштено говорећи, главна разлика између апсорпције и адсорпције је у природи сорбента и трајању сорпционог циклуса, који је значајно дужи код адсорпције.

Два главна својства која описију ефикасност соларног сорпционог расхладног система су **коэффициент хлађења (CH)** и **соларног хлађења (CHS)**:

$CH = (\text{расхладна снага}) / (\text{енергија коју систем прими})$

$CHS = (\text{расхладна снага}) / (\text{енергија коју прими соларни колектор})$

Очигледо је да на CHS утиче ефикасност соларног колектора, па је ова величина мања од CH [6].

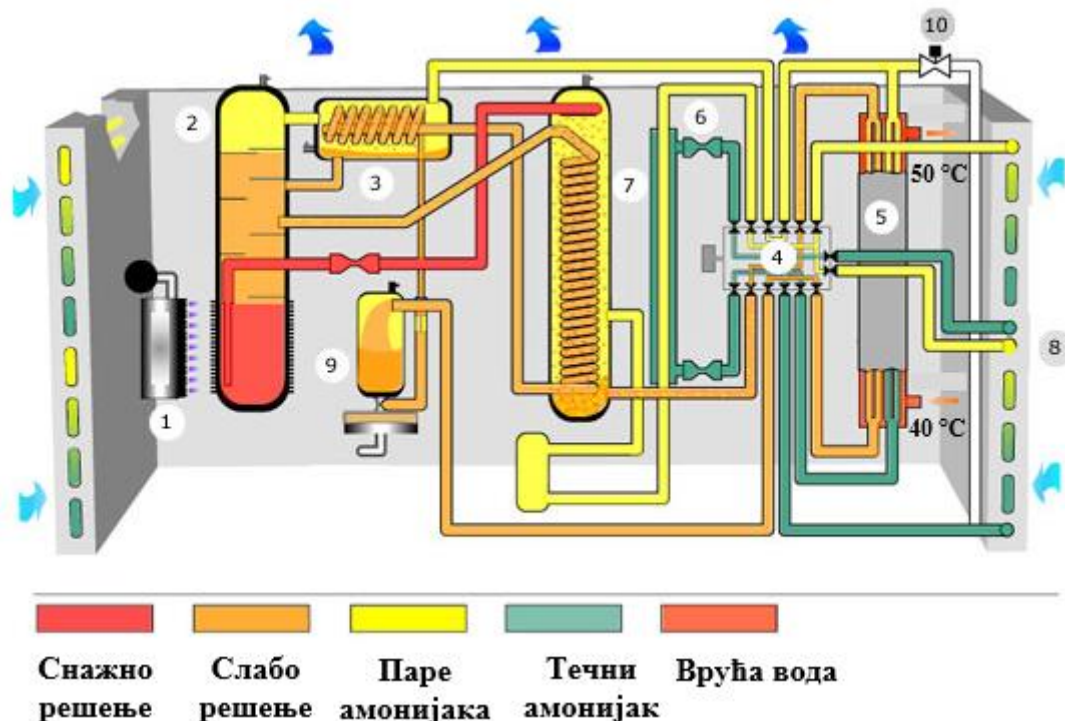
4.1. Апсорпционе топлотне пумпе

Апсорпционе топлотне пумпе су у основи ваздушне топлотне пумпе које не покреће електрична енергија, већ извор топлотне енергије као што су природни гас, пропан, соларно загревања вода или вода са геотермалним грејањем. Пошто је природни гас најчешћи извор топлоте за апсорпционе топлотне пумпе, оне се називају и гасним топлотним пумпама. На располагању су и апсорпциони (или гасни) хладњаци који раде на истом принципу. За разлику од неких апсорпционих топлотних пумпи, међутим, оне нису реверзибилне и не могу служити као извор топлоте.

Стамбене апсорпционе топлотне пумпе користе циклус апсорпције амонијак-вода да би се обезбедило грејање и хлађење. Као у стандардној топлотној пумпи, расхладно средство (у овом случају амонијак) се кондензује у једној завојници ради ослобађања своје топлоте; притисак се затим смањује, а расхладно средство испарава да апсорбује топлоту. Ако систем апсорбује топлоту из унутрашњости дома, обезбеђује хлађење; ако топлотну енергију испушта у унутрашњост дома, обезбеђује грејање. Разлика у апсорпционим топлотним пумпама је у томе што се испарени амонијак не пумпа под притиском у компресору, већ се уместо тога апсорбује у воду. Пумпа са релативно малом снагом може раствор да доведе до већег притиска. Тада је проблем уклањање амонијака из воде, јер топлота у основи испушта амонијак из воде, започињући циклус поново.

Иако се углавном користе у индустријским или комерцијалним окружењима, апсорпциони хладњаци су сада комерцијално доступни за велике стамбене куће, а апсорпционе топлотне пумпе су у развоју. Тренутно доступни систем хладњака од 5 t погодан је само за куће величине 4,000 m² или више.

Хладњаци за апсорпцију и топлотне пумпе обично имају смисла само у домовима без извора електричне енергије, али имају додатну предност у томе што могу да користе било који извор топлоте, укључујући соларну енергију, геотермалну топлу воду или друге изворе топлоте. Такође су подложни системима у којима се различити делови куће одржавају на различитим температурама. Ефикасност расхладних хладњака и извора ваздуха и топлотних пумпи означава се њиховим коефицијентом перформанси (COP). COP је однос одузете топлоте (за хлађење) или топлоте (за грејање) у *Btu per Btu* уноса енергије [25].



Слика 24. Пример реверзибилне топлотне пумпе за апсорпцију гаса [26]

Табела 9. Главне компоненте реверзибилне топлотне пумпе за апсорпцију гаса [26]

Главне компоненте које се користе у реверзибилној топлотној пумпи за апсорпцију гаса	
1. Горионик	Сагоревање природног гаса (или ТНГ-а) покреће „хемијски мотор“ циклуса апсорпције.
2. Генератор	Захваљујући топлотном уносу горионика, амонијак испарава и делови из воде.
3. Комора за испаравање	Паре амонијака се суше. Вода кондензата се враћа у генератор.
4. Повратни вентил	За преокрет циклуса од грејања до начина хлађења и обрнуто.
5. Измењивач топлоте амонијак-вода	Кондензатор апсорбер у режиму грејања, испаривач у режиму хлађења. Тамо се енергија грејања или хлађења преноси у воду хидрауличке петље.
6. Цевни измењивач топлоте у цеви	Користи се за повећање ефикасности циклуса захваљујући унутрашњој размени енергије између врућег течног амонијака (из кондензатора) и хладне паре амонијака (из испаривача).
7. Пред-апсорбер	Овде започиње процес апсорпције. Пара амонијака који долази из испаривача упија се у воду која долази из генератора. Енергија добијена апсорпционим процесом загрева раствор који се враћа у генератор и драстично повећава ефикасност система. Овај поступак се доводи у апсорбер кондензатора.
8. Фин завојница	Ваздушни измењивач топлоте. Кондензатор апсорбер у режиму хлађења, испаривач у режиму грејања када се обновљива бесплатна енергија обнавља из спољног ваздуха.
9. Пумпа раствора	Водени амонијак се пумпа назад у генератор.
10. Вентил за одмрзавање	Када је потребно током хладне сезоне, врућа пара амонијака се прелази у ребрасти завој да би отопио слој леда.

4.1.1. Апсорпциони чилери

Апсорпциони чилери користе циклусе које покреће генератор/апсорбер, уместо компресора, а за добијање топлоте је могуће користити циклус супротног смера. Цевима се доводи топлота у генератор, што узрокује кључање разређеног раствора апсорбента у њему. Пара расхладног флуида сада струји кроз елиминаторе до кондензатора. Овде се расхладни флуид кондензује на спољашњој страни цеви хлађених расхладном водом. Оба процеса се одвијају у посуди са заједничким простором паре на притиску од око 6 кРа. Кондензовани расхладни флуид се транспортује до испаривача, док течни расхладни флуид кључа додирујући спољашњу површину цеви које садже воду, која одаје топлоту потребну за кључање расхладног флуида. На дну испаривача се сакупља расхладни флуид који није прокључао, пумпа се и пропушта поново преко цеви испаривача. Разређени раствор апсорбента који улази у генератор повећава концентрацију док кључа и ослобађа водену пару. Овако добијени јаки раствор

апсорбента тече кроз размењивач раствора где се хлади грејући разређени раствор апсорбента на свом путу ка генератору.

Једностепени апсорпциони чилер у основи ради на исти начин као и код компресионог система са том разликом да је овде компресор замењен колом за раствор које апсорбује пару ниског притиска, а десорбује пару високог притиска. Прегрејану пару која излази из предхладњака апсорбује раствор. Врши се десорпција паре на рачун топлоте високотемпературног извора, тако што пумпа диже притисак раствора до притиска кондензатора. Раствор ниске концентрације се доводи на притисак испаривача провођењем кроз пригушни вентил и враћа се у апсорбер. У апсорберу и десорберу промену концентрације прати промена температуре сатурације (засићења). Ово „клизање” температуре у десорберу тежи да апсорбује топлоту која би у идеалном случају била искоришћена за генерацију паре. У апсорберу, више паре се изгуби него што би се добило из самог процеса апсорпције. Рекуперативни измењивач топлоте се поставља између десорбера и апсорбера како би се смањили ови губици енергије.

Радни флуид је још једна велика разлика између апсорпционог и компресионог система. У већини случајева, компресиони системи користе стандардне расхладне флуиде. Код апсорпционе машине то може бити чисто расхладни флуид, као код система литијум бромид/вода или амонијак/содијум тиоцијанат, или то може бити мешавина, као што је код система амонијак-вода. За овакве мешавине, кондензација представља двофазни процес, где се већина апсорбента регенерише у испаривачу, а расхладни средство се кондензује у кондензатору. Топлота из испаривача се одаје истом понору као и из кондензатора. Расхладни флуид и даље садржи малу количину апсорбента што има мало утицаја на радну температуру испаривача. Израз „једностепени” долази запажањем да би идеална машина обезбедила количину топлоте хлађења једнаку количини топлоте која се добија из генератора. Термодинамички губици условљавају да капацитет хлађења код реалног система буде увек мањи од улазне топлоте [6].

Апсорпциони чилери вода - литијум бромид

Главна хипотеза је следећа: Свака компонента (десорбер, апсорбер, кондензатор и испаривач) је подељена у два елемента који су посуда (која садржи раствор или расхладно средство) и раствор (или расхладно средство). Посуда има генерално двоструку улогу, јер представља и зид за измену између течности за пренос топлоте (извора) и раствора (или расхладног средства). Свака компонента је описана својим геометријским карактеристикама (запремина, површина размене) и физичким својствима (маса, топлотни капацитет, укупни коефицијент размене топлоте). Дакле, постоје варијабле стања за сваку од њих (температура, притисак, масени удео, специфична енталпија...). Стога је хладњак описан упареним системом нелинеарних диференцијалних једначина који је сажет у три следећа баланса:

- **Енергетска равнотежа система:**

$$\frac{dU}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i + \sum_i \dot{m}_i \cdot h_i \quad (12)$$

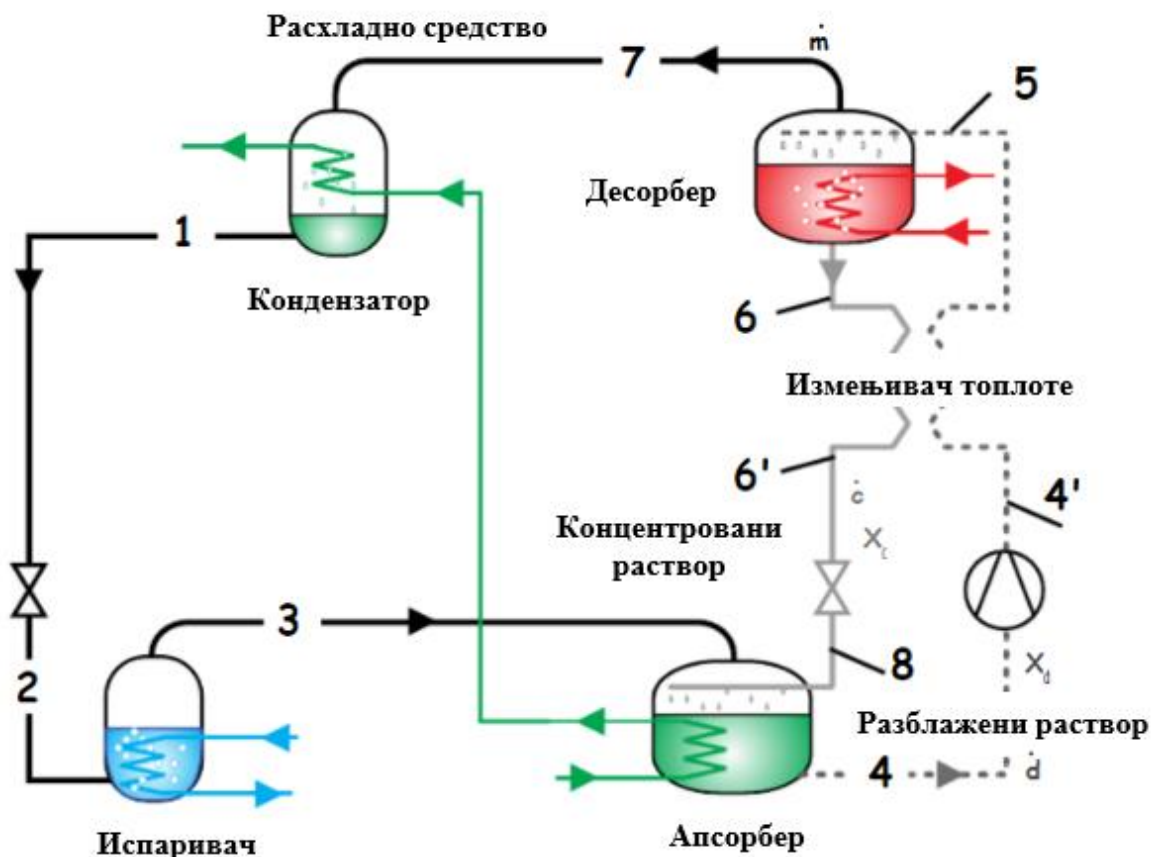
- Равнотежа масе течног раствора:

$$\frac{dM}{dt} = \sum_i \dot{m}_i \quad (13)$$

- Биланс воде:

$$\frac{dM_{H_2O}}{dt} = \sum_i \dot{m}_i \cdot x_i \quad (14)$$

где је U унутрашња енергија [kJ], h_i је специфична енталпија [kJ/kg], x_i је масни удео [/], M је моларна маса [kg], $\dot{m}_i$ су различита брзина протока масе [kg/s] и $\dot{Q}_i$ представља топлотну размену система [kW].



Слика 25. Шема $H_2O/LiBr$ алата за апсорпцију са једним ефектом [27]

Библиотека својстава која се заснива на недавним радовима (Patek и Klomfar 2006 и 2009), коришћена је за приступ свим карактеристикама тачака циклуса и покрива радни опсег циклуса апсорпције са температурама од 273 K до 500 K и масом фракција између 0 % и 70 % [27]. Понашање хладњака је поједностављено захваљујући неколико хипотеза:

- Свака компонента (десорбер, кондензатор, испаривач и апсорбер) може бити представљена следећим елементима:
 - Посуда која садржи раствор;
 - Измењивач топлоте, тј. међупродукт између раствора и извора;
 - Раствор

- У кондензатору и испаривачу, расхладно средство се састоји од чисте воде;
- Термодинамичка равнотежа се претпоставља у свакој компоненти;
- Раствор који напушта компоненту треба да буде засићен;
- Разматра се само конвективни пренос топлоте између медијума;
- Коефицијенти размене су наводно константни;
- Променљиве варијабли (углавном температура, притисак и састав) треба да буду једноличне у простору;
- Термални губици се занемарују.

На пример, ако се ове претходне једначине примене на десорбер машине представљене на слици 25, добија се следећи систем једначина:

$$\begin{cases} \frac{dU_{sol}}{dt} = \dot{Q}_{desorber} + \dot{d} \cdot h_5 - \dot{c} \cdot h_6 - \dot{m} \cdot h_7 \\ \frac{dM_{sol}}{dt} = \dot{d} - \dot{c} - \dot{m} \\ \frac{dM_{H_2O}}{dt} = \dot{d} \cdot X_d - \dot{c} \cdot X_c - \dot{m} \end{cases} \quad (15)$$

Где је $\dot{Q}_{desorb}$ топлотна снага измењена између раствора и измењивача топлоте. Ово последње може се изразити двома једначинама, једна у односу на флуид за пренос топлоте:

$$\dot{Q}_{desorber} = \dot{m}_{desorber} \cdot c_{p_{H_2O}} \cdot (T_{desorber_ulaz} - T_{desorber_izlaz}) \quad (16)$$

А друга у односу на измењивач топлоте:

$$\dot{Q}_{desorber} = UA_{desorber} \cdot \Delta T_{desorber} = UA_{desorber} \cdot \frac{T_{desorber_ulaz} - T_{desorber_izlaz}}{\ln\left(\frac{T_{desorber_ulaz} - T_{desorber}}{T_{desorber_izlaz} - T_{desorber}}\right)} \quad (17)$$

Иста метода се примењује и на три остале компоненте, тј. на апсорбер, кондензатор и испаривач. Оне су сталне из више разлога:

- Постоји прилично мало варијација својстава у испитиваном температурном опсегу;
- Масени проток који би имао утицаја на Ренолдсов број, а затим и на локалне коефицијенте преноса топлоте остаје константан, јер су истражени само номинални услови (у смислу масеног протока) [27].

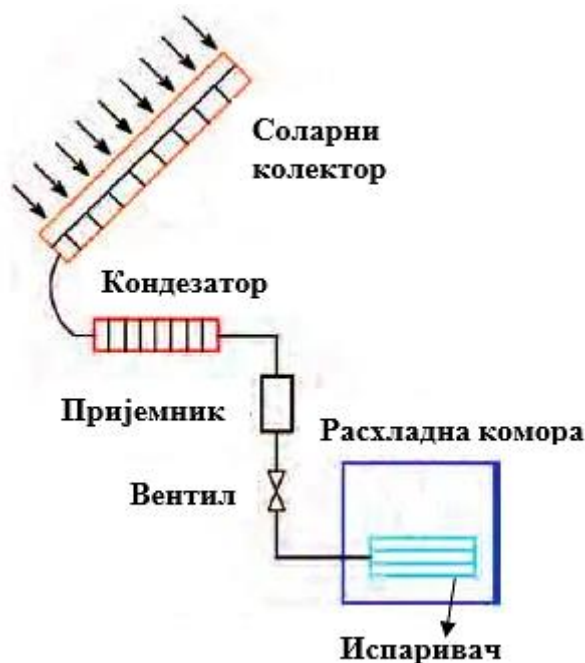
Апсорпциони уређаји амонијак-вода раде по истом циклусу као и чилери вода-литијум бромид. У овом случају се као расхладни флуид користи амонијак, док је вода апсорбент. Услед овога циклус се одвија на већим притисцима. Машине амонијак-вода захтевају високе температуре топлотног извора и могу се користити за индустријско хлађење, производећи температуре испод 0 °C.

За погон апсорпционог система, потребна је топла вода температуре 60 до 75 °C, што се лако може постићи употребом соларних система. У поређењу са једностепеним чилером, двостепени имају приближно исти коефицијент хлађења са конвенционалним системима, док су оперативни трошкови мањи и до 50 % [6].

4.1.2. Адсорпциони системи

Адсорпција је површински процес које се јавља на граничној површини између две фазе, где силе кохезије укључујући Ван дер Валсове силе и силе водоничне везе делују између молекула свих супстанци независно од њиховог агрегатног стања, где површинске или неуравнотежене силе на граничној површини фазне промене доводе до промена у концентрацији молекула на граничној површини између чврсте и течне фазе. Чврста фаза и флуид који је адсорбован се називају **адсорбент** и **адсорбат**.

Адсорпција је увек праћена ослобађањем топлоте, а количина ослобођене топлоте зависи од реда величине Ван дер Валсових сила, промене фазе, електростатичке енергије и енергије хемијских веза. Топлота адсорпције се добија или помоћу изотерми адсорпције, или се добија експерименталним путем калориметријском методом. Овакав уређај се састоји од генератора, кондензатора, пригушног вентила и испаривача. Генератор се састоји од соларне плоче која садржи адсорбент, а коју загрева соларна радијација како би дошло до десорпције расхладног флуида. Структура оваквог уређаја приказана је на слици 26 [6].

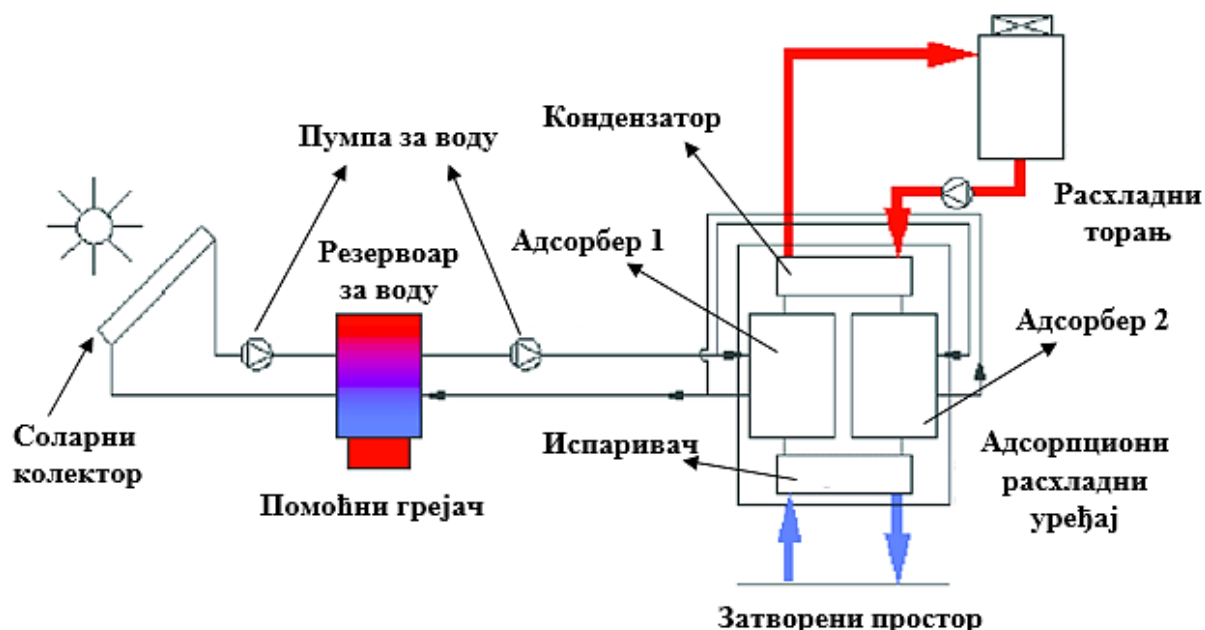


Слика 26. Адсорпциони соларни расхладни систем [28]

Овај расхладни систем је затворени систем који се састоји од соларног колектора који садржи слој адсорбенса, кондензатора, пријемника који је опремљен двосмерним вентилом и испаривачем [28].

Најчешћи случај јесте употреба беспокретног лежишта адсорбента, па у том случају се циклус остварује без употребе покретних делова. Овакво решење нуди рад без буке, механичку једноставност, високу поузданост и дуги радни век. Са друге стране, ово захтева наизменични рад циклуса, при чему долази до промене лежишта адсорбента између адсорпције и десорпције, што утиче на смањени коефицијент хлађења. Према томе, да би било могуће обезбедити константан проток паре из испаривача, тј. непрекидно хлађење, неопходна је фазна употреба два или више адсорбента. Шема адсорпционог расхладног уређаја са два лежишта адсорбента и непрекидним хлађењем

приказана је на слици 27. Док се адсорбер 1 хлади и док је повезан са испаривачем ради постизања ефекта хлађења у испаривачу, адсорбер 2 се загрева и повезан је са кондензатором како би дошло до загревања-десорпције и кондензације, а кондензовани расхладни флуид иде до испаривача преко контролног вентила [6].



Слика 27. Адсорпциони расхладни уређај са два лежишта адсорбента и непрекидним хлађењем [29]

Активни угаљ, силика гел и зеолит су најраспрострањенији адсорбенти, док су вода, метанол (етанол) и амонијак најраспрострањенији адсорбати код адсорпционих расхладних система који користе соларну енергију или отпадну топлоту. Поређењем радних парова 15 адсорбента (12 активних угљева и 3 зеолита) и 4 адсорбата (метанол, етанол, амонијак, вода) под истим условима, најбоље резултате показао је PICASOLV активни угаљ у комбинацији са метанолом. Испаравањем и кондензацијом на температурама -5 тј. 30 °C респективно, постиже се коефицијент хлађења овог циклуса и он износи 0.55. Друга истраживања поређења радних парова, активни угаљ/метанол, активни угаљ/амонијак и зеолит/вода показују да радни пар зеолит/вода даје најбоље резултате за примену адсорпционог уређаја у системима климатизације, док је радни пар активни угаљ/амонијак добар за производњу леда, хлађење и чување хране. Максимални могући соларни коефицијент хлађења је 0.3 за циклусе зеолит/вода, 0.19 за циклусе активни угаљ/амонијак и 0.16 за циклусе активни угаљ/метанол, у комбинацији са равним соларним пријемницима.

Ипак, ниједан од ових радних парова није идеалан за практичну примену. Главни недостатак ове технологије су лоше карактеристике преноса масе и топлоте лежишта адсорбента. Адсорбент, попут активног угља, зеолита или силика гела има малу топлотну кондуктивност и лошу порозност. Последица овога је неопходност израде гломазног колектора, генератора и адсорбера, што повећава њихов топлотни капацитет и самим тим смањује коефицијент хлађења. Ови проблем су предмет данашњих истраживања широм света. Постоје различита решења, попут употребе дискова израђених од активног угља, који се смештају у цев са унутрашњим оребрењем, чиме се повећава топлотна кондуктивност и контакт са металним елементима.

Анализа параметара соларног колектора и параметара климатских прилика на рад соларног адсорпционог система за хлађење показала је да би транспорт топлоте и топлотна кондуктивност лежишта адсорбента могла да се побољшају додавањем упакованог адсорбента веће густине, применом дуплог застакљења, употребом стакла са селективним премазом и применом оребрења за повећани транспорт топлоте.

Још једна од метода за повећање транспорта топлоте материјала јесте употреба консолидованог адсорбента. Ови материјали имају врло добра својства у погледу транспорта топлоте, што нуди нове могућности за производњу компактнијих адсорпционих машина.

Табела 10. *Вода-силика гел адсорпциони чилери*

Вода-силика гел	
Расхладни флуид	Вода
Адсорбент	Силика гел
Температура расхладне воде	6-15 °C
Улазна температура топлог флуида	60-90 °C
COP (Коефицијент перформанси)	0.5-0.7

Многа истраживања врше се пре свега са циљем повећања COP (коефицијент перформанси) вредности адсорпционих топлотних пумпи као и да се обезбеди континуитет у процесима грејања и хлађења. Континуитет процеса грејања и хлађења се најчешће постиже повећањем броја адсорбера. Повећање COP-а се постиже регенерацијом и применом топлоте, која се преноси током изохорског хлађења (c-d) и изобарске адсорпције (d-a) у другом адсорпционом циклусу. На овај начин се повећава COP циклуса, јер се смањује количина доведене топлоте. Сложени адсорпциони циклуси се могу поделити у 2 групе. Примена адсорпционих топлотних пумпи има своје посебне проблеме и потешкоће.

Неки од проблема су наизменичан начин рада, примена високих технологија за рад са великим подпритиском (вакуумом) и дизајн лежишта адсорбента где се паралелно одвијају пренос масе и топлоте. Тренутно су сва истраживања у овој области усмерена на развој таквог система топлотних пумпи, које ће моћи технички и економски да постану озбиљна алтернатива конвенционалним системима.

Циљ истраживача је да развију адсорпциону топлотну пумпу:

- са континуалним процесом грејања тј. хлађења;
- да има високу COP вредност;
- да може да функционише са извором ниже температуре;
- да поседује практичан дизајн у погледу конструкције и апликације.

Када су у питању индустријски процеси, постоји више процеса попут сушења, дестилације, испаравања, кондензације где долази до великих промена енталпије те се овакви уређаји могу применити. Могућности примене се могу класификовати на: хлађење, грејање (топлотна пумпа), комбинована производња топлотне и расхладне енергије, подизање температурног нивоа топлотног извора, акумулација топлотне/расхладне енергије, и интеграција соларних топлотних колектора за потребе грејања и хлађења.

Данас постоји више радних парова за апсорпционе/адсорпционе системе. На пример, зеолит-вода, АС-метанол, угљеник-амонијак. Карактеристике адсорпционих и апсорпционих система приказане су у табели 11.

Табела 11. Перформансе различитих радних парова који се користе у адсорпционим и апсорпционим системима

Радни пар	Примена	Температурни опсег (нижи/виши температурни извор)		COP/ексергетска ефикасност
АС - метанол	Производња леда	-25°C/130°C	-10°C/110°C	0,15 (нето COP)
АС - метанол	Производња леда	-6°C/28°C	-24°C/87°C	0,08-0,12 (соларни COP)
АС - метанол	Производња леда	-5°C/25°C	25°C/110°C	0,12 (нето са соларним системом)
АС - метанол	Климатизација	5°C/20°C	30°C/80°C	0,35
Зеолит NaX/вода	Климатизација	25°C/35°C	105°C/220°C	1,06
Зеолит NaX/вода	Производња леда	-5°C/25°C	25°C/110°C	0,3
Зеолит NaX/вода	Производња леда	-10°C/170°C	+10°C/170°C	0,44/21 0,48/0,11
Зеолит NaX/вода	Акумулација расхладне ен.	-10°C/170°C	+10°C/170°C	0,1 (COP за рад у соларном систему)
Зеолит NaX/вода	Климатизација	22°C/42°C	60°C/200°C	0,75
CaCl ₂ + NH ₃	Производња леда			0,10 (COP за рад у соларном систему)

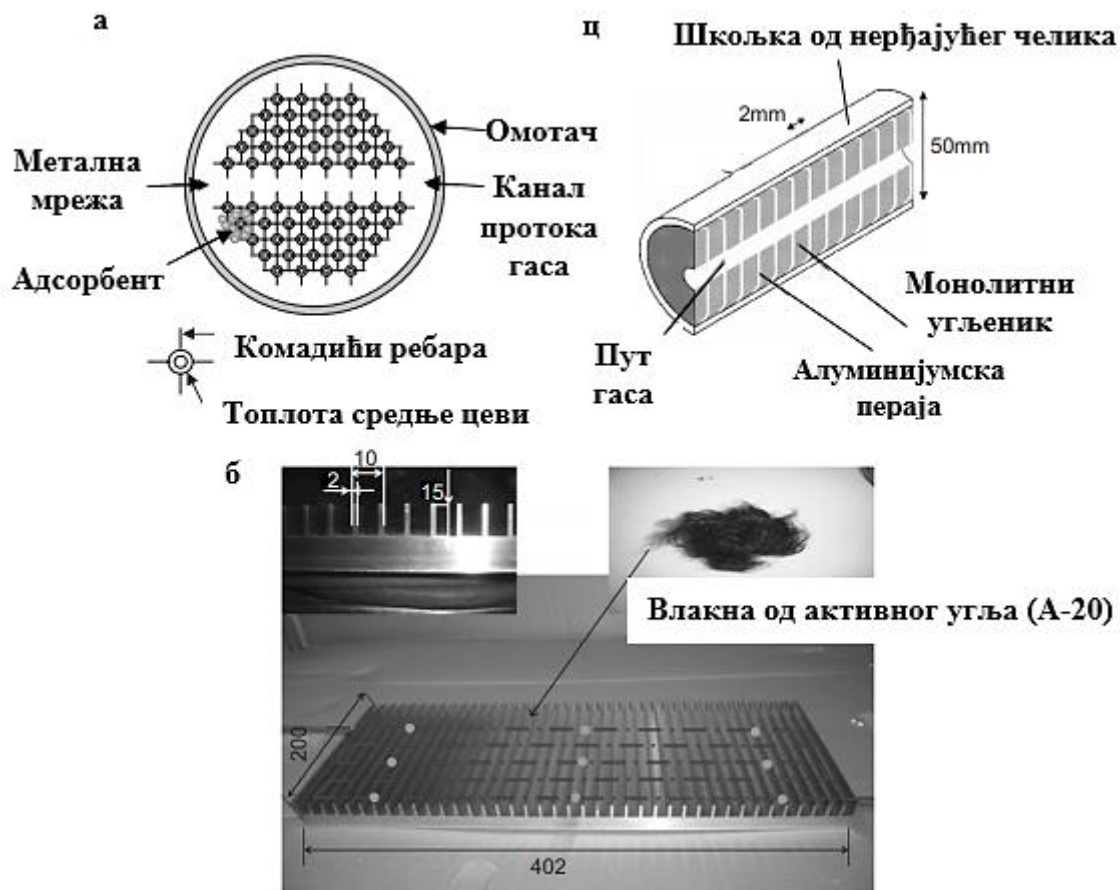
За многе парове адсорбент-адсорбат циклуса адсорпционе пумпе се одвија под великим подпритиском. Тешко је одржати радни притисак у великом вакууму (подпритиску) дуже време. Ово изискује технологију вакуума, специјалне материјале и кућишта, што све повећава цену адсорпционих топлотних пумпи и условљава употребу тежих контејнера. Нека истраживања су вршена са циљем проналажења система који може да функционише у условима средњег притиска испаравања и кондензације.

Конструкција лежишта адсорбента је такође један од битних фактора о којима треба водити рачна када су адсорпционе топлотне пумпе у питању. Да би могао да се контролише пренос масе и топлоте, лежиште адсорбента захтева посебну конструкцију. Теоријска испитивања су показала утицај кинетике преноса масе и топлоте на перформансе система адсорпционе топлотне пумпе. Како је пренос топлоте кондукцијом код адсорбената генерално мали, топлота се преноси споро кроз лежиште адсорбента како периоди процеса адсорпције и десорпције постају дужи. Пренос масе зависи од струјања адсорбата кроз лежиште адсорбента (међучестично струјање) и кроз адсорбент (међучестична дифузија услед разлика концентрације, молекуларна дифузија, Кнудсен дифузија и површинска дифузија). Решавањем једначине преноса топлоте и масе за адсорбер, одређују се профили температуре и концентрације у лежишту адсорбента.

Главне једначине за транспорт топлоте и масе се упарују и требало би их симултано решавати. Резултати пружају важне информације за конструкцију лежишта адсорбента за процену капацитета адсорпције за дати период. Такође, вршена су и експериментална испитивања са циљем побољшања стопе преноса масе и топлоте у лежишту адсорбента. Класификација лежишта адсорбента може извршити према форми адсорбента.

4.1.2.1. Адсорбер необложеног типа

Код ове врсте лежишта адсорбента се обично користи пелет, грануле или адсорбент за влакна. Адсорбент се не третира и не користи онако како је примњен од произвођача. Међутим, постоје нека истраживања у којима се адсорбент формира до одређеног облика. Адсорбат се креће у празнинама између пелета или гранула, а затим се адсорбује у адсорбенту. На основу порозности лежишта, конвекција и дифузија адсорбата између пелета могу се размотрити или уклонити у једначинама преноса топлоте и масе. Ребра се могу употребити за повећање стопе преноса топлоте у лежишту, међутим, стопа преноса масе кроз лежиште се повећава прављењем шупљина у лежишту. Неки примери адсорбера необложеног типа приказани су на слици 28.



Слика 28. Необложени тип конструкције адсорбера [6]

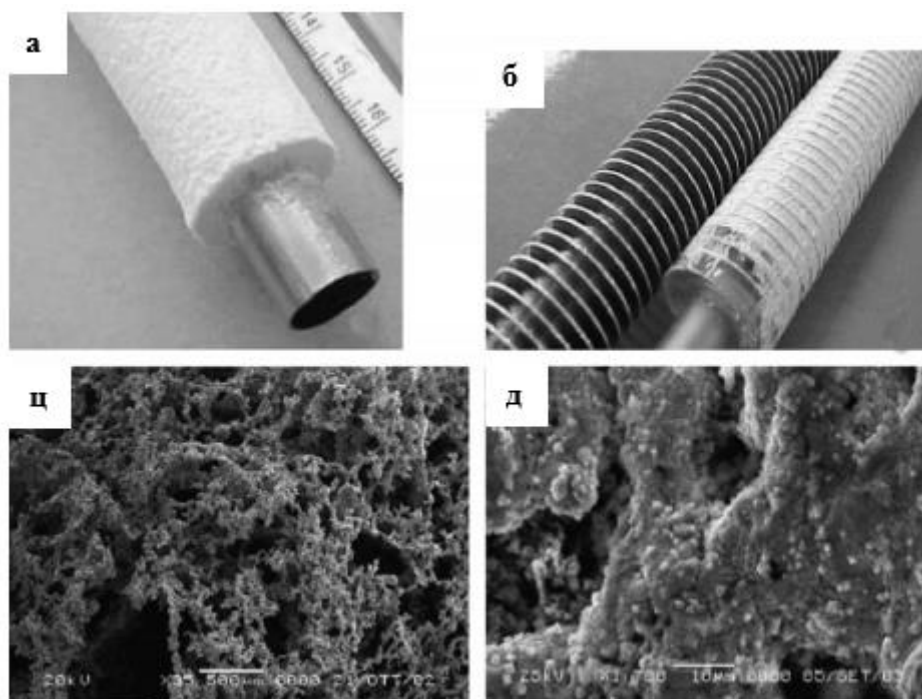
Слика 28а, показује танак лимени затворени цеваста адсорбер конструисан са циљем побољшања преноса топлоте (Gui et. Al.) [6]. Активни угаљ се користи као адсорбент који се поставља међу цеви које се користе за грејање и хлађење. Комади ребара на епруветама повећавају брзину преноса топлоте од цеви до активног угља, јер је површина преноса топлоте повећана. Влакна од активног угља имају већи укупни

волумен пора, површину и капацитет адсорпције у односу на честице силика гела. Штавише, изотерма адсорпције/десорпције показује да влакна активног угља немају адсорпциону/десорпциону хистерезу. Влакна од активног угља су чврсто спакована унутар бакарних пераја без кисеоника, као што је приказано на слици 28б [30].

4.1.2.2. Адсорбер обложеног типа

Код оваквог типа адсорбера, адсорбент је у облику слоја (облоге), који обавија цев, ребро или у облику металне пене. Овакав тип лежишта адсорбента обезбеђује велике брзине преноса масе и топлоте. Узима се да је дифузија у овом случају главни механизам преноса масе, јер нема шупљина у омотачу адсорбената.

На слици 29а је приказана обложена челична цев са адсорбентом ради побољшања степена преноса масе и топлоте у лежишту. Оваква метода дозвољава добијање адсорпционе пумпе велике специфичне снаге. Дизајнирано је лежиште адсорбента (*Resstucia et. Al*) које се састоји од оребрених цеви које покрива адсорбент SWS-1 L (CaCl_2 у полупорозном силиконском гелу), што је приказано на слици 29б [6]. Оптимално време циклуса система је 20-40 min, а COP хлађења варира од 0,17 до 0,48. Бонакорси (*Bonaccorsi et. Al.*) је припремио бакарну пену са отвореним ћелијама као металну потпору за лежиште адсорбента што је приказано на слици 29ц [6]. Цеолитни адсорбент се добија хидротермалном синтезом на овој металној потпори, као што је приказано на слици 29д.



Слика 29. Фотографије лежишта адсорбента са облогом [6]

Уколико индустрија расхладних уређаја и топлотних пумпи не дође до неког решења за радне флуиде, механичке топлотне пумпе ће услед еколошких проблема доживети озбиљну кризу у будућности. Апсорпционе топлотне пумпе представљају озбиљну алтернативу конвенционалним (механичким) топлотним пумпама, јер не садрже било какве материје штетне по околину. Једна од предности адсорпционих топлотних пумпи је рад са топлотним извором и практично рад са отпадном топлотом. COP адсорпционих

топлотних пумпи није висок у поређењу са осталим типовима топлотних пумпи. Оне имају друге проблеме и потешкоће када је реч о њиховој конструкцији и производњи, као што су незаптивање, велики вакуум (подпритисак), слаб пренос масе и топлоте. Међутим многа истраживања су усмерена проналажењу иновативног дизајна и циклуса да би се ови проблеми превазишли као и да би се повећао COP. Истраживања су такође сконцентрисана и на решавање проблема заптивања и великог вакуума на притисцима адсорпционе топлотне пумпе. Трага се за новим дизајном лежишта адсорбента да би се повећали пренос масе и топлоте који директно утичу на ефективност система [6].

5. Примена топлотних пумпи у зградарству

Топлотне пумпе су решење за обезбеђивање грејања и топле воде у стамбеним зградама, како у самим, тако и у породичним кућама. Зависно о локалној грађевинској традицији, топлота се дистрибуира путем водених система (радијатори, подно грејање) или преко уређаја за климатизацију (канализацијски или канални системи).

Замена нафтних и гасних котлова у постојећим зградама је највећи изазов, јер корисници често не виде додатну вредност улагања у тренутно обнављање зграде. За процену погодности технологије топлотних пумпи потребни су стручни савети: у неким случајевима су доступна решења топлотних пумпи, али највероватније је потребно користити „хибридне“ топлотне пумпе. Хибридни системи комбинују топлотне пумпе са другим технологијама (соларна термална енергија, биомаса, гас, нафта) и обећавају мост у будућности, јер могу искористити њихове предности: током највећег дела сезоне технологија топлотних пумпи може ефикасно да обезбеди грејање и топлу воду, док се сагоревање користи за пружање ових услуга током веома хладних зимских периода. Ако је у каснијој фази облога зграде обновљена, тада је решење само са топлотном пумпом изводљиво и пожељно [31].

Топлотне пумпе за грејање и хлађење зграда могу се поделити у четири главне категорије у зависности од њихове радне функције:

- **Топлотне пумпе само за грејање, које обезбеђују грејање простора и/или грејање воде.**
- **Топлотне пумпе за грејање и хлађење, пружајући и грејање и хлађење простора.** Најчешћи тип је реверзибилна топлотна пумпа ваздух-ваздух, која ради или у режиму грејања или хлађења. Велике топлотне пумпе у комерцијалним/институционалним зградама користе петље воде (хидронске) за дистрибуцију топлоте и хладноће, тако да могу обезбедити грејање и хлађење истовремено.
- **Интегрисани системи топлотних пумпи, који обезбеђују грејање простора, хлађење, грејање воде и понекад поврат рекуперације топлоте.** Загревање воде може бити само снижавање температуре или снижавање температуре и кондензаторско грејање. Ово допушта грејање воде када није потребно грејање или хлађење простора.
- **Грејачи воде са топлотном пумпом, потпуно намењени грејању воде.** Они често користе ваздух из непосредног окружења као извор топлоте, али могу бити и топлотне пумпе за исцрпљивање или снижавање температуре на топлотним пумпама ваздух-ваздух и вода-ваздух. Топлотне пумпе могу бити и једновалентне и двовалентне, где моновалентне топлотне пумпе саме задовољавају годишњу потребу за грејањем и хлађењем, док бивалентне топлотне пумпе имају димензије за 20-60 % максималног топлотног оптерећења и задовољавају око 50-95 % годишње потребе за грејањем (у европској резиденцији). Врхунско оптерећење задовољава помоћни систем грејања, често гасни или уљни котао. У већим зградама топлотна пумпа се може користити у тандему са когенерацијским системом (СНР).

У стамбеним просторијама топлотне пумпе за ваздух могу бити реверзибилне топлотне пумпе ваздух-ваздух (постављене без канала или раздвојене јединице). Топлотна пумпа се такође може интегрисати у систем за одвод ваздуха или хидраулички систем за дистрибуцију топлоте са подним грејањем или радијаторима (централни систем). У комерцијалним/институционалним зградама систем топлотних пумпи може бити централна инсталација повезана са ваздушним каналом или хидронским системом, или више зонски систем где се више јединица топлотних пумпи поставља у различите зоне зграде како би се обезбедило индивидуално кондиционирање простора. Ефикасан у великим зградама је систем топлотних пумпи са воденом петљом, који укључује затворену петљу воде са више топлотних пумпи повезаних на петљу да би се обезбедило грејање и хлађење, са расхладним торњем и помоћним извором топлоте као резервом.

Системи за дистрибуцију топлоте и хладноће

Ваздух је најчешћи дистрибутивни медијум на тржиштима топлотних пумпи Јапана и Сједињених Држава. Он се или директно уноси у просторију помоћу јединице за климатизацију простора, или се дистрибуира преко система за усисавање ваздуха. Излазна температура система за дистрибуцију ваздуха је обично у распону од 30-50 ° С.

Системи за дистрибуцију воде (хидронски системи) претежно се користе у Европи, Канади и североисточном делу Сједињених Држава. Конвенционални радијаторски системи захтевају високе температуре расподеле, обично 60 - 90 °С. Данашњи нискотемпературни радијатори и конвектори дизајнирани су за максималну радну температуру од 45 - 55 °С, док је 30 - 45 °С типично за системе подног грејања. Табела 12 резимира типичне температурне потребе за различите системе дистрибуције топлоте и хладноће.

Табела 12. *Типичне температуре испоруке за разне системе топлотне и хладне дистрибуције*

Апликација		Распон температуре довода (°С)
Дистрибуција ваздуха	Грејање ваздухом	30 - 50
	Подно грејање; ниска температура (модерно)	30 - 45
	Радијатори	45 - 55
	Високотемпературни (конвенционални) радијатори	60 - 90
	Даљинско грејање - топла вода	70 - 100
Даљинско грејање	Даљинско грејање - топла вода/струја	100 - 180
	Охлађен ваздух	10- 15
Хлађење простора	Охлађена вода	5 - 15
	Даљинско хлађење	5 - 8

Будући да топлотна пумпа делује најефикасније када је разлика у температури између извора топлоте и хладњака (систем дистрибуције) мала, температуру расподеле топлоте

за топлотне пумпе за грејање у простору треба одржавати што је могуће ниже током сезоне грејања.

Табела 13 приказује типичне COP-ове за топлотну пумпу вода-вода која ради у различитим системима за дистрибуцију топлоте. Температура извора топлоте је 5 °C, а ефикасност топлотне пумпе *Carnot* је 50 % [32].

Табела 13. Пример како COP топлотне пумпе вода-вода варира у зависности од температуре расподеле/повратка [32]

Систем дистрибуције топлоте (температура напајања / повратка)	COP
Конвенционални радијатори (60/50 °C)	2.5
Подно грејање (35/30 °C)	4.0
Модерни радијатори (45/35 °C)	3.5

Карактеристике топлотне пумпе чине их идеалном технологијом за било који тип зграде са довољном површином за расподелу топлоте да би се омогућиле угодне температуре у затвореним просторијама при релативно ниским температурама система за дистрибуцију топлоте. Ови захтеви су испуњени у свим новим зградама, укључујући енергију „near-zero”, „пасивне” куће и енергетске „плус” конструкције зграда. Слично томе, топлотне пумпе могу заменити котлове при дубокој обнови зграда.

Иако су зграде у близини нулте енергије стандард за нове зграде од 2021. године надаље, побољшања технологије ће довести до смањења потражње енергије у постојећим зградама, непрекидно повећавајући удео зграда погодних за постављање топлотних пумпи.

Што је грађевински омотач боље изолован и што је више затвореног простора, то је вероватније да ће захтеви за комфором корисника укључивати и услуге вентилације и хлађења. У влажној клими биће неопходно и одвлаживање ваздуха у згради да би се обезбедио комфор у унутрашњости. Присилни вентилациони системи укључују филтере за ваздух и на тај начин доприносе бољем квалитету ваздуха у затвореним просторима. У случају да се користе специфични филтери, ово је посебно важно за становнике алергичне на полен или за оне који живе у подручјима са високом загађеношћу ваздуха.

Комбиновани ефекат мање потражње енергије, додатне услуге, а очекује се да ће мали отисак система резултовати конвергенцијом између вентилационих система и решења за грејање, климатизацију и топлу воду. Ово захтева напоре за унапређење нивоа вештина стручњака за изградњу интегрисаних решења. Системи топлотних пумпи могу да интегришу све функције потребне за угодну климу у затвореном простору: грејање, хлађење, топла вода и одвлаживање.

У комерцијалним просторима треба обезбедити угодне собне температуре и чист свеж квалитет ваздуха да би се створило пријатно и продуктивно окружење. Од болница до пословних зграда потребно је загревање/хлађење/одвлаживање ваздуха и потребна је топла вода. Велики системи топлотних пумпи су решење за ове примене. У прошлости су котлови пружали расхладне уређаје за топлоту и климатизацију, а расхладна опрема; сада постоје додатне користи од интегрисања топлотних пумпи. Отпадна топлота од хлађења може бити извор енергије за грејање и за обезбеђивање топле воде, што последично затвара енергетске циклусе; и укупна потрошња енергије у згради може да

се смањи. Ово се може додатно продужити када је потражња за грејањем и хлађењем избалансирана кроз зграде кроз енергетске мреже.

Комерцијално грејање, хлађење и климатизација комбинују бројна решења како би понудили најбоље корисничко искуство:

- Велики енергетски захтеви често су покривени геотермалним бушењем, везом са темељима зграда или системима отворене петље;
- Хлађење се врши од ваздушних јединица које се налазе на или у близини зграде или употребом воде (водоносници, отворени водотоци, отпадне воде);
- Грејање/хлађење у згради обично се врши помоћу вентилатора, подног/зидног грејања или подова од активног бетона (под/строп);
- Отпадна топлота од хлађења може се користити као извор енергије за производњу топле воде у домаћинству;
- Комерцијалне зграде имају широку инфраструктуру за дистрибуцију енергије која се састоји од система воде и ваздуха.

Правилним дизајном топлотних пумпи за грејање, хлађење, одvlaживање и производњу топле воде користе се карактеристике система са топлотном пумпом на најјефикаснији начин. Ако су повезани са даљинским енергетским системима, складиштењем топлоте или другим могућностима балансирања, таквим системима више нису потребни уређаји за хлађење на крову и остављају горњи простор за друге случајеве употребе као што су PV, соларни топлотни системи или кровне решетке [31].

Одрживо подгеотермално грејање топлотном пумпом у Србији

Грејање стамбених и пословних зграда троши скоро једну трећину српске производње енергије. Структура извора искоришћене енергије је веома неповољна – мање од 30% грејних објеката, углавном у већим градовима, повезано је са даљинским системима грејања, док остали користе фосилна горива заснована на индивидуалним или малим системима централног грејања, са типично ниском енергетском ефикасношћу и високом емисијом загађивача у атмосфери. Штавише, процењује се да скоро трећина домаћинства користи електричну енергију за потребе грејања простора.

Иако употреба енергетски ефикасних и еколошки осетљивих извора енергије тренутно није широко распрострањена у Србији, свест о неопходности развијања одрживе енергетске политике успостављена је како у владајућим структурама, тако и међу становништвом. Усвајање обавезујућих законских прописа у складу са директивама ЕУ, који су тренутно у току, резултираће применом строжијих стандарда у погледу заштите животне средине и значајнијег учешћа обновљивих извора енергије. Сходно томе, експлоатација геотермалних извора енергије ће добити на значају.

Подземне воде умереног нивоа температуре, између 10 и 30 °C, често се налазе у различитим регионима Србије, као и широм Балканског полуострва. Такве, подгеотермалне подземне воде очигледно имају одређени енергетски потенцијал, али се због њихових ниских температура не могу користити за потребе директног грејања. Међутим, ови извори енергије могу се ефикасно користити за грејање ако се примени одговарајући систем топлотних пумпи.

Постоји низ могућности како се системи за грејање топлотне пумпе за подгеотермалну воду могу конструисати и користити. Систем ради помоћу отворене или затворене петље. У отвореном систему петље вода се из бунара избацује у измењивач топлоте на ниској температури где се део његовог топлотног потенцијала користи за испаравање расхладног средства. Искоришћена вода се враћа у земљу или се на други начин испушта. У систему са затвореном петљом, вода остаје под земљом, а расхладно средство, или друга секундарна течност за пренос топлоте, циркулише кроз цеви зарођене у водоносник. Системи отворене петље имају бољу укупну ефикасност због нижих топлотних губитака, али им је потребна већа пажња у погледу одрживог коришћења коришћене воде, као и квалитета подземних вода како би се избегло обрастање и корозија опреме (воде са високим нивоом соли, минерали, водоник сулфид, бактерије гвожђе итд. морају бити претходно третиран). У зависности од температуре подземне воде и нивоа температуре потребног за загревање околине, могу се користити једностепени или двостепени компресијски системи грејања топлотном пумпом. За посматране подгеотермалне изворе ($<30\text{ }^{\circ}\text{C}$), једностепени систем компресије може ефикасно да обезбеди температуре кондензације расхладног средства до приближно $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, које су довољне за разне уређаје за грејање као што су: панелно грејање радијатора, подно грејање, разним системима вентилационих завојница, као и напредним системима грејања са директним зидом, итд. Међутим, даљим повећањем температуре одвода у једном степену топлотне пумпе, ефикасност компресора снажно пада, на тај начин уништавајући побољшања енергетске ефикасности. Стога су једностепени системи топлотних пумпи погодни само за нове зграде или зграде подвргнуте радикалној реконструкцији у којима се могу инсталирати нискотемпературни системи грејања.

Супротно томе, ако је предмет реконструкције система грејања зграда са постојећим инсталацијама система грејања топле воде (трафостанице, цеви, пумпе, радијаторска грејна тела у просторијама итд.), као што је то често случај у Србији, разумно решење би било задржати и искористити већину опреме и само заменити примарни извор топлоте одговарајућом топлотном пумпом. Ипак, једностепени систем не може енергетски ефикасно постићи температурни захтев за такав систем, па стога треба користити двостепени систем топлотне пумпе.

За Србију, где око 750.000 домаћинстава (26%) користи грејање топлотом водом (само у Београду: 300.000 домаћинстава или 47%), и земље са сличним преовлађујућим решењима за грејање у стамбеним објектима и енергетском политичком баштином, таква замена временског упозорења, ниско ефикасан и високо загађујући систем централног грејања зграде или стамбеног блока субгеотермалном топлотном пумпом, био би посебно значајан. Поред тога, ако циљана зграда већ није повезана са системом даљинског грејања, додељени енергетски ефекти допуњују се значајним еколошким ефектима који настају искључењем претходно коришћених извора енергије из фосилних горива, као што су сировна нафта или електране на угаљ [33].

5.1. Пример 1. Амадео: прва стамбена ниско-енергетска зграда у Србији

Амадео поседује геотермални систем, земља-вода, који обезбеђује подно грејање и хлађење. Извор енергије је заснован на 5 вертикалних Rehaу Raugeo геотермалних сонди постављених у земљи на дубину од 100 m. Унутар зграде, производња енергије је са

Vaillant геотермалном топлотном пумпом, GeoTHERM VWS 300/2, која даје 30 kW. Топлотна пумпа је повезана са резервоаром капацитета 750 l. Амадео такође има термални соларни систем за производњу санитарне топле воде. Соларни систем је базиран на Rehau SOLECT систему. Чини га 12 термалних соларних колектора и 2 бојлера од по 500 литара [34].



Слика 30. Амадео: прва стамбена ниско-енергетска зграда у Србији [34]

5.2. Пример 2. HVAC решење: Комбиновани пословни и стамбени објекти

KGH (engl. HVAC) системи представљају прекретницу грађевинских механичких система који пружају топлотну удобност особама праћену квалитетом ваздуха у затвореним просторима. Ови системи се могу класификовати у централне и локалне системе према више зона, локацији и дистрибуцији. Примарна ове опреме укључује грејну опрему, вентилациону опрему и расхладну или климатизацијску опрему. Централни климатизацијски системи налазе се далеко од зграда у централној просторији за опрему и испоручују климатизовани ваздух системом за довод канализације и садрже системе са ваздухом, ваздухом-водом и водом. Два система треба сматрати централним

као што су панели за грејање и хлађење и топлотне пумпе са изворима воде. Локални KGH системи могу се налазити унутар условљене зоне или у њеној близини, без потребе за каналима. Локални системи укључују локално грејање, локалну климатизацију, локалну вентилацију и сплит системе.



Слика 31. Комбиновани пословни и стамбени објекти

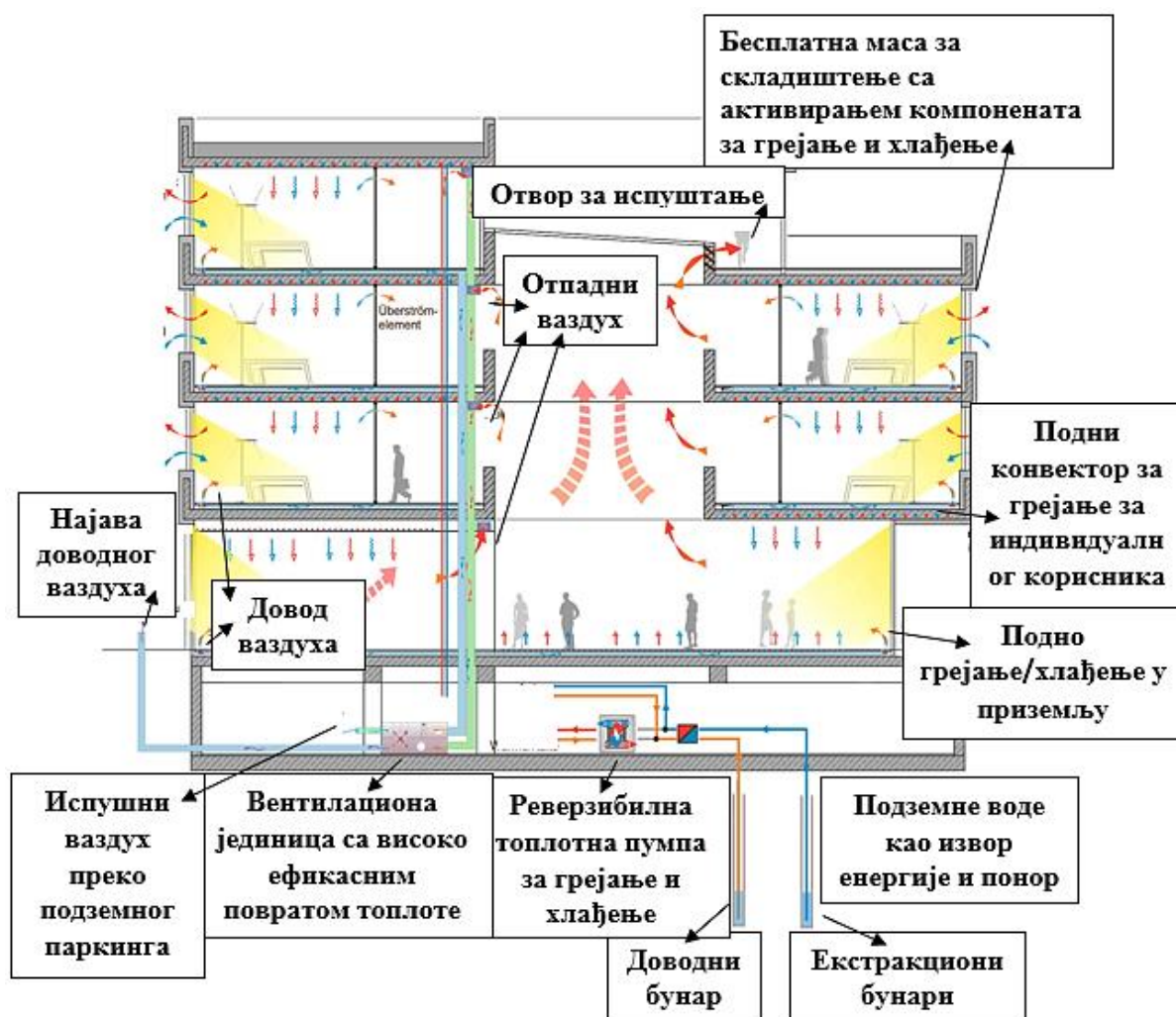
Табела 14. Значење ознака са слике

Грејање ● Производи: • Топлотне пумпе за земљу и извор ваздуха • Мрежа ниских температура, топлотне пумпе у стану • Зрачне завесе • Електрични панел грејачи • Грејачи у купатилу и шине за пешкире • Уређаји на гас и струју	Вентилација ● Производи: • Централизована механичка вентилација са повратом топлоте • Континуирана механичка вентилација екстракта • Повремено обожаватељи екстракта
Хлађење ● Производи: • Топлотне пумпе • Вентилаторске завојнице • Вентилаторски хидраулични радијатори	Врућа вода ● Производи: • Мрежа ниских температура, топлотне пумпе у апартманима • Електрични тушеви • Термостатски тушеви • Вода за кључање воде • Котлови за воду • Спремљени бојлери

Систем за грејање, вентилацију и климатизацију (KGH) дизајниран је тако да оствари еколошке захтеве.

Ови системи се користе у различитим врстама зграда као што су индустријске, комерцијалне, стамбене и институционалне зграде. Главна мисија KGH система је да задовољи топлотни комфор станара прилагођавањем и променом услова спољног ваздуха у жељене услове заузетих зграда. У зависности од спољних услова, спољни ваздух се увлачи у зграде и загрева или хлади пре него што се дистрибуира у окупиране просторе, затим се исцрпљује у амбијент или поново користи у систему. Избор KGH система у датој згради зависиће од климе, старости зграде, индивидуалних преференција власника зграде и дизајнера пројекта, буџета пројекта, архитектонског дизајна зграда [35].

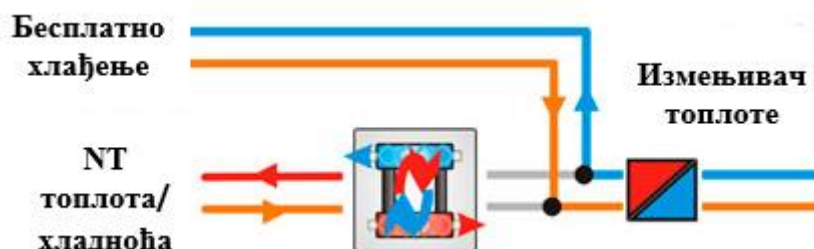
5.3. Пример 3. Зграда Office Südwestmetall у Немачкој



Слика 32. Пример топлотне пумпе отвореног круга у згради Office Südwestmetall у Немачкој [36]

Нова зграда управе Südwestmetall у Esslingen-у има иновативни концепт енергије и удобности. Потрошња топлоте у згради покривена је топлотном пумпом подземне воде са отвореним системом бунара као извор топлотне енергије. Релативно константна температура подземне воде од приближно 12 °C током целе године и нискотемпературни

систем грејања доводе до високе топлотне пумпе COP и самим тим до врло ефикасне производње енергије. Поред тога, подземна вода се такође користи за бесплатно хлађење, покривајући потребе за хлађењем активног система плоча, расхлађених плафона и доводне климатизације [37].



Слика 33. Значење делова са слике 32 [36]



Слика 34. Значење делова са слике 32 [36]

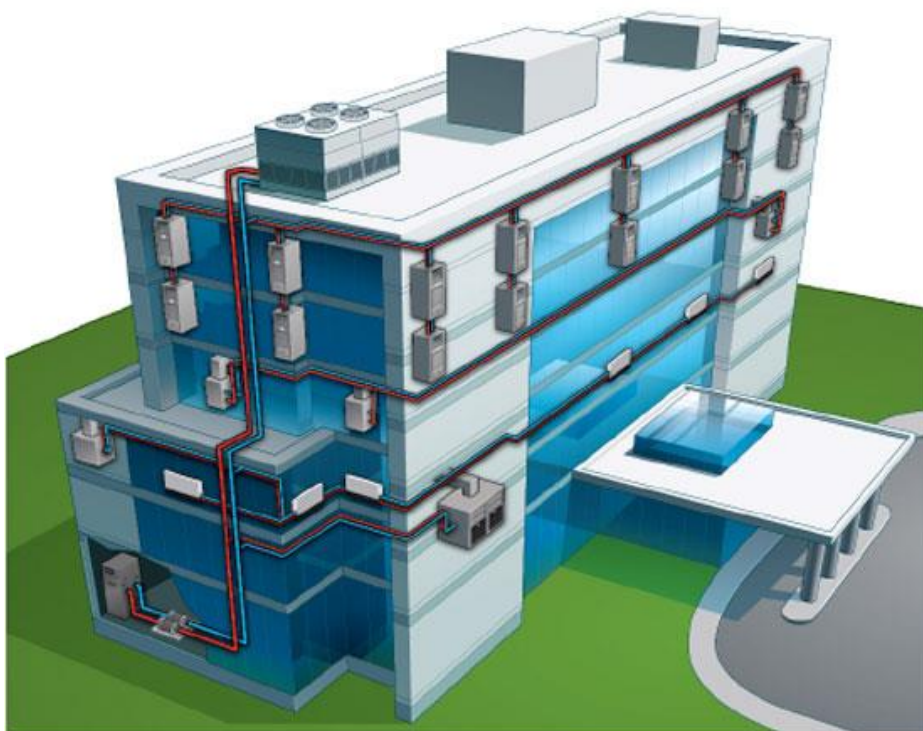
Интегрисани подни конвектори служе као брзо делујући систем грејања и омогућавају корисницима да појединачно контролишу температуру. Улаз ваздуха за вентилациони систем налази се на фасади у нивоу приземља. Након ефикасног поврата топлоте, издувни ваздух се користи за проветравање подземне гараже [37].



Слика 35. Зграда Office Südwestmetall у Немачкој [37]

5.4. Пример 4. Примене топлотних пумпи са извором воде

Топлота се премешта кроз међусобно повезан водени круг и одбацује кроз расхладни торањ или се ставља на рад у другим областима. Свака јединица је независни, упаковани систем, елиминишући могућност потпуног квара система. Ако се једна јединица поквари, то неће утицати на друге јединице. Јединице су погодно смештене изнад плафона или у ормару, па им се лако може приступити.



Слика 36. Примене топлотних пумпи са извором воде [38]

Топлотне пумпе са извором воде су идеалне за широк спектар врста зграда, укључујући пословне зграде, стамбене зграде, хотеле, етажне зграде, школе и још много тога.

Ове топлотне пумпе је једноставно уградити као стамбену климу и имају веома дуг животни век. ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) процењује више од двадесет година животног века [38]. То је зато што ови системи не морају да раде толико напорно као други системи да би премештали топлоту са једног места на друго. Дизајн идеалног система за грејање/хлађење који нуди индивидуалну зонску контролу, обнавља и користи вишак топлоте за кондиционирање простора или алтернативне сврхе и једноставно и ефикасно задовољава потребе више станара. Систем се састоји од високо ефикасних упакованих јединица топлотних пумпи обрнутог циклуса међусобно повезаних воденом петљом. Свака јединица задовољава захтеве за ваздушном удобношћу одређене зоне у којој је инсталирана. У хладном времену, топлотна пумпа уклања топлоту из воденог круга преко посебно дизајнираног коаксијалног измењивача топлоте расхладно средство - вода и преноси је у ваздух [38].

5.5. Пример 5. Алтернативе за британска домаћинства

На слици 37 приказано је пет алтернатива које би могле смањити гасове стаклене баште и емисију угљеника.



Слика 37. Алтернативе за смањење гасова стаклене баште и емисије угљеника при загревању куће [39]

Опција 1. Копати дубоко за топлоту

Да би се искористила топлота у земљи, потребна је такозвана топлотна пумпа извора земље. То значи копање дубоких ровова од 4 m и полагање цеви које садрже течност. Размера мреже цеви зависи од величине дома и баште. Течност у цевима загрева подземно тло, где су температуре углавном од 6 до 12 °C током целе године – чак и када је температура ваздуха испод нуле. Ова течност се улива у топлотну пумпу која користи паметну технологију за загревање воде за дом. Пресудно је што уређај истискује енергију из врло велике количине млаке течности и користи је за загревање много мање количине воде. То се постиже поступком који се назива компресија. Врућа вода се затим доводи у резервоар и око цеву куће и радијатора.

Опција 2. Ослонити се на ваздух

Код топлотних пумпи са извором ваздуха, сва топлота спољашњег ваздуха уноси се кроз посебан вентилатор на бочној страни куће. Топлотна пумпа извора ваздуха апсорбује топлоту изван куће да би је загрејала. Могуће је добити топлотну енергију из ваздуха чак и ако су температуре ниже од -15 °C. Користећи сличне технике топлотној пумпи

извора земље, ако се може искористити довољно ове енергије, може се користити за загревање воде за дом. Топлота из великих количина ваздуха апсорбује се на ниској температури у течност. То пролази кроз компресор који се напаја електричном енергијом, а резултујућа топлина се преноси у систем топле воде у кући.

Опција 3: Топлота из водених извора

Топлотна пумпа за извор воде ради по истом принципу као и топлотне пумпе за земљу и ваздух. Потребне су велике количине ниског нивоа топле воде из било ког извора у близини куће. Коришћењем компресора на електричну енергију температура се повећава и загрева воду која је довољно топла да се цевоводи око радијатора и подно грејање загреју до одређене температуре, а понекад и систем топле воде за славине.

Опција 4: Снчева топлина у сваком тренутку

На крову су инсталирани панели који садрже фотонапонске ћелије које претварају дневну светлост у електричну енергију. Соларни панели не захтевају сунчеву светлост за рад и могу радити у облачним данима.

Опција 5: Биомаса као извор грејања

Биомаса омогућава власницима кућа да користе све врсте органског материјала за генерисање топлоте. Дрво, трава, усеви или чак балега могу се претворити у пелете које се спаљују како би се створила топлина за дом [39].

5.6. Пример 6. Топлотне пумпе извора земља у Ирској

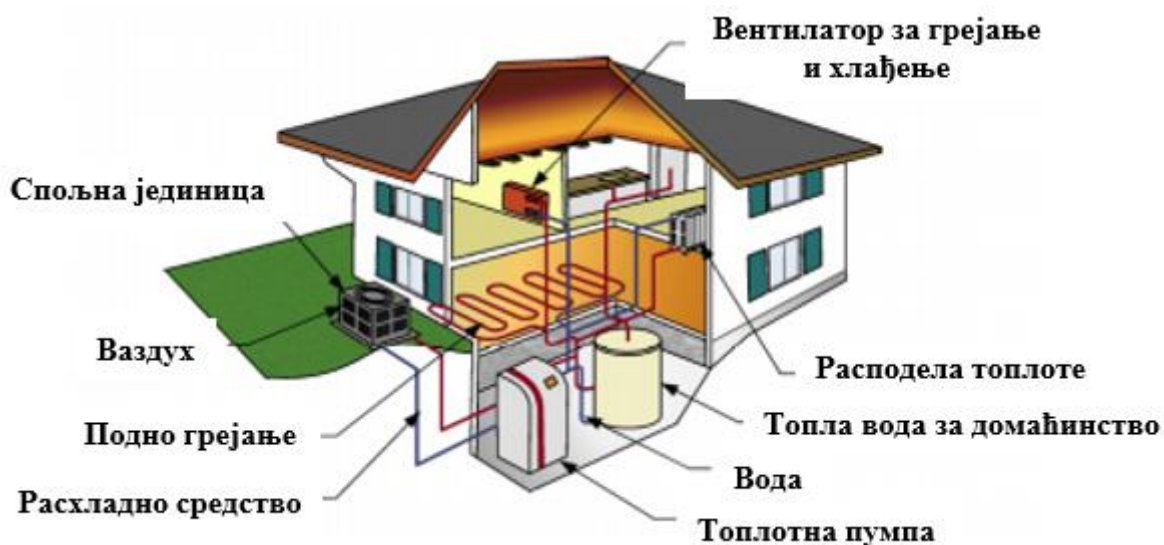
У Ирској земља одржава константну температуру између 11°C и 13°C , неколико метара испод површине. Ирска има топла влажна тла и климу која је идеална за искоришћавање плитке геотермалне енергије током целе године. Тип тла у Ирској омогућава задржавање ове топлоте, док честе кише одржавају земљиште влажним. Ова влага у земљи је одличан проводник топлоте, омогућавајући топлоти да се креће према колекторском систему [40].



Слика 38. Топлотне пумпе извора земља у Ирској [40]

5.7. Пример 7. Топлотна пумпа ваздух-вода

Топлотна пумпа ваздух-вода узима енергију из ваздуха и преноси је у воду. Оптимизацијом параметара топлотне пумпе постиже се максималан коефицијент економског ефекта током целе године. Ваздух се уноси у измењивач топлоте у коме се један део подземне воде преноси у еколошки фреон који испарава. Коришћењем топлотне пумпе ваздух-вода може се уштедети до 75% енергије за грејање домова, канцеларија, стакленика итд. Такође још једна предност овог система је што се просторије могу хладити током лета. Систем грејања има највише искоришћења током прелазног периода. Ови системи се могу користити на постојећим системима централног грејања као што су дрво, угаљ или гас [41].



Слика 39. Топлотна пумпа ваздух-вода [42]

6. Примена геотермалне енергије у Србији

У оквиру Стратегије развоја енергетике Републике Србије до 2015. године спомиње се директно употреба топлотних пумпи, али један од приоритета су и обновљиви извори енергије [1].

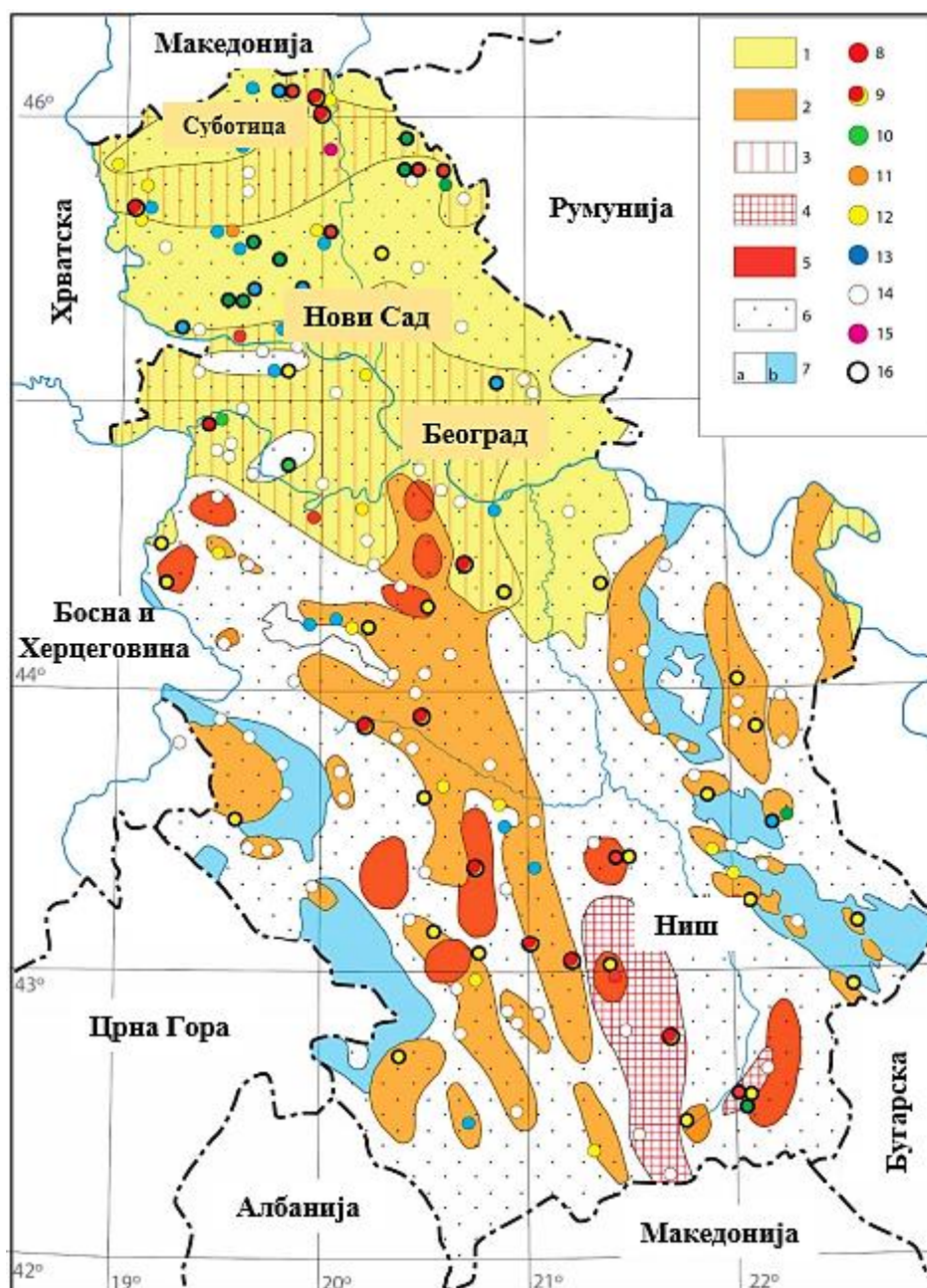
До 1990. године изграђене су и пуштене у употребу бројне дубоке геотермалне бушотине. Данашња ситуација је сасвим другачија. Потрошња геотермалне енергије у Србији је 1990. године била већа него што је присутна када је велики број постојећих извора затворен, а не користи се или се делимично користи. Највећи број објеката користи се у балнеологији, затим у затвореним и отвореним базенима, велнес и спа центрима. Мање се користи за грејање просторија и пластеника, затим за индустријске и пољопривредне процесе. Међутим, постоји све већи интерес за коришћење геотермалне енергије из плитких система помоћу топлотних пумпи за грејање појединачних комерцијалних и стамбених објеката.

Тренутно се Република Србија труди да повећа проценат укупног учешћа свих обновљивих извора енергије у бруто потрошњи енергије. Дефинисана је развојна стратегија енергетског сектора како би се постигао циљ који је поставила ЕУ од 27 % свих обновљивих извора енергије у крајњој потрошњи енергије до краја 2020. године.

Постоји 130 хидрогеотермалних бушотина, од којих 83 у Панонском басену и 47 у другим провинцијама. Укупни топлотни капацитет свих хидрогеотермалних бушотина у Србији је око 200 MWth, док је 82,5 MWth у Панонском басену. До сада су у Панонском басену изграђена 24 хидрогеотермална система и сви су пуштени у рад пре 1990. године, када је постигнута највећа производња од око 1,6 милиона m³ термалне воде, која је коришћена за грејање, балнеологију, пољопривреду и индустријске процесе [43]. У осталим геотермалним провинцијама термалне воде углавном се користе за балнеологију и спорт и рекреацију, док се мање користи за грејање бањских просторија и у пољопривреди. У последњој деценији интерес за коришћење геотермалне енергије је укинут због неравнотеже енергетских производа нафтних деривата и трајног раста потражње на једној страни и дефицита фосилних органских и нуклеарних горива на другој страни. Раст транспортних трошкова, регионално одвајање, деградација животне средине и повећани трошкови заштите животне средине створили су снажан разлог да се окрене обновљивим изворима енергије. У Војводини је изграђено шест хидрогеотермалних бушотина (Панонски базен) и све су планиране да се користе за грејање и рекреационе и велнес центре. У табели 15 дат је кратак преглед температура и приноса ових рупа за бушење.

Табела 15. Хидрогеотермалне бушотине изграђене у последњој деценији у Панонском басену [43]

Локација	Година	Дубина (m)	Принос (l/s)	T (°C)
Б. Петровац	2011	810	15	45
Бечеј	2011	1100	20	65
Сента	2013	920	25	55
Инђија	2015	1300	30	60
Ада	2017	1056	8.6	61
Б. Топола	2018	500	12	37



Слика 40. Мапа геотермалних ресурса Србије (позадина: Мапа геотермалних ресурса, Миливојевић, 2001) [43]

Табела 16. Легенда

Легенда	
1	Хидрогеотермални водоток у кенозојским стенама
2	Хидрогеотермални водоток у мезозојским стенама
3	Хидрогеотермални водоток у мезозојским стенама испод кенозојских стена
4	Хидрогеотермални водоток у палеозојским стенама
5	Петрогеотермални ресурси у терцијарним гранитоидним стенама
6	Хидро-петрогеотермални ресурси до 200 m дубине за експлоатацију геотермалне енергије топлотним пумпама
7	Подручја без значајних геотермалних ресурса
а)	терени са стенама палеозојске и протерозојске старости
б)	крашки терени

Коришћење ресурса	
8	Грејање
9	Грејање, балнеотерапија и рекреација
10	Производња хране
11	Индустрија
12	балнеотерапија
13	Рекреација и спорт
14	Није коришћено
15	У изради 2018.
16	У погону 2018.

Од ових шест бушотина само се једна у Бачком Петровцу користи за велики аква парк, док су пројекти у Сенти, Бечеју и Инђији, из углавном финансијских разлога, већ одгађани неколико пута и тренутно је неизвесно када ће се почети са тим пројектима. Недавно изграђене бушотине на Ади и Бачкој Тополи тренутно се не користе, али очекује се да ће цели пројекти бити завршени до краја 2020. године.

У другим геотермалним провинцијама у Србији, Мачвански регион се сматра једним од највећих изгледа за вишенаменску употребу геотермалне енергије и до сада је био предмет многих детаљних геотермалних истраживања. У оквиру пројекта Европске помоћи „Промоција обновљивих извора енергије и енергетска ефикасност”, општина Богатић је изабрана за једну од три потенцијалне локације за коришћење геотермалне енергије (заједно са Врбасом у Војводини и Матаруском бањом у централној Србији). Локална управа препознала је ову прилику и поставила пројекат реконструкције постојеће бушотине ВВ-1 и њено повезивање са даљинским грејањем у Богатићу. После ревитализације овог бунара, слободни одлив у главу бушотине био је 25 l/s, а температура воде 75 °C. Пројектовани капацитет система био је 2,62 MWth. Систем је пуштен у рад у јулу 2018.

На истом подручју, близу ВВ-1, постоји још једна бушотина ВВ-2, чији слободни одлив износи 50 l/s, а температура воде достиже 80 °C. Ова бушотина је ревитализирана 2004. године и планирана је за грејање у пољопривреди, али нажалост овај пројекат још чека на реализацију [43].



Слика 41. Хидрогеотермални бунар ВВ-1, Богатић (лево) [44], ВВ-2, Богатић (десно) [45]

Употреба топлотних пумпи у Србији постала је популарна у последњих неколико година, уз употребу соларних панела. У целој Србији инсталирано је око 1000 топлотних пумпи укупне снаге 15,59 MW које су у 2018. произвеле 34,37 GWth/год. Највише се користи за грејање комерцијалних и стамбених зграда у градовима у Србији, као што су Београд, Нови Сад и Ниш. Мора се нагласити да је употребу геотермалне енергије, посебно из плитких геотермалних инсталација, за мале пластенике и појединачне зграде тешко пратити у тачном броју, који врло брзо расте тамо где корисници не поштују увек процедуре прописане српским прописима.

Србија је до сада успела да значајно повећа употребу енергије ветра. С друге стране високи трошкови геотермалних система, неизвесни исход, затим компликована, дуга и спорог поступка предвиђена српским прописима, где је једном започео процес и даље могу бити предмет промене регулаторних аката због којих су инвеститори изгубили интересовање за улагања у коришћење геотермалне енергије упркос мерама које је влада припремила. Често долази до ситуације да након бушења дубоке хидрогеотермалне рупе за бушење корисник не може прикупити и обезбедити довољно средстава за финализацију пројекта. То је разлог зашто су многи инвеститори заинтересовани да користе геотермалну енергију из плитких система као сигурнију инвестицију. На овај начин у последње 3 године покренуто је преко 10 пројеката коришћења геотермалне енергије за грејање у планинским летовалиштима, комерцијалним и стамбеним зградама у градовима. Овим темпом врло је неизвесно да ли ће Србија успети да испуни циљ укупног учешћа свих обновљивих извора енергије у бруто потрошњи крајње енергије до краја 2020. године.

За сада се геотермална енергија у Србији користи само у износу од 112,86 MWth и додатних 15,59 MWth из плитких система. Ово се може сматрати прилично ниским имајући у виду његов потенцијал. Најзначајнија употреба геотермалне енергије за Србију могла би бити за даљинско грејање насеља и развој пољопривреде, тачније производње хране у складу са еколошким стандардима и у блиској будућности за производњу електричне енергије.

Велико интересовање Београда је за коришћење топлотних пумпи за загревање великих стамбених зграда, хотела и тржних центара где су резервоари од интереса алувијални седименти Саве и Дунава и неогени седименти испод. Поред тога, изгледа за коришћење топлотних пумпи на црпљеној подземној води из алувијалних лежишта дуж свих главних река су значајни.

Према резултатима геотермалних истраживања интензивна употреба термалних вода у агро- и аквакултури и даљинско грејање има најбоље изгледе у области западно од Београда, у Мачви. Као што је већ споменуто, у насељу Богатић један систем даљинског грејања почео је с радом у 2018. години са капацитетом од 2,62 MWth, док је други снаге 8,49 MWth планиран за пољопривредне потребе. Обоје користе геотермалну енергију из резервоара у карстифицираном кречњаку испод неогених седимената. Тренутно су на чекању 3 геотермална система која се налазе у Панонском базену и чекају даљња улагања. Очекивани укупни капацитет ова три система је 12,45 MWth. Друга два изграђена у 2017. и 2018. години су у фази развоја где укупни очекивани капацитет износи 2,23 MWth [43].

У оптимистичном сценарију може да се искористи додатних 23,17 MWth за грејање, рекреацију и пољопривреду до краја 2020. Кроз поменути пројекат Европске помоћи „Промоција обновљивих извора енергије и енергетска ефикасност”, направљене су студије префективности за 3 локације, Богатић, Матарушка бања и Врбас као најзанимљивије локације са аспекта коришћења и развоја геотермалних ресурса. Они се са економског и социјалног аспекта сматрају потенцијалним локацијама. Србија има велики потенцијал хидрогеотермалне енергије за директно коришћење, али се та врста енергије користи у веома малој количини. Пошто је велико интересовање за коришћење геотермалне енергије повучено и нажалост изгубљено након суочавања са многим препрекама, полажу се наде да ће влада поједноставити и скратити поступак добијања дозвола, као и обезбедити већа средства за омогућавање коришћења пројеката геотермалне употребе како би се постигао циљ постављен за 2020. годину [43].

7. Закључак

Технологија топлотних пумпи може донети велике економске, еколошке и енергетске предности. Системи топлотних пумпи нуде економичне алтернативе за рекуперацију топлоте из различитих извора за употребу у различитим индустријским, комерцијалним и стамбеним применама. Један веома битан начин постизања ових предности је повећање удела обновљиве енергије која се користи за грејање и хлађење зграда. Топлотне пумпе имају велики потенцијал за побољшање енергетске ефикасности система за грејање кућа и топле воде. Масовно усвајање топлотних пумпи у стамбеном сектору повећало би вршну потражњу за електричном енергијом на глобалном нивоу, као и у појединачним државама. Очекује се да ће електрификација грејања у становима бити важан допринос ублажавању климатских промена, јер ће нискоугљенична електрична енергија заменити фосилна горива. Предности грејања објеката са топлотном пумпом су:

- добит за друштвену заједницу, високи коефицијент енергетске ефикасности, мања потрошња енергије, смањење емисије CO₂;
- добит за кориснике, бољи комфор, рад система целу годину (зими греје, лети хлади), могуће грејање санитарне воде и вентилација, оптимално прилагођавање тренутном топлотном оптерећењу, потпуна регулације температуре у простору, ниски трошкови одржавања, нижа потрошња енергије, нижи рачуни за грејање.

Потребно је имати на уму да би се приликом накнадне уградње топлотних пумпи у постојеће зграде, као и променом извора енергије и средњих параметара, могао појавити било који технички проблем са локацијом нових радијатора. Због тога је потребно даље истраживати однос између топлотних пумпи и вршне потражње за електричном енергијом, као и израдити моделе који су рачунски довољно ефикасни да би се могли прилагодити стању зграде. Стално се ради на побољшању перформанси топлотне пумпе, поузданости, као и на самом утицају на животну средину.

8. Литература

- [1] Стојановић Зоран; *Семинарски рад из предузетништва - топлотне пумпе*; Висока техничка школа струковних студија, Пожаревац
- [2] *Студенти.рс*, *Топлотне пумпе*; Интернет страница: <https://studenti.rs/skripte/elektrotehnika/toplotne-pumpe/>; Приступљено: 05.08.2020.
- [3] Kazimierz Brodowicz, Tomasz Dyakowski; *Heat Pumps*; Butterworth-Heinemann Ltd Linacre House, Jordan Hill, Oxford 1993.
- [4] Ања Суботин, Владимир Катић; *Преглед софтверских алата за симулацију и одабир параметара топлотних пумпи*; Факултет техничких наука, Нови Сад
- [5] A. Bhatia; *Heat Pumps for Heating and Cooling*; Continuing Education and Development, Inc., Stony Point, NY
- [6] Проф. Др Станиша Стојиљковић, Наташа Цакић дип. инг. арх.; *Соларна топлотна конверзија, инсталације и потенцијали*, 2014.
- [7] Walter Grassi; *Heat Pumps - Fundamentals and Applications*; University of Pisa, Pisa, Italy 2018.
- [8] Arkadiusz Guźda, Norbert Szmolke; *Compressors in Heat Pumps*; Opole University of Technology, Opole 2015.
- [9] Dr Satish Kumar, MED, TU; *Reciprocating compressor*; Government engineering college, Bharuch
- [10] Интернет страница: https://1.bp.blogspot.com/-WHs71zBiUJo/XnWc_EH_DAI/AAAAAAAAAAZY/Hp0TAqCgMPkc3VoGvUOgryDjc4v6P1IYACLcBGAsYHQ/s1600/2.JPG; Приступљено 09.08.2020.
- [11] Интернет страница: <https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B9780128146835000067-f06-08-9780128146835.jpg>; Приступљено 09.08.2020.
- [12] A V Smirnov, V M Chobenko, O M Shcherbakov, S M Ushakov, V P Parafiyuk, R M Sereda; *The results of pre-design studies on the development of a new design of gas turbine compressor package of GPA-C-16 type*, Ukraine 2017.
- [13] *Understanding Heat Exchangers*; Интернет страница: <https://www.thomasnet.com/articles/process-equipment/understanding-heat-exchangers/>; Приступљено 10.08.2020.
- [14] Christos Charisiadis; *Brine Zero Liquid Discharge (ZLD) Fundamentals and Design*, Lenntech B.V. 2018.
- [15] *Surface Steam Condenser*; Интернет страница: <https://www.electrical4u.com/surface-steam-condenser/>; Приступљено 12.08.2020.
- [16] Romina Ronquillo; *Understanding Heat Exchangers*
- [17] De Slave SPB; *Illustration vectorielle du cycle de chauffage des pompes à chaleur source d'air*

- [18] Интернет страница: <http://instalatergrg.com/toplotne-pumpe-voda-voda/>; Приступљено 13.08.2020.
- [19] Интернет страница: http://www.rdsolar.rs/?page_id=180; Приступљено 14.08.2020.
- [20] Интернет страница: <https://mangoheatpump.en.made-in-china.com/product/hCNQyVdJyMWe/China-Altaqua-Air-Source-Evi-Technology-Air-to-Water-Heat-Pumps.html>; Приступљено 14.08.2020.
- [21] Интернет страница: <https://www.solarno.hr/KATALOG/proizvod/TEKST9/toplinske-pumpe-i-sustavi-grijanja>; Приступљено: 15.08.2020.
- [22] Интернет страница: <https://korak.com.hr/korak-030-lipanj-2010-pasivna-kuca-6-dio-dizalice-topline-2-dio/>; Приступљено 16.08.2020.
- [23] *Ground source heat pumps*; Интернет страница: <https://energysavingtrust.org.uk/renewable-energy/heat/ground-source-heat-pumps>; Приступљено: 18.08.2020.
- [24] Georgia Radioti; *Shallow geothermal energy: effect of in-situ conditions on borehole heat exchanger design and performance*, Faculty of Applied Sciences ArGEnCo Department 2016.
- [25] *Absorption Heat Pumps*; Интернет страница: <https://www.energy.gov/energysaver/heat-pump-systems/absorption-heat-pumps>; Приступљено: 20.08.2020.
- [26] *Inside the Thermodynamic Cycle*; Интернет страница: https://www.roburcorp.com/technical_dossiers/heat_pumps_absorption_technology/inside_the_thermodynamic_cycle; Приступљено: 20.08.2020.
- [27] Pascal Stouffs, Jean Castaing-Lasvignottes, Guillaume Anies, Nadège Chatagnon; *Dynamic simulation of a domestic absorption chiller*, Prague, Czech Republic 2011
- [28] *Use Of Solar Energy In Refrigeration Systems*; Интернет страница: <https://www.coolingindia.in/use-of-solar-energy-in-refrigeration-systems/>; Приступљено: 22.08.2020.
- [29] Andrzej Grzebielec, Artur Rusowicz, Maciej Jaworski, Rafał Laskowski; *Possibility of using adsorption refrigeration unit in district heating network*, Institute of Heat Engineering, Warsaw, Poland 2015
- [30] Hasan Demir, Moghtada Mobedi, Semra Ülkü; *A review on adsorption heat pump: Problems and solutions*, Izmir, Turkey 2007.
- [31] European Copper Institute; *Heat Pumps, Integrating technologies to decarbonise heating and cooling*, 2018.
- [32] Seppo Kärkkäinen, Elektraflex Oy; *Heat pumps for cooling and heating*, Finland
- [33] Dragi Antonijevic, Mirko Komatina; *Sustainable sub-geothermal heat pump heating in Serbia*, Belgrade, Serbia 2011.
- [34] Интернет страница <http://beodom.com/sr/construction/amadeo.html>; Приступљено 27.08.2020.

- [35] Shaimaa Seyam; *Types of HVAC Systems IntechOpen*, 2018.
- [36] Office Südwestmetall – Esslingen, Germany; Интернет страница: <https://aeworldmap.com/2018/11/02/office-sudwestmetall-esslingen-germany/>; Приступљено 30.08.2020.
- [37] Office Südwestmetall – Esslingen, Germany; Интернет страница: <https://transsolar.com/projects/es-suedwestmetall-geschaeftsstelle>; Приступљено 30.08.2020.
- [38] Water-Source Heat Pump Applications; Интернет страница: <https://www.climatemaster.com/commercial/applications/water-source-heat-pump-applications>; Приступљено 04.09.2020.
- [39] Интернет страница: <https://www.thisismoney.co.uk/money/bills/article-6817643/Can-really-scrap-gas-boiler-heat-home-soil-garden.html>; Приступљено 04.09.2020.
- [40] Интернет страница: <https://isabelbarrosarchitects.ie/blog/why-use-ground-source-heat-pumps-in-ireland/>; Приступљено 04.09.2020.
- [41] *Heat pumps air-water*; Интернет страница: <http://feman.net/eng/heat-pumps-air-water/>; Приступљено 04.09.2020.
- [42] Dr. Reg Pecan, Dr. Faruk Yildiz, Dr. Ulan Dakeev; *Integrating Geothermal Energy Education to an Engineering Technology Curriculum*, American Society for Engineering Education, 2019.
- [43] Sibela Oudech, Ivan Djokic; *Geothermal Energy Use, Country Update for Serbia*, Geco-inzenjering, Beograd 2019.
- [44] Тамара Марковић; *D.5.3.1. Summary report on the evaluation case studies*, 2018.
- [45] Мирјана Гајић, Снежана Вујадиновић; *Размештај и могућности коришћења термалних и термоминералних вода у Мачви*, 2009.