

РЛ 16494



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ - БЕОГРАД

Предраг Д. Милановић

УТИЦАЈ САСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЕ ВОДЕ
НА ИЗБОР ТОПЛОТНЕ ШЕМЕ И МАТЕРИЈАЛА ОПРЕМЕ
ЗА КОРИШЋЕЊЕ ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ



Докторска дисертација

Београд, 1998.

УНИВЕРЗИТЕТСКА БИБЛИОТЕКА
СРЕТОЗАР МАРКОВИЌИ - МЕТИЖА
Н. Бр. 110587

10/21 49

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ - БЕОГРАД
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

Предмет: Д. Математика

ЗА КОПИЈАРИЈЕ ТЕОРЕМАЈНЕ ЕНЕРГИЈЕ
НА ИЗБОР ТОПИОТНЕ ШЕМЕ И МАТЕРИЈАЛА ОПРЕМЕ
УТИЦАЈ САСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЕ ВОДЕ



Докторска дисертација

Београд, 1998.

Ментор :

проф.др. Бранислав Јаћимовић
Машински факултет - Београд

Чланови комисије :

-проф.др Милош Кубуровић

Машински факултет - Београд

-проф.др Александар Седмак

Машински факултет - Београд

-доц. др Драган Вуковић

Машински факултет - Београд

-проф. др. Ненад Ђајић

Рударско геолошки факултет - Београд

-проф. др Бранислав Јаћимовић

Машински факултет - Београд

Кључне речи:

геотермална енергија, геотермална вода, топлотна шема, узорковање, материјали, корозија, измењивач топлоте, задрљање, отпор провођењу топлоте услед задрљања, коефицијент пролаза топлоте

УТИЦАЈ САСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЕ ВОДЕ НА ИЗБОР ТОПЛОТНЕ ШЕМЕ И МАТЕРИЈАЛА ОПРЕМЕ ЗА КОРИШЋЕЊЕ ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Резиме:

У дисертацији су приказани резултати истраживања утицаја састава и температуре геотермалне воде на избор топлотне шеме и материјала опреме за коришћење геотермалне енергије. Резултати истраживања омогућавају да се у зависности од издашности извора геотермалне воде, њеног састава и температуре изврши:

1. Анализа могућности примене геотермалне енергије за потребе грејања;
2. Узорковање геотермалних вода и одређивање њених својстава;
3. Избор топлотне шеме и материјала за израду елемената грејног система (цевоводи, арматура, измењивач топлоте) за коришћење геотермалне енергије;
4. Утврђивање параметара потребних за поступак димензионисања измењивача топлоте.

На основу експерименталних истраживања у лабораторијским и експлоатационим условима, помоћу одговарајућих мерних инсталација, утврђено је корозионо понашање металних материјала (угљенични челик, нерђајући челик и сиво ливено гвожђе), као и промена отпора провођењу топлоте услед запрљања измењивача топлоте са геотермалном води из бушотине ПИК "7.јули"-Дебрц. Том приликом је констатовано следеће:

- За узорке од угљеничног челика и ливеног гвожђа брзина корозије зависи од брзине протицања геотермалне воде, при чему је у стању мировања воде брзина корозије веома мала, а са повећањем брзине значајно расте (при брзинама воде од $0,5 \div 2$ m/s повећање је неколико десетина пута);
- За узорке од нерђајућих челика није установљена значајна разлика у брзини корозије за случај мировања воде и за случај њеног протицања;
- На основу испитивања у експлоатационим условима утврђена је линеарна промене укупних отпора провођењу топлоте измењивача топлоте систем цев-у-цев услед запрљања са геотермалном водом из бушотине ПИК "7.јули"- Дебрц. Током испитивања вредност коефицијента пролаза топлоте се смањила са почетних 1100 [$W/m^2 \cdot K$] на око 650 [$W/m^2 \cdot K$], на крају испитивања. Извршене су две серије испитивања од којих је свака трајала око 90 дана.

Кључне речи: геотермална енергија, геотермална вода, топлотна шема, узорковање, материјали, корозија, измењивач топлоте, запрљање, отпор провођењу топлоте услед запрљања, коефицијент пролаза топлоте

INFLUENCE OF THE COMPOSITION AND TEMPERATURE OF WATER ON THE CHOICE OF THE HEAT SCHEME AND MATERIALS FOR THE EQUIPMENT FOR GEOTHERMAL ENERGY UTILIZATION

Abstract:

The Ph.D. dissertation presents the results of an investigation of the influence of the composition and temperature of geothermal water on the choice of the heat scheme and materials for the equipment for geothermal energy utilization. Depending on the specific yield of geothermal springs, its composition and temperature, the results of theoretical and experimental investigations enable the following:

1. An analysis of the potentials for utilization of geothermal water for heating;
2. Sampling of geothermal water and determination of its properties;
3. The choice of materials for manufacturing the components of the system for geothermal energy utilization;
4. Determination of the parameters required for the design of heat exchangers.

On the basis of experimental investigations carried out by using the appropriate measuring equipment, it was possible to determine the corrosion of materials (carbon steel, stainless steel and cast iron) and a change in overall fouling resistance caused by geothermal water from the borehole of PIK "7.juli"-Debr. In this connection, it was determined as follows:

- in the case of carbon steel and cast iron samples, the corrosion rate depends on the flow rate of geothermal water, whereby the corrosion rate in case of stationary water is very small; the corrosion rate increases significantly as the water flow rate of water increases (at the flow rates of water from 0,5 to 2 m/s, it increases several times);
- in the case of stainless steel samples, no significant difference in the corrosion rate was observed in the case of stationary water, as well as in the case of water flow;
- during the 90-day investigation, a linear dependence of overall fouling resistance in time was determined. The overall heat transfer coefficient of testing heat exchanger declined from 1100 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) at the beginning of the investigation to 650 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) at its end.

Key words: geothermal energy, geothermal water, heat scheme, equipment, sampling, materials, heat exchanger, corrosion, fouling, scaling, overall heat transfer coefficient, fouling resistance

Ова докторска дисертација је произашла из моје сарадње у ИХТМ - Предузећу за технолошки развој а.д. из Београда на решавању проблема примене геотермалне енергије за потребе грејања и друге нискотемпературске процесе.

Материјална средства која су била неопходна за реализацију експерименталних истраживања као и рада у целини обезбеђена су највећим делом из пројеката које је финансирало Министарство за науку и технологију Републике Србије, а чији сам ја био руководилац. Учесник у овим пројектима је био ИХТМ - Центар за електрохемију из Београда, односно колеге др Миомир Павловић, др Јован Попић и пок. Иван Дорословачки дипл.инж., којима дугујем захвалност на успешној сарадњи.

Посебну захвалност дугујем ментору проф. др Браниславу Јаћимовићу на стручној и колегијалној помоћи коју сам имао током израде дисертације, као и мр Србиславу Генићу. Такође, желим да истакнем и помоћ коју сам имао од проф. др Ненада Ђајића са Рударско геолошког факултета из Београда чије су сугестије значајно допринеле да овај рад добије свој коначан облик.

Најзад, хтео бих да се захвалим и својој породици на стрпљењу и подршци коју су ми пружали током израде докторске дисертације.

4. САСТАВНИ ДЕЛОВИ ГЕОТЕРМАЛНЕ ВОДЕ

- 4.1. Састав и особине геотермалне дисертационе воде
- 4.1.1. Поступак и стандарди за анализу воде
- 4.1.2. Општи дефиниције геотермалне воде по стандарду
- 4.1.3. Дефиниције и класификација
- 4.2. Дефиниције и стандарди за геотермалну воду
- 4.2.1. Европски стандарди за геотермалну воду
- 4.2.2. Амерички стандарди за геотермалну воду
- 4.2.3. Карактеристике и типови геотермалних вода
- 4.2.4. Дефиниције и стандарди за геотермалну воду
- 4.2.5. Дефиниције и стандарди за геотермалну воду
- 4.2.6. Дефиниције и стандарди за геотермалну воду
- 4.2.7. Дефиниције и стандарди за геотермалну воду
- 4.2.8. Дефиниције и стандарди за геотермалну воду

САДРЖАЈ:

УВОД

1. МЕСТО И УЛОГА ОБНОВЉИВИХ ИЗВОРА ЕНЕРГИЈЕ	1
1.1 Потрошње енергије	2
1.2 Производње енергије	5
2. КОРИШЋЕЊЕ ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ	8
2.1 Коришћење геотермалне енергије у свету	8
2.2 Геотермални потенцијал Србије	14
2.2.1 Панонски басен	15
2.2.2 Подручје централне и јужне Србије	16
3. СИСТЕМИ ЗА КОРИШЋЕЊЕ ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ	20
3.1 Основни системи за коришћење геотермалне енергије	20
3.1.1 Систем са директним коришћењем геотермалне енергије	21
3.1.2 Систем са индиректним коришћењем геотермалне енергије	22
3.1.2.1 Систем са индиректним коришћењем геотермалне енергије и допунским извором топлоте	23
3.1.3 Систем са топлотном пумпом	24
3.1.4 Производња електричне енергије	29
3.1.5 Коришћење гасова из геотермалне бушотине за производњу топлотне или електричне енергије	32
3.2 Изведена решења са системима за коришћење геотермалне енергије	34
4. САСТАВ И СВОЈСТВА ГЕОТЕРМАЛНЕ ВОДЕ	
4.1 Састав и основне карактеристике геотермалне воде	39
4.1.2 Поступак и стандарди за узорковање и анализу геотермалних вода	40
4.1.3 Оцена склоности геотермалних вода ка стварању наслага од тешко растворних соли	45
4.1.3.1 Ланжелијеов и Ризнеров индекс	46
4.2 Запрљање грејних система са геотермалном водом	50
4.2.1 Економски аспекти запрљања	50
4.2.2 Дефиниција отпора провођењу топлоте	51
4.2.3 Анализа процеса настајања запрљања	54
4.2.4 Карактеристични типови запрљања грејних система са геотермалном водом	56
4.2.4.1 Запрљање услед наслага од тешко растворних соли	57
4.2.4.2 Запрљање честицама	60
4.2.4.3 Запрљање корозионим продуктима	60
4.2.4.4 Биозапрљање	60

4.2.4.5	Комбиновано задрљање	61
4.2.5	Методe и стандарди за мерење отпора задрљања	61
4.3	Понашање материјала у геотермалној води	65
4.3.1	Понашање метала у води	65
4.3.2	Основни типови корозије у геотермалној води	66
4.3.2.1	Равномерна корозија	66
4.3.2.2	Тачкаста или питинг корозија	67
4.3.2.3	Корозија са напрслинама	69
4.3.2.4	Напонска корозија	69
4.3.2.5	Ерозиона корозија	70
4.3.2.6	Интеркристална корозија	70
4.3.2.7	Галванска корозија	71
4.3.2.8	Разлагање легура	71
5.	АНАЛИЗА РАДА ГРЕЈНОГ СИСТЕМА СА ИНДИРЕКТНИМ КОРИШЋЕЊЕМ ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ И ДОПУНСКИМ ИЗВОРОМ ТОПЛОТЕ	72
5.1	Опис грејног система	72
5.2	Анализа рада појединих елемената грејног система са индиректним коришћење геотермалне енергије и допунским извором топлоте	74
5.2.1	Топлотни конзум објекта који се греје	74
5.2.2	Размена топлоте између грејних тела и ваздуха у просторији	76
5.2.3	Размена топлоте у измењивачу А	79
5.2.4	Анализа рада грејног система у зависности од спољне температуре	85
5.3	Укупна потрошња топлотне енергије геотермалног грејног система	95
5.4	Техноекономска оптимизација рада геотермалног грејног система	99
6.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА	104
6.1	Испитивање техничко-технолошких карактеристика геотермалне воде "Дебрц"	104
6.1.1	Основни подаци о истражном бунару геотермалне воде "Дебрц"	105
6.1.2	Узимање узорака геотермалне воде и методе анализе	106
6.1.3	Резултати анализе	107
6.1.3.1	Физичко-хемијске карактеристике геотермалне воде "Дебрц"	107
6.1.3.2	Јонски растворене минералне соли	108
6.1.3.4	Растворени гасови и недисосоване супстанце	109
6.1.2	Одређивање способности воде ка растварању калцијум-карбоната	110
6.1.3	Ланжелијеов и Ризнеров индекс	112
6.1.4	Закључци на основу испитивања техничко- технолошких карактеристика геотермалне воде	113

6.2	Испитивање корозионог понашања металних материјала у геотермалној води	115
6.2.1	Избор материјала и њихове основне карактеристике	115
6.2.2	Анализа састава одабраних материјала	116
6.2.3	Испитивање утицаја геотермалне воде на одабране материјале у лабораторијским условима	118
6.2.3.1	Опис методе и општи услови испитивања	119
6.2.3.2	Резултати испитивања корозионе отпорности сивог ливеног гвожђа и нискоугљеничног челика Č1213	122
6.2.3.3	Резултати испитивања корозионе отпорности нерђајућих челика	128
6.2.4	Испитивање утицаја геотермалне воде на одабране материјале у експлоатационим условима	131
6.2.4.1	Опис мерне инсталације и општи услови испитивања	131
6.2.4.2	Резултати испитивања корозионе отпорности у геотермалној води	134
6.2.4.3	Закључци о корозионом понашању материјала у геотермалној води "Дебрц" на основу лабораторијских и експлоатационих испитивања	143
6.3	Експериментално одређивање отпора провођењу топлоте услед запрљања у геотермалним грејним системима	145
6.3.1	Опис мерне инсталације	145
6.3.2	Општи услови испитивања	149
6.3.3	Обрада резултата испитивања	150
6.3.4	Приказ резултата испитивања	156
7.	ЗАКЉУЧАНА РАЗМАТРАЊА	163
7.1	Општи закључци у вези са коришћењем геотермалне енергије	163
7.2	Закључци у вези могућности примене геотермалне воде у систему грејања	164
7.3	Закључци изведени на основу експерименталних истраживања	166

ПРИЛОГ 1

ЛИТЕРАТУРА

УВОД

На основу досадашњих истраживања о коришћењу геотермалне енергије за потребе грејања може се констатовати да за разлику од класичних грејних система где се користи хемијска припрема и омекшавање вода, веома су изражени проблеми корозије, стварања наслага од тешко растворних соли и задржања елемената грејног система. Код нас, па ни у свету овом проблему није посвећена довољна пажња, тако да не постоје јасно дефинисани стандарди и методологије из ове области, па се конкретно решење утврђује од случаја до случаја.

У циљу правилног избора система за размену топлоте, као и материјала за израду елемената система потребно је извршити одговарајућа испитивања за сваки конкретан случај, тј. на бази физичко-хемијског састава геотермалне воде изабрати одговарајуће материјале, као и систем за размену топлоте. Избор одговарајућег система као и материјала су међусобно повезани, тако да одређени системи захтевају употребу одговарајућих материјала, док са друге стране одређени материјали диктирају избор геотермалног система. У сваком случају, циљ мора да буде исти а то је изградња геотермалног система са одговарајућом поузданошћу при оптималним инвестиционим и експлоатационим (погонским) трошковима.

Имајући у виду наведену проблематику предмет ове дисертације је био да се на основу теоријских и експерименталних истраживања утврде начини и критеријуми за избор топлотне шеме и материјала опреме за коришћење геотермалне енергије у зависности од састава и температуре геотермалне воде. Током израде дисертације коришћена су знања и искуства из досадашњих истраживања из ове области, као и конкретни подаци добијени на основу експерименталних истраживања. Дисертација се састоји из 7 поглавља, прилога и списка коришћене литературе.

У поглављу 1 је указано на место и улогу коју обновљиви извори енергије имају у решавању енергетских проблема код нас и у свету, док су у поглављу 2 приказани подаци о резервама и коришћењу геотермалне енергије код нас и у свету. У поглављу 3 је дат систематизован приказ постојећих система за коришћење геотермалне енергије. У поглављу 4 су приказани

поступци и стандарди за узорковање и анализу геотермалних вода, оцену њене склоности ка стварању наслага од тешко растворних соли и запрљања, као и њеној корозионој активности према металним материјалима. У поглављу 5 је анализиран рад грејног система са индиректним коришћењем геотермалне енергије и допунским извором топлоте у зависности од радних параметара система и спољне температуре. У поглављу 6 је дат опис и резултати следећих експерименталних истраживања:

- Испитивање техничко-технолошких карактеристика геотермалне воде
- Испитивање корозионог понашања одабраних металних материјала у геотермалној води
- Испитивање промене отпора провођењу топлоте услед запрљања у геотермалним грејним системима

У поглављу 7 су дати закључци који су изведени на основу извршених истраживања, а на крају рада су дати Прилог и списак коришћене литературе.

1. МЕСТО И УЛОГА ОБНОВЉИВИХ ИЗВОРА ЕНЕРГИЈЕ

Нагли развој науке и технологије у другој половини двадесетог века довео је до повећане потрошње а самим тим и производње енергије. Садашње резерве конвенционалних енергетских извора, у које спадају фосилна и нуклеарна горива, су ограничене и неравномерно распоређене у свету. Предвиђа се да ће до несташица нафте, уз садашњи темпо потрошње, доћи за око тридесетпет година / 1 /. Исцрпљивање постојећих резерви угља и урана се не очекује тако брзо. Услед интензивне експлоатације конвенционалних енергетских извора, по садашњим технологијама, долази до емисије загађујућих компонената које озбиљно угрожавају шуме, реке и језера.

Имајући у виду наведене чињенице, тј. да су захтеви за енергијом, посебно нафтом, све већи а да су природне резерве ограничене, као и да услед интензивне експлоатације конвенционалних енергетских извора долази до емисије загађујућих компонената које уништавају природу, намеће се потреба за рационалним коришћењем постојећих и изналажењем нових извора енергије.

Обновљиви извори енергије (ОИЕ), у које поред геотермалне енергије спадају још сунчева енергија, биомаса, дрво и дрвни угаљ, енергија плиме и осеке, енергија морских таласа, вучна енергија животиња, биљни и животињски отпад, хидроенергија и ветар / 2 /, одржавају живот на планети па су због тога неисцрпни и свима доступни. Поред тога, њихово коришћење не ремети равнотежу у природи изузев у мањем и локалном обиму.

И поред изнетих предности данашње учешће ОИЕ у светском енергетском билансу износи око 10%. Ако се из укупних обновљивих извора енергије изузму хидроенергија, дрво и биљни и животињски отпад, онда њихово учешће пада на око 2% / 1 /.

Први разлог за овако мало учешће ОИЕ у светском енергетском билансу су цене уређаја за коришћење обновљивих извора енергије. Оне су за сада високе али се у блиској будућности очекује њихов пад с обзиром на убрзан развој науке и технологије. Други разлог је у томе што данашњи уређаји за коришћење обновљивих извора енергије имају релативно малу снагу па могу да задовоље само мање енергетске потрошаче.

1.1 Потрошња енергије

Укупна финална потрошња енергије¹⁾ обухвата потрошњу енергије по различитим секторима и то: индустрија, саобраћај, пољопривреда, заједничка и општа потрошња, неенергетска потрошња. Финална потрошња енергије на простору данашње СР Југославије повећана је у периоду од 1975. до 1990. године за 44% и достигла је ниво од 11,8 Мтен²⁾ /3/. У задовољавању финалне потрошње у овом периоду течна горива су углавном учествовала са око 50%, док је удео електричне енергије и природног гаса повећан са око 25% на око 35%, а значајно је смањен удео чврстих горива са око 25% на око 17%. Само је електрична енергија (20% финалне потрошње у 1990. години) у потпуности домаћег порекла, док су остали енергенти трошени у финалној потрошњи претежно увозног порекла, тако да је око 60% укупне финалне потрошње било обезбеђено са других подручја бивше СФРЈ или из увоза.

У табели 1.1 приказана је структура финалне потрошње енергије за СР Југославију у 1990. години /3/. Из табеле 1.1 се види да је сектор индустрије највећи потрошач енергије са 41%, затим домаћинства 21%, саобраћај 18%, неенергетска потрошња 11%, пољопривреда 3% и остала потрошња са 6%. С обзиром да је индустрија највећи потрошач енергије, како у развијеним тако и земљама у развоју, највеће уштеде и рационализације у потрошњи енергије се могу постићи управо у овом сектору потрошње /4,5/.

Када је реч о нашој земљи треба нагласити да су расположиви подаци неопходни за анализу и праћење енергетских токова непотпуни и несистематизовани, па су због тога и процене појединих аутора различите.

¹⁾ Финална потрошња енергије подразумева потрошњу примарне или трансформисане енергије у њеном коначном облику после које нема даље енергетске трансформације. Наиме, примарни извори енергије из којих се добија енергија за људску делатност могу у принципу да се искористе на два начина и то: директно за производњу енергије или да се трансформишу из једног облика енергије у други. У првом случају примарна енергија се користи директно за финалну потрошњу, а у другом случају за добијање тзв. трансформисане енергије која може и даље да се трансформише или да се користи за финалну потрошњу.

²⁾ тен - тона еквивалентне нафте; 1тен = 42 GJ

Додатну потешкоћу у овим анализама чини период од 1991 до 1996 године, када су због рата, распада државе и санкција УН били поремећени сви привредни и енергетски токови у земљи.

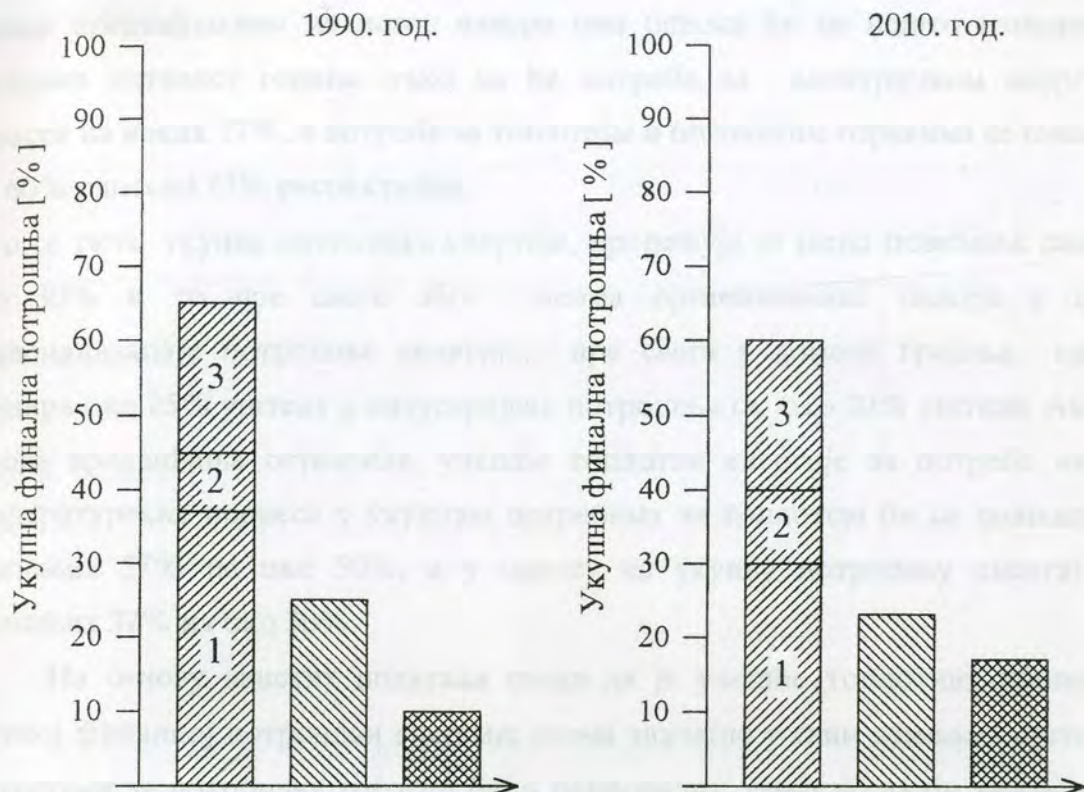
Табела 1.1 Структура финалне потрошње енергије по секторима у 1990. години / 3 /

Сектор потрошње	%
Индустрија	41
Пољопривреда	3
Домаћинства	21
Саобраћај	18
Неенергетска	11
Остало	6
Укупно [%]	100




Процењује се да је у 1990. години од укупне финалне потрошње енергије у сектору индустрије у СРЈ око 80% отпадало на топлотне процесе /6/, док је у 1991. години од укупно утрошене електричне енергије око 9% потрошено за топлотне процесе /7,8/.

На основу изнетих података / 1 -8 / се види да топлотни процеси имају значајно учешће у свим секторима потрошње а самим тим и у укупној финалној потрошњи енергије.

Резултати истраживања /9/ у којима су поред 16 европских земаља обухваћене и САД, показују да топлотни процеси учествује у укупној финалној потрошњи енергије са 65%, погонска горива са 25% а свега 10% одлази на потребе где је електрична енергија незаменљива. На слици 1.1 дат је графички приказ резултата ових истраживања.



Легенда:

 Топлота
  Погонска горива
  Електрична енергија

Врста топлотног процеса

1. Нискотемпературски 2. Средњетемпературски 3. Високотемпературски

Слика 1.1 Учешће појединих видова енергије и топлотних процеса у укупној финалној потрошњи / 9 /

Рачуна се да од укупне потрошње топлоте око 57% одлази на нискотемпературске процесе, око 13% на средњетемпературске и око 20% на високотемпературске процесе¹⁾. Ово значи да се за подмирење потреба за нискотемпературске процесе троши 37% од укупних енергетских потреба.

¹⁾ Када је реч о топлотној енергији сви процеси и апарати у којима се обавља размена топлоте могу се поделити на : нискотемпературске са температурама у интервалу 10 °С до 150°С, средњетемпературске у интервалу од 150 до 400° С и високотемпературске са температурама од 400 до 2000 °С /9/.

Према предвиђањима из истог извора ови односи ће се нешто изменити у наредних петнаест година, тако да ће потребе за електричном енергијом нарасти на неких 17%, а потребе за топлотом и погонским горивима се смањити на 60% односно 23% респективно.

Што се тиче укупне потрошње енергије, процењује се њено повећање само за око 30% и то пре свега због веома организованих напора у циљу рационализације потрошње енергије, пре свега у домену грејања где се планира око 25% уштеда и индустријске потрошње са око 20% уштеда. Ако би се ова предвиђања остварила, учешће топлотне енергије за потребе нискотемпературских процеса у укупним потребама за топлотом би се смањило са садашњих 57% на око 50%, а у односу на укупну потрошњу енергије са садашњих 37% на око 30%.

На основу изнетих података следи да је учешће топлотних процеса у укупној финалној потрошњи енергије веома значајно у свим земљама света. Да би системи за потрошњу топлоте били рационални, односно да би задовољили одговарајуће техноекономске критеријуме, основно је правило да се за нискотемпературске процесе не користе високотемпературски извори топлоте. Обновљиви извори енергије, који могу данас комерцијално да се користе, спадају у групу нискотемпературских извора топлоте па је њихова примена веома рационална за нискотемпературске процесе.

1.2 Производња енергије

Производња примарне енергије на простору садашње СРЈ је износила 5,9 Мтеп у 1975. години, док је у 1990. год. износила 11,0 Мтеп, што значи да је повећана за око 85% [3]. У том периоду покривеност укупне потрошње домаћом производњом је повећана са 56% на 60%. Повећање домаће производње примарне енергије је остварено углавном повећаном производњом угља, а мање на бази хидропотенцијала. У табели 1.3 приказана је структура производња примарне енергије на простору садашње СРЈ у периоду 1975-1994.

Табела 1.3 Структура производња примарне енергије у СРЈ /3/.

Енергетски извор	1975		1980		1990		1994	
	Mten	%	Mten	%	Mten	%	Mten	%
Хидроенергија	0,7	12	0,9	11	0,88	8	1	10
Чврста горива	3,4	58	5,94	69	8,26	75	7,1	72
Течна горива	1	17	0,9	11	1,2	11	1,1	11
Гасовита горива	0,8	13	0,76	9	0,66	6	0,7	7
Укупно	5,9	100	8,5	100	11	100	9,9	100

Удео угља у укупној домаћој производњи примарне енергије је са 58% у 1975. повећан на 75% у 1990. години. Производња угља је повећана за 2,4 пута и износило је око 45 милиона тона у 1990. години. У истом периоду удео течних горива у укупној производњи примарне енергије је смањен са 17% у 1975. на 11% у 1990. години. Домаћа производња нафте је обезбеђивала око 20% од укупне потрошње нафте у 1990. години, када је износила 6,1 милиона тона. Домаћа производња гаса у овом периоду се мењала тако да је њено учешће у укупној потрошњи примарне енергије смањено од 13% у 1975. на 7% у 1994. години. Удео хидроенергије у укупној производњи енергије смањен је са 12% у 1975. на 8% у 1990. години, док је укупна производња електричне енергије бележила континуалан раст до пред крај 80-тих година када је достигла ниво од 38000 GWh првенствено због изградње термоелектрана. Удео хидроелектрана у нето производњи електричне енергије је смањен са 52% у 1975. на 25% у 1990. години.

Енергетска ситуација у свету у последњих тридесетак година је карактеристична по веома интензивном расту енергетских потреба. У наредном периоду се очекује нешто мањи пораст ових потреба захваљујући рационалнијој потрошњи енергије у свим секторима, као и развојем савремених технологија које захтевају мање специфичне потрошње сировина и енергије.

У табели 1.4 приказана је структура производње енергије у свету у периоду 1960 -1990, као и пројекција те структуре у 2020. години / 1 /.

Табела 1.4 Структура производње енергије у свету / 1 /

Врста извора	1960		1990		2020	
	Gten	%	Gten	%	Gten	%
Угаљ	1,4	42	2,3	26	3,4	25
Нафта	1,0	30	2,8	32	3,4	25
Природни гас	0,4	10	1,7	20	2,8	21
Нуклеарна енергија	0,0	0	0,4	4	0,8	6
Хидроелектрична енергија	0,15	4	0,5	6	1,0	7
ОИЕ	0,0	0	0,2	2	0,9	8
Традиционални ОИЕ *	0,5	14	0,8	10	1,1	8
Укупно	3,3	100	8,7	100	13,4	100

* под традиционални ОИЕ (обновљиви извори енергије) подразумева се хидроенергија, дрво, биљни и животињски остаци

Укупне светске потребе за енергијом у периоду 1960 - 1990 година су веома порасле и то за 2,6 пута, тј. са 3,3 Gten на 8,7 Gten. У периоду до 2020.године процењује се да ће нарасти на око 13,4 Gten, тј. повећаће се за 1,5 пута у односу на потребе у 1990. години¹⁾.

Карактеристично је да и поред знатног раста енергетских потреба у периоду 1960-1990. године, није се битно изменила структура производње енергије, тако да се око 80% енергије добија из фосилних горива, при чему је интензивирао развој система за експлоатацију нуклеарног горива и обновљивих извора енергије. У периоду до 2020. године, постепено ће се смањивати удео енергије добијене из фосилних горива, док ће се повећавати потрошња нуклеарних горива, а посебно енергија добијена из обновљивих извора енергије.

Процењује се да ће учешће ОИЕ у укупној производњи енергије порастати са садашњих 2% на 8% у 2020. години, тј. за око 4 пута.

¹⁾ Ова процена представља средњу вредност три претпостављене варијанте о енергетским потребама у 2020.години / 1 /.



2. КОРИШЋЕЊЕ ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ

Под геотермалном енергијом се подразумева енергија акумулирана у флуидима и стенским масама у земљиној кори. Постојање геотермалних флуида и могућност њиховог коришћења, познати су у свету још од давнина. До настајања тзв. енергетске кризе извори геотермалних обично минерализованих вода претежно су коришћени у балнеолошке сврхе.

Енергетска криза је снажно подстакла истраживања у циљу утврђивања резерви геотермалне енергије¹⁾, као и могућности ширег и потпунијег коришћења енергије геотермалних вода у различитим секторима посебно у пољопривреди и личној и општој потрошњи.

2.1 Коришћење геотермалне енергије у свету

У последње време развијене су различите технике и технологије за коришћења геотермалне енергије у зависности од издашности извора, температуре и притисака флуида, садржаја минерала и гасова, корозивности итд. Тако се може говорити о коришћењу геотермалних вода код којих је температура флуида до 100 °C и изнад 100 °C. Код ових последњих, притисци могу да буду довољно високи да омогућују производњу електричне енергије.

Коришћење овог извора енергије је све интензивније тако да се данас рачуна са постојањем инсталисане снаге на бази геотермалне енергије у свету од преко 20000 MW, од чега се око 25% односи на производњу електричне

¹⁾ Према дефиницији / 10 / разликују се искористиве, доказане и укупне резерве геотермалне енергије. Под искористивим резервама, подразумевају се оне количине геотермалних флуида који се могу комерцијално експлоатисати са данашњом технологијом. У доказане резерве или ресурсе, спадају све количине за које се може претпоставити да се налазе у познатим лежиштима и за које је на основу истражних радова дефинисан квалитет и карактеристике лежишта. Укупне резерве или потенцијали обухватају поред резерва и ресурса геотермалних флуида и оне количине за које се претпоставља да постоје, а утврђују се на основу општег познавања геолошких услова, сличности са већ пронађеним ресурсима итд.

енергије а 75% на топлотну енергију /10/. Геотермални флуиди који омогућавају економичну производњу електричне енергије су доста ретки и ограничени на поједине регионе у свету. У земљама где природне могућности то омогућавају производња геоелектричне енергије представља значајан део укупно произведене електричне енергије, нпр: Филипини и Кенија преко 20%, Ел Салвадор око 10%, Мексико преко 5%. Међутим, у читавом свету па и код нас много су чешћа релативно плитка лежишта или извори геотермалне воде температура између 30 и 100°C која могу економично да се искористите за различите нискотемпературске процесе.

Примена геотермалне енергије данас представља један од значајних сегмената енергетске и енергетско-еколошке стратегије развијених земаља.

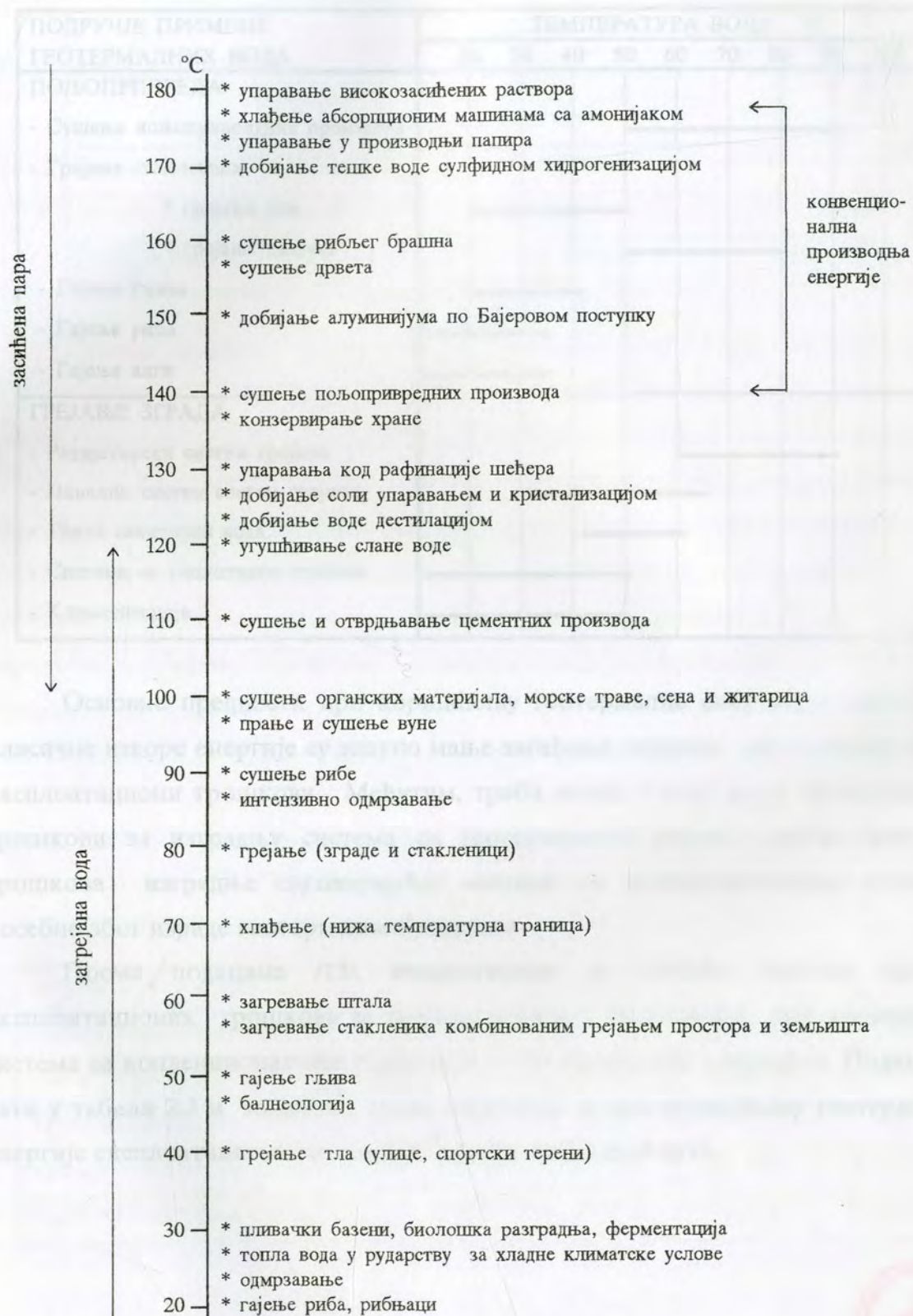
У оквирима Европске Уније се чине значајни напори на заустављању повећавања производње енергије из фосилних и минералних горива због све већег раста садржаја CO₂ у атмосфери и ефекта стаклене баште који из тога произлази као и због исцрпивости укупних резерви нафте. На тој основи развијен је значајан систем националних и међународних истраживања као и нових активности усмерених на развој нових и примену обновљивих извора енергије. У тим оквирима геотермалној енергији припада значајно место.

У табели 2.1 прикане су могућности коришћења геотермалне енергије у зависности од температуре геотермалног флуида / 11 /.

У домену коришћења геотермалних вода до 100 °C кључно место у свету припада њиховом коришћењу у пољопривреди и комуналној енергетици за грејање стамбених и пословних објеката.

У Табели 2.2 дат је преглед примене геотермалних вода у пољопривреди и за грејање стамбених и пословних зграда зависно од температуре воде/ 12 /.

Табела 2.1 : Могућности коришћења геотермалне енергије у зависности од температуре флуида / 11 /



Табела 2.2 Примена геотермалних вода у пољопривреди и за грејање зграда зависно од температуре /12/

ПОДРУЧЈЕ ПРИМЕНЕ ГЕОТЕРМАЛНИХ ВОДА	ТЕМПЕРАТУРА ВОДЕ °C									
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
ПОЉОПРИВРЕДА										
- Сушење пољопривредних производа										
- Грејање стакленика:										
* грејање тла										
* грејање ваздуха										
- Гајење гљива										
- Гајење риба										
- Гајење алги										
ГРЕЈАЊЕ ЗГРАДА										
- Радијаторски систем грејања										
- Панелни систем грејања										
- Топла санитарна вода										
- Системи са топлотниом пумпом										
- Климатизација										

Основне предности при коришћењу геотермалне енергије у односу на класичне изворе енергије су знатно мање загађење околине као и знатно нижи експлоатациони трошкови. Међутим, треба имати у виду да су инвестициони трошкови за изградњу система са геотермалном водом знатно већи од трошкова изградње одговарајућег система са конвенционалним горивом, посебно због израде геотермалне бушотине.

Према подацима /13/, евидентиране су следеће разлике између експлоатационих трошкова за грејање зграда у Француској при коришћењу система са конвенционалним горивом и са геотермалном енергијом. Подаци су дати у табели 2.3 и из ње се може видети да су при коришћењу геотермалне енергије експлоатациони трошкови ¹⁾ нижи за 2,5 до 4 пута.



¹⁾ у експлоатационе трошкове спадају: трошкови горива, одржавања инсталација и трошкови инвестиционог одржавања (ремонт и обнова инсталација)

Табела 2.3 Упоредни експлоатациони трошкови при грејању станова са течним горивом и геотермалном енергијом /13/

Стамбено насеље	Експлоатациони трошкови у FRF	
	Грејање са течним горивима	Грејање са геотермалном водом
Saige-Formanoir (Gironde)	4.654.400	1.484.200
Moulin a Vent (Essonne)	7.684.000	1.973.000
ZUP de Beauval (Seine et Marne)	32.200.000	13.350.000

Слична анализа рађен је у Словенији /14/. Овде су упоређени инвестициони и експлоатациони трошкови рада три погона са различитим грејним система. Први систем је са геотермалним извором топлотне снаге 2,5 MW (случај А), други са топлотном пумпом и геотермалним извором топлотне снаге 3,0 MW (случај Б) и трећи систем са конвенционалном котларницом на гас инсталисане снаге од 2,5 MW (случај В). Инвестициони трошкови обухватају трошкове материјала, израду и монтажу погонских машина и апарата, као и израду геотермалне бушотине. У експлоатационе трошкове су урачунати трошкови одржавања и трошкови енергије. Рачунато је да погони раде 240 дана годишње а добијени резултати су приказани у табели 2.4.

Табела 2.4 Упоредни инвестициони и експлоатациони трошкови за три грејна система /14/

Назив	ј.м.	А	Б	В
Инсталисана снага	MW	2,5	3,0	2,5
Инвестициони трошкови	DEM	1 10 ⁶	1,125 10 ⁶	0,145 10 ⁶
Амортизација/ год.	DEM	33.000	37.883	4.824
Трошкови одржавања/ год	DEM	5.000	5.475	7.700
Трошкови енергије/год	DEM	23.000	26.900	291.373
Укупни годишњи трошкови	DEM	61.000	70.258	303.896

Као што се из примера види укупни годишњи трошкови за рад погона са геотермалном енергијом су мањи за око 4,5 пута, али су зато инвестициони трошкови већи за око 7,5 пута него код сличног погона са котлом на гасовито гориво.

При анализи трошкова треба имати у виду и еколошке проблеме који се јављају при експлоатацији система са конвенционалним горивима као и додатним трошковима који из тога произилазе. Наиме, међународни прописи предвиђају ригорозне мере у циљу заштите животне средине а то условљава изградњу додатних уређаја за пречишћавање штетних материја. Процењује се да ови уређаји повећавају инвестицију нпр. код конвенционалних термоелектрана и до 50% / 10 /. При коришћењу геотермалне енергије еколошки проблеми су знатно мање изражени па се може очекивати да ће у будућности разлика у инвестиционим трошковима између система са геотермалном енергијом и конвенционалним горивима бити мања.

Најзначајнији резултати у коришћењу геотермалне енергије у свету остварени су у САД, Јапану, Исланду, Француској, Италији, Мађарској.

Изузетно су интересантна искуства Мађарске и Француске, посебно када је реч о коришћењу ове енергије у балнеологији (Мађарска) у пољопривреди (Мађарска, Француска) и грејању зграда (Француска).

Интензивнија примена геотермалне енергије у току последње декаде може се објаснити чињеницама да је:

- директно употребљива
- еколошки подобра
- економски погодна због ниских експлоатационих трошкова

За рационално коришћење геотермалне енергије неопходно је неколико битних услова од којих су најважнији:

- да су искористиве резерве геотермалне енергије довољно велике за комерцијалну експлоатацију
- да топлотна снага геотермалног извора одговара потребама потрошача
- повољан физичко-хемијски састав геотермалног флуида

2.2. Геотермални потенцијал Србије

Геолошка и хидрогеолошка истраживања, која су вршена у току последњих деценија, показала су да на територији Србије постоје значајна лежишта и изворишта геотермалних вода, различитих температура и физичко - хемијског састава.

Геотермална истраживања већег обима у Србији су практично започета тек 1975 године. Интензивнија истраживања су настављена у периоду осамдесетих година, тако да се данас располаже са обимнијим подацима о геотермалном потенцијалу подручја Војводине и централне Србије. Подручје Косова и Метохије, као и Црне Горе, није довољно истражено, али према досадашњим сазнањима нема већи геотермални значај.

Србија се налази у зони повољних геотермалних потенцијала и ресурса који се простиру од Мађарске на северу и пружају се ка Македонији, Грчкој и Турској. Са становишта истраживања, добијања и коришћења геотермалне енергије територија Србије се може условно поделити на две карактеристичне области у којима се порекло и врста геотермалне енергије разликују / 10 /.

Прва област је подручје јужног дела Панонског басена, које обухвата Војводину, Мачву, Подунавље и северно Поморавље. Ово подручје се карактерише малом дебљином земљине коре, око 25 km, што условљава високу вредност подземног топлотног флуksа¹⁾ од 80 до 110 mW/m², што јасно указује на знатни геотермални потенцијал /15/. Друга област обухвата подручје централне Србије, јужно до панонског басена и карактерише се већим дебљинама земљине коре и до 40 km, али и веома високим вредностима топлотног флуksа од 100 до 200 mW/m² / 16 /. Мада се у Србији још увек не врше систематска мерења, са сигурношћу се процењује / 17 / да је на највећем делу територије Србије могуће очекивати вредности топлотног флуksа знатно више од просечних вредности за Европу (око 60 mW/m²).

¹⁾ Топлотни флуks представља количину топлоте у јединици времена која из горњих слојева омотача језгра доспева у земљину кору. Постојање повољних геолошких услова као што су: мала дебљина земљине коре, висока вредност топлотног флуksа и друго, указују на геотермални потенцијал тог подручја.

2.2.1 Панонски басен

Подручје Панонског басена је иако непотпуно али до сада најбоље испитано пре свега због потреба истраживања и производње нафте и гаса.

Систематска истраживања у Војводини су започела 1969. године када је избушена прва хидрогеотермална бушотина Суботица С-1, а до данас је избушено 68 бушотина, најчешће дубине од 800 до 1200 m. Поред тога испитано је још 42 нафтно-гасне бушотине ради утврђивања могућности њиховог коришћења као геотермалних бушотина. Од тих 110 испитаних хидротермалних, нафтних и гасних бушотина, данас се користе свега 24, при чему се само 11 бушотина користи као извори топлоте за загревање објеката / 10 /.

И ободна подручја Панонског басена у која спадају Мачва, Подунавље и Поморавље, су данас нешто детаљније истражена у геотермалном погледу.

Прва појава главног хидрогеотермалног налазишта на подручју Мачве је откривена у селу Дубљу 1982. године истражном бушотином БД-1 / 18 /. На основу истражних радова на подручју Мачве и јужног Срема потврђене су претпоставке о геотермалним потенцијалима тог подручја / 19 /. Из релативно плитких бушотина могуће је добити повољне температуре на устима бушотине од преко 70 °С, као и веома добру издашност. Посебна погодност је повољан физичко-хемијски састав геотермалних вода са овог подручја.

У табели 2.5 приказано је неколико најзначајнијих бушотина са овог подручја и њихове основне техничке карактеристике.

Укупно искористиве геотермалне резерве са подручја Панонског басена износе око 87 MW, док инсталисана топлотна снага свих изграђених геотермалних система износи око 25 MW /10/. На основу овога се може закључити да је искоришћеност геотермалних резерви на овом подручју око 30%.

Табела 2.5 Преглед основних особина геотермалних бушотина

Рб	Бушотина	Место	Дубина бушотине	Издашност	Излазна температура	Садржај соли		Топлотна снага и потенцијал бушотине	
			m	l/s	°C	укупан g/l	NaCl g/l	MW*	ten/god**
1.	Де-1	Дебрц	1004	14,0	55,0	-	-	2,5	1890
2.	Куп1/Х	Купиново	644	41,7	48,0	0,81	0,08	4,012	5238
3.	ББ-1	Богатић	475	37,5	75	-	-	9,9	7425
4.	ББ-2	Богатић	618	61	78	-	-	16,8	12654
5.	БД-1	Дубље	400	15	50	-	-	2,4	1791
6.	ББе	Белотић	450	25	35	-	-	2,4	1791
7.	Пб-3/Х	Пригревица бања	711,7	25	56	5,94	3,97	3,245	-
8.	Инђ-1/Х	Инђија	975	18,3	57	4,09	2,51	2,45	-
9.	Вбц-1/Х	Врбица	2520	16,7	82	6,86	3,39	3,98	-
10	Бч-2/Х	Бечеј	1020	28,3	63	4,01	2,28	4,507	-

* Максимална снага геотермалног извора. Израчунава се под претпоставком да је минимална излазна температура воде из грејног система 20 °C

** Максималан годишњи потенцијал бушотине. Представља енергију која се може добити из бушотине при непрекидној експлоатацији током целе године, тј. за 365 x 24 = 8760 часова рада.

2.2.2 Подручје централне и јужне Србије

Подручје централне Србије се простире између унутрашњих Динарида, Вардарске зоне и Карпато-Балканида. Представља још увек недовољно истражено подручје али са веома великим перспективама за откривање лежишта геотермалне енергије високих температура. Ово подручје је карактеристично по великом броју природних извора различитих температура и издашности, а познати су још из давнина јер их помињу римски и византијски извори. Подручје је веома интересантно не само са аспекта коришћења

хидрогеотермалне већ и петрогеотермалне енергије (геотермална енергија стенских маса) / 16 /.

У протеклом периоду на подручју Србије јужно од Саве и Дунава, укључујући и ободне делове Панонског басена, регистрован је 241 локалитет са појавама минералних и геотермалних вода, од чега је преко 90% са природним појавама, а само 8,8% локалитета који су откривени бушењем. Од 241 локалитета хидрогеотермална истраживања су вршена на 128 локалитета, при чему на 89 локалитета је вршено истражно, истражно-експлоатационо или експлоатационо бушење. Укупно је у периоду од 1965. године до 1992. године избушено око 300 хидрогеотермалних бушотина. Од тога је око 200 бушотина дубине од 8 до 250 m, распоређено у око педесетак локалитета, 51 бушотина дубине 250 до 500 m у 35 локалитета, 35 бушотина дубине 500-1000 m у 26 локалитета и 17 бушотина дубине од 1000 до 1804 m у 15 локалитета. У 40 истражних нафтних бушотина и 37 бушотина бушеним за друге геолошке потребе откривене су или регистроване појаве геотермалних вода / 10 /.

Од 89 локалитета у којима су вршена локална истраживања са истражним бушењем као завршном фазом истраживачког процеса на 24 локалитета (26,9 %) су добијени негативни резултати на 54 локалитета (59,6%) делимично позитивни резултати док су само на 17 локалитета (13,5%) добијени веома позитивни резултати који омогућавају даља истраживања и коришћења откривеног геотермалног потенцијала.

У табели 2.6 је дат приказ основних техничких карактеристика за неколико најзначајнијих природних и вештачких (бушотина) извора са овог подручја.

Највећи број природних извора има релативно малу издашност и ниску температуру геотермалних вода тако да не омогућавају добијање већих количина топлотне енергије. Због тога су у близини постојећих природних извора у бањама често бушене дубље бушотине које су повећавале њихову издашност у циљу већег коришћења ових вода за балнеолошко-рекреативне потребе као и основне енергетске потребе.

Табела 2.6 Преглед основних карактеристика неких извора и бушотина централне и јужне Србије

Рб	Врста	Место	Издаш-	Излазна	Топлотна снага и	
			ност	температура	потенцијал извора	
			l/s	°C	MW	ten/god
1.	бушотина	Нишка бања	50	37	5,2	3929
2.	извор	Прибојска бања	70	36	7,0	5285
3.	бушотина	Овчар бања	50	38	5,5	4095
4.	бушотина	Матарушка бања	34	43	4,4	3310
5.	извор	Јошаничка бања	15	78	4,1	3119
6.	бушотина	Соко бања	28	44	3,8	2840
7.	извор	Луковска бања	60	53	10,3	7738
8.	бушотина	Рибарска бања	37	44	4,9	3738
9.	извор	Врањска бања	44	85	13,5	10120
10.	бушотина	Врањска бања	27	111	11,2	8419

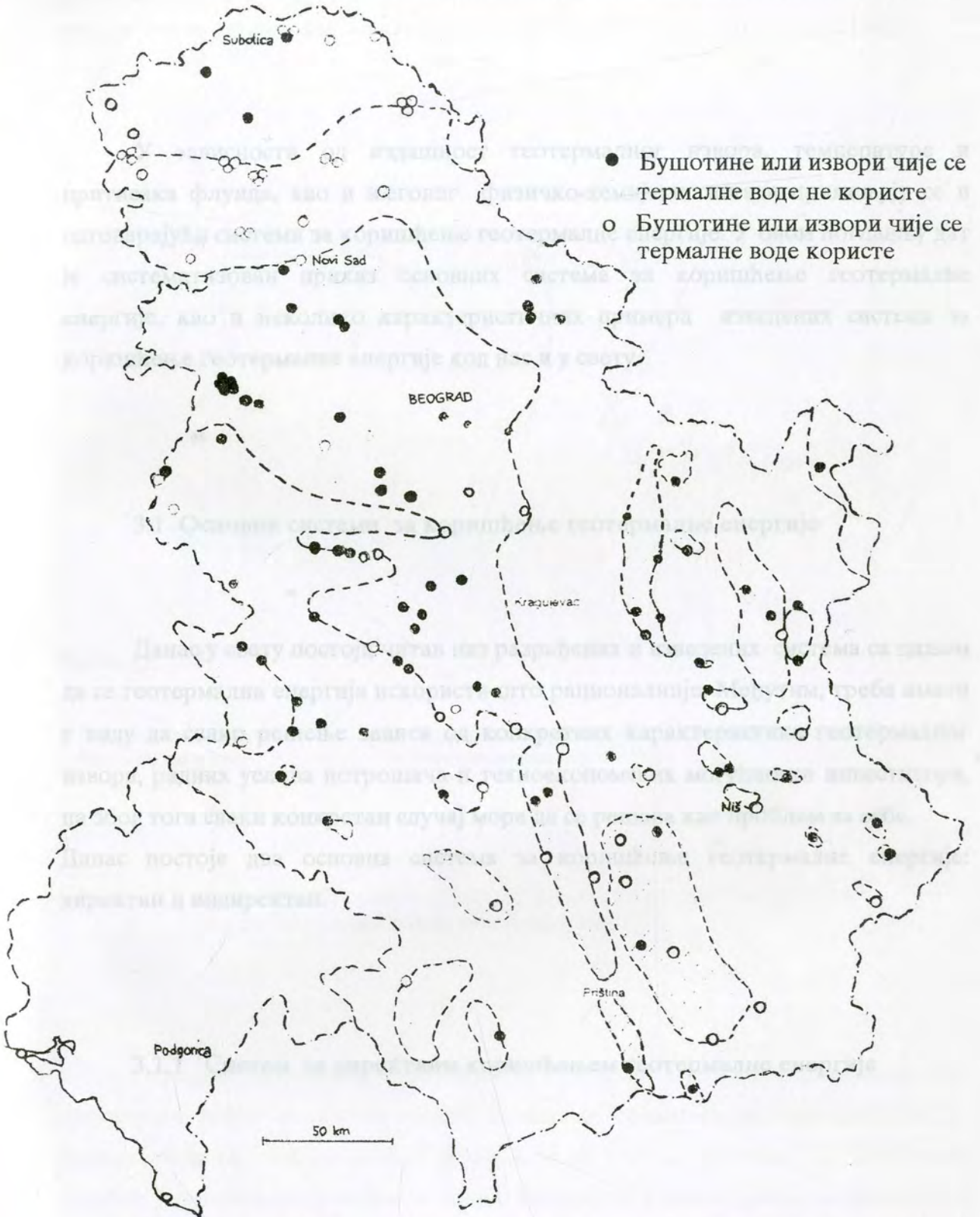
Најповољнији природни извори су на локалитетима у Врањској, Јошаничкој и у Сијаринској бањи.

Укупно искористиве геотермалне резерве са овог подручја се процењују на око 132 MW топлотне снаге, што је еквивалентно 107048 ten/god / 10 /.

На слици 2.1 приказана је карта геотермалних налазишта Србије / 20 /, где су приказане геотермалне бушотине или извори у Србији уз напомену о њиховом коришћењу. Може се констатовати да постоји око 80 бушотина са геотермалном водом чији се топлотни потенцијал не користи.

На основу процена о потенцијалима геотермалне енергије код нас може се констатовати да су укупне резерве којима Србија располаже велике /21/. Међутим, истовремено резерве геотермалне енергије су недовољно искоришћене, с обзиром да износе око 220 MW топлотне снаге, док инсталисана снага свих капацитета који користе геотермалну енергију износи преко 100 MW / 10 / и то углавном за балнеолошко-рекреативне потребе.

СИСТЕМИ ЗА КОРИШЋЕЊЕ ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ



Слика 2.1 Карта геотермалних налазишта Србије / 20/

3. СИСТЕМИ ЗА КОРИШЋЕЊЕ ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ

У зависности од издашност геотермалног извора, температуре и притисака флуида, као и његовог физичко-хемијски састава примењују се и одговарајући системи за коришћење геотермалне енергије. У овом поглављу дат је систематизован приказ основних система за коришћење геотермалне енергије, као и неколико карактеристичних примера изведених система за коришћење геотермалне енергије код нас и у свету.

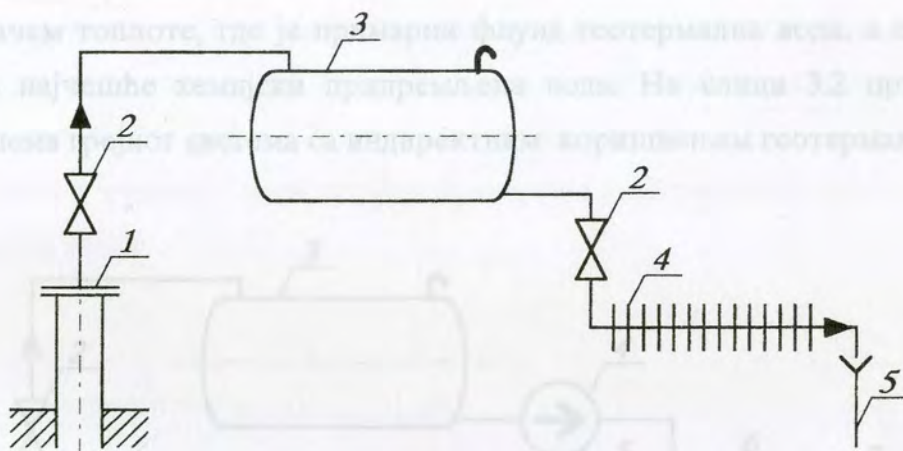
3.1 Основни системи за коришћење геотермалне енергије

Данас у свету постоји читав низ разрађених и изведених система са циљем да се геотермална енергија искористи што рационалније. Међутим, треба имати у виду да свако решење зависи од конкретних карактеристика геотермалног извора, радних услова потрошача и техноекономских могућности инвеститора, па због тога сваки конкретан случај мора да се решава као проблем за себе. Данас постоје два основна система за коришћење геотермалне енергије: директан и индиректан.

3.1.1 Систем са директним коришћењем геотермалне енергије

Системи са директним коришћењем су једноставни и економски погодни, јер се геотермална вода директно уводи у грејни систем. Међутим, њихова примена је релативно ограничена, јер су геотермалне воде са повољним

физичко-хемијским саставом и температуром веома ретке. На слици 3.1 дата је типска шема грејног система са директним коришћењем геотермалне воде.



Легенда:

1. Геотермална бушотина
2. Регулациони вентил

3. Резервоар геотермалне воде
4. Топлотни потрошачи

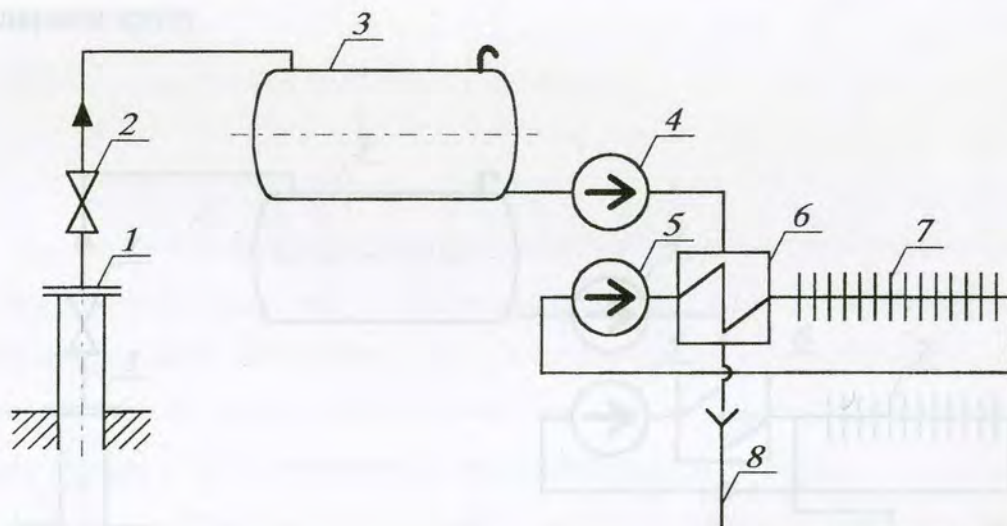
5. Испуст воде

Слика 3.1 Једноставно решење прикључивања топлотног потрошача на геотермални извор или бушотину /22/

Геотермална вода из бушотине (1) се одводи у отворени резервоар (3) инсталисан изнад површине земље одакле се гравитацијом транспортује до грејних тела (4). Регулација се врши помоћу ручних вентила (2). Употреба оваквих једноставних решења је веома популарна у медитеранским земљама и обично је намењена за загревање мањих пластеничких конструкција намењених за производњу раних пољопривредних култура / 22 /.

3.1.2 Систем са индиректним коришћењем геотермалне енергије

У свету, а и код нас знатно су распрострањеније минерализоване геотермалне воде, па је код њих потребно применити систем са индиректним коришћењем геотермалне енергије. Ови системи се углавном граде са измењивачем топлоте, где је примарни флуид геотермална вода, а секундарни флуид је најчешће хемијски припремљена вода. На слици 3.2 приказана је типска шема грејног система са индиректним коришћењем геотермалне воде.



Легенда:

1. Геотермална бушотина
2. Регулациони вентил
3. Резервоар геотермалне воде

4, 5. Пумпа
6. Измењивач топлоте
7. Топлотни потрошачи

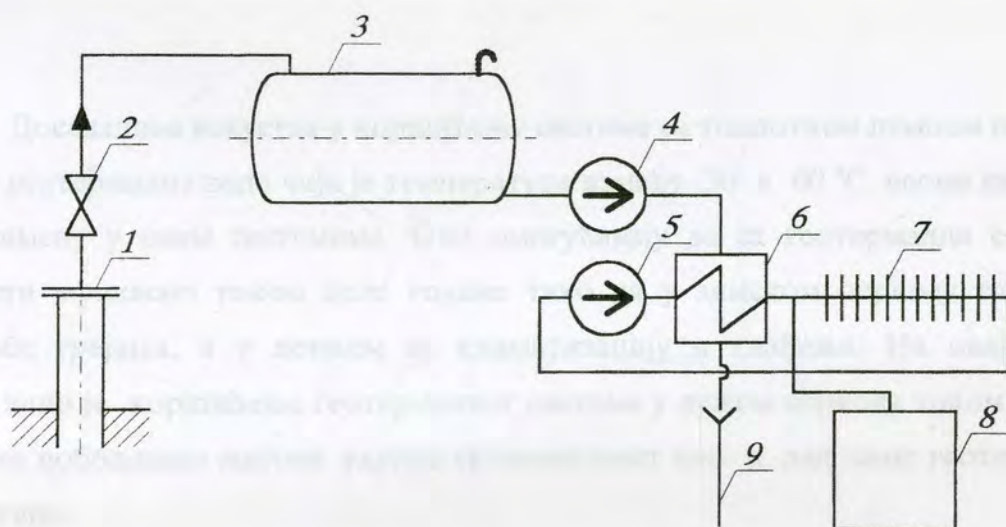
8. Испуст воде

Слика 3.2 Геотермална инсталација са индиректним коришћењем геотермалне енергије

Геотермална вода из бушотине (1) се уводи у резервоар (3) одакле се пумпом (4) транспортује до измењивача топлоте (6) где предаје топлоту грејном флуиду који циркулише кроз секундарни грејни круг. Охлађена геотермална вода из измењивача топлоте одлази у испуст (8). Загрејани флуид у секундарном кругу се пумпом (5) транспортује до топлотних потрошача (7).

3.1.2.1 Систем са индиректним коришћењем геотермалне енергије и допунским извором топлоте

Потрошња топлоте за грејање као и степен искоришћења и дужина рада геотермалне бушотине директно зависе од спољне температуре. Када је спољна температура ниска тако да снага геотермалног извора није довољна да задовољи топлотне потребе потрошача најчешће се примењује систем са допунским извором топлоте. На слици 3.3 приказана је типска геотермална шема са индиректним коришћењем геотермалне енергије и догревањем воде у секундарном кругу.



Легенда:

- | | | |
|-------------------------------|-----------------------|----------------|
| 1. Геотермална бушотина | 4., 5. Пумпа | 8. Котао |
| 2. Регулациони вентил | 6. Топлотни потрошачи | 9. Испуст воде |
| 3. Резервоар геотермалне воде | 7. Измењивач топлоте | |

Слика 3.3 Геотермална инсталација са индиректним системом грејања и допунским извором топлоте

Ова шема је принципијелно иста као и на слици 3.2, с тим што је у секундарни грејни круг прикључен котао (8) за догревање секундарног флуида

који користи конвенционално гориво (угаљ, мазут, природни гас) или електричну енергију. Допунски извор за догревање секундарног флуида се укључује по потреби, тј. када је спољна температура толико ниска да геотермални извор није у стању да задовољи топлотне потребе потрошача (7). На овај начин се помоћу геотермалне енергије покрива базни део топлотног оптерећења, док се вршне потребе покривају из допунског извора топлоте. Ови системи се такође, као и претходно приказани, широко користе у пољопривредној производњи посебно за грејање стакленика и пластеника / 23 /.

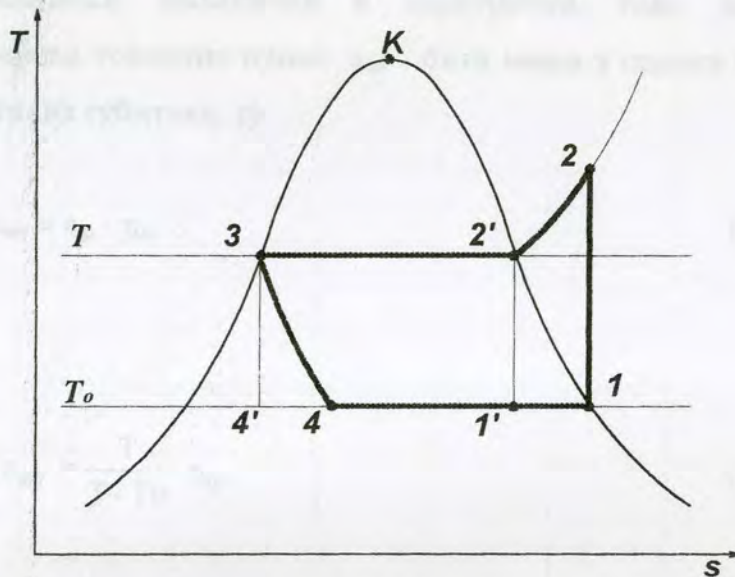
3.1.3 Системи са топлотном пумпом

Досадашња искуства у коришћењу система са топлотном пумпом показују да су геотермалне воде чија је температура између 30 и 60 °C веома погодане за примену у овим системима. Они омогућавају да се геотермална енергија користи ефикасно током целе године тако да у зимском периоду служи за потребе грејања, а у летњем за климатизацију и хлађење. На овај начин омогућено је коришћење геотермалног система у дужем периоду током године чиме се побољшава његова укупна економичност као и рад саме геотермалне бушотине.

Принцип рада топлотне пумпе се заснива на левокретном Карноовом (Carnot) циклусу, тј. истом принципу по коме раде и расхладни системи. Разлика између ова два система је једино у њиховој намени тако да се код топлотне пумпе користи топлота добијена у кондензатору за процесе грејања, док се код расхладних система користи размена топлоте у испаривачу за хлађење. Физички принцип рада топлотне пумпе се заснива на промени агрегатних стања радног медијума. За левокретни Карноов циклус је најповољније да се реализује у подручју влажне паре, приказано процесом (1',2',3,4') у T-s дијаграму на слици 3.4. Међутим због техничких проблема при сабијању влажне паре и експанзији кључале течности реализација овог процеса није остварива па се

због тога, као најповољнији теоријски циклус рада топлотне пумпе [24] користи циклус са изенталпским пригушивањем и сувим усисавањем радног медијума приказан процесом (1,2,3,4) на слици 3.4. Термодинамички гледано теоријски циклус рада топлотне пумпе чине следећи процеси (у заградама су назначени апарати помоћу којих се наведени процеси реализују):

- 1 - 2 изентропска компресија (компресор)
- 2 - 3 изобарска кондензација (измењивач топлоте - кондензатор)
- 3 - 4 изенталпско пригушивање (пригушни вентил)
- 4 - 1 изотермско и изобарско испаравање (измењивач топлоте - испаривач)



Слика 3.4 Теоријски циклус рада топлотне пумпе

Обично се за оцену степена корисности рада левокретних циклуса примењује тзв. коефицијент хлађења ϵ_h , који представља однос између одведене количине топлоте Q_0 при испаравању радног медијума и утрошеног рада L за погон компресора. Код Карноовог левокретног циклуса коефицијент хлађења ϵ_{hc} једнак је максимално могућем и користи се за упоређивање са коефицијентима хлађења осталих циклуса који се изводе у истим температурским границама.

Код топлотних пумпи уводи се појам коефицијента грејања ϵ_g који је дефинисан као однос између топлоте ослобођене у кондензатору Q и утрошеног рада L за погон компресора. Овако дефинисан коефицијент грејања топлотне пумпе односи се на идеалан (без губитака) Карноов циклус и износи:

$$\epsilon_{gc} = \frac{Q}{L} = \frac{T}{T - T_0} \quad (3.1)$$

У реалним условима рада топлотне пумпе јављају се губици који могу бити термодинамички, механички и електрични, тако да ће стварни коефицијент грејања топлотне пумпе ϵ_{stv} бити мањи у односу на идеалан ϵ_{gc} за вредност насталих губитака, тј:

$$\epsilon_{stv} = \epsilon_{gc} \cdot \eta_{tp} \quad (3.2)$$

односно,

$$\epsilon_{stv} = \frac{T}{T - T_0} \cdot \eta_{tp} \quad (3.3)$$

где су:

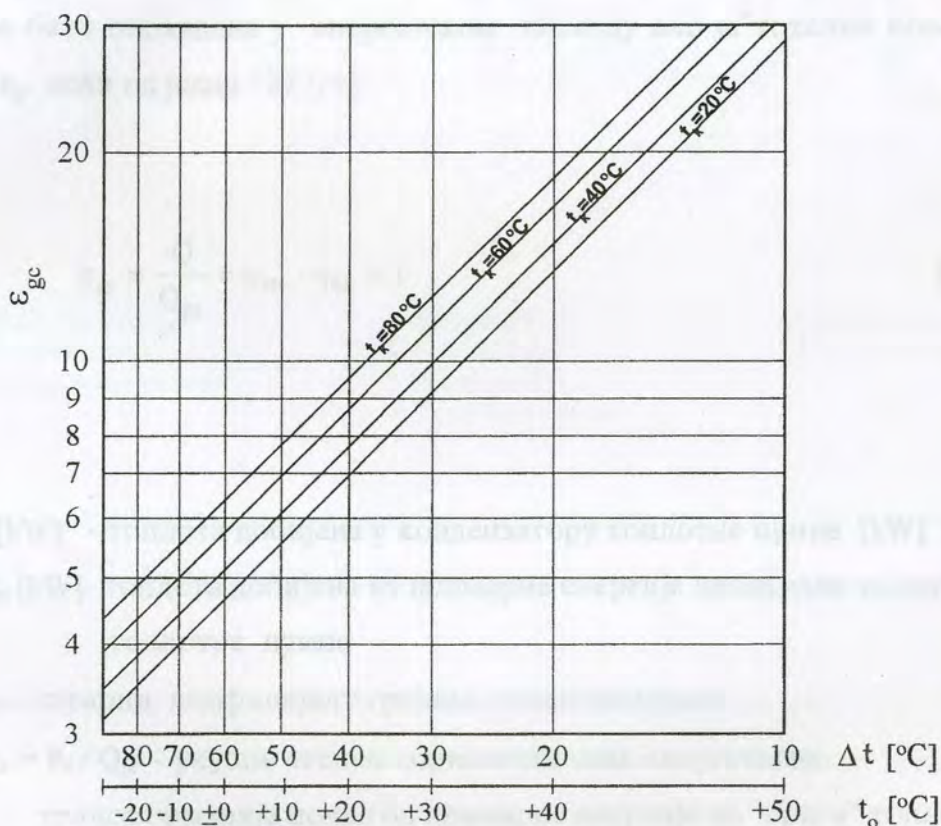
η_{tp} - коефицијент искоришћења топлотне пумпе

ϵ_{gc} - коефицијент грејања Карноовог циклуса

T_0, T [K]-температуре топлотног извора и понора

Зависно од снаге и врсте топлотне пумпе, вредност коефицијент искоришћења η_{tp} се налази у границама од 0,25 до 0,75. За топлотне пумпе средње снаге од 20 до 50 kW вредност коефицијента искоришћења η_{tp} је од 0,45 до 0,55 док се вредности η_{tp} веће од 0,6 постижу само код јединица веће топлотне снаге преко 1 MW / 25 /.

Највећи утицај на коефицијент грејања код топлотних пумпи има температурска разлика између топлотног понора и извора ($T - T_0$), односно разлика између температура испаравања и кондензације радног медијума ($t_k - t_0$). На слици 3.5 је приказан логаритамски дијаграм зависности теоријског коефицијента грејања ϵ_{gc} од температуре кондензације t_k , испаравања t_0 као и њихове разлике $\Delta t = t_k - t_0 / 26 /$.



Слика 3.5 Коефицијент грејања ϵ_{gc} за различите температуре кондензације t_k , испаравања t_0 и разлике $\Delta t = t_k - t_0 / 26 /$

Са дијаграма се види да уколико је температура кондензације између 40 и 80 °C, а температурска разлика Δt између 30 и 40 °C, могуће је постићи коефицијент грејања ϵ_{gc} од 7 до 11. Под претпоставком да је коефицијент искоришћења топлотне пумпе $\eta_{tp} = 0,5$ стварни коефицијент грејања топлотне пумпе ϵ_{stv} ће бити од 3,5 до 5,5 што је веома повољно /25/.

Код рационално изведених топлотних пумпи постижу се вредности стварног коефицијента грејања преко 4, што значи да се за сваки утрошени kWh електричне енергије за погон компресора може добити више него четворострука еквивалентна количина топлоте у кондензатору.

При оцењивању енергетске ефикасности топлотне пумпе неопходно је узети у обзир цео ланац енергетских трансформација, као и губитке који се том приликом јављају, почев од примарне енергије па све до топлотне енергије добијене у кондензатору топлотне пумпе. Имајући ово у виду примена топлотне пумпе ће бити оправдана у енергетском погледу ако је тотални коефицијент грејања ε_{gt} већи од један / 27 /, тј:

$$\varepsilon_{gt} = \frac{Q}{Q_{pr}} = \varepsilon_{stv} \cdot \eta_{uk} > 1 \quad (3.4)$$

где су:

Q [kW] - топлота добијена у кондензатору топлотне пумпе [kW]

Q_{pr} [kW]- топлота добијена из примарне енергије неопходне за погон топлотне пумпе

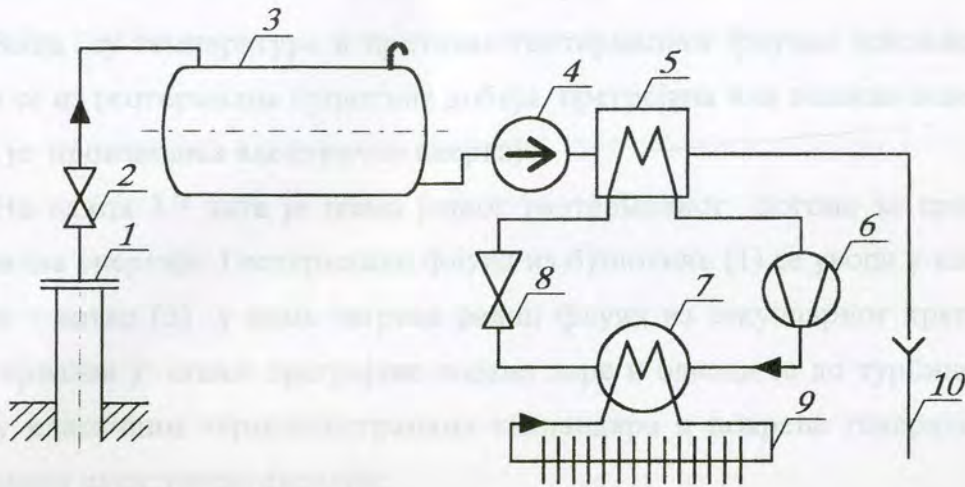
ε_{stv} - стварни коефицијент грејања топлотне пумпе

$\eta_{uk} = P_u / Q_{pr}$ - укупни степен корисности свих енергетских трансформација почев од примарне енергије до “прага” топлотне пумпе

P_u [kW] - енергија на “прагу” топлотне пумпе неопходна за њен рад укључујући и рад помоћних уређаја као што су пумпе, вентилатор, итд

Температуре геотермалних вода са подручја Србије су углавном између 40 и 80 °C, а то су температуре које омогућавају ефикасно коришћење топлотних пумпи у геотермалним системима. Поред тога геотермални извори представљају релативно поуздан извор топлоте чија је температура практично константна током целе године. Овако повољни услови омогућавају постизање високих вредности коефицијента грејања топлотних пумпи у геотермалним системима.

На слици 3.6 приказана је принципијелна шема са индиректним системом грејања и топлотном пумпом у секундарном грејном кругу.



Легенда:

- | | | |
|-------------------------------|--------------------|-----------------------|
| 1. Геотермална бушотина | 5. Испаривач | 9. Топлотни потрошачи |
| 2. Регулациони вентил | 6. Компресор | 10. Испуст воде |
| 3. Резервоар геотермалне воде | 7. Кондензатор | |
| 4. Пумпа | 8. Пригушни вентил | |

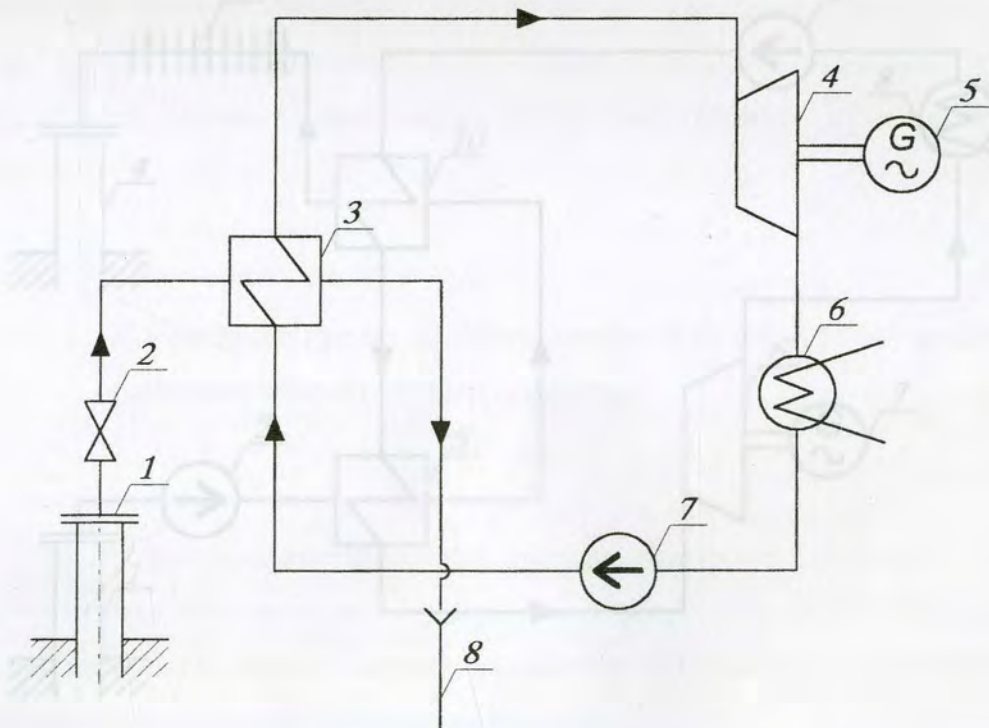
Слика 3.6 Принципијелна шема геотермалне инсталације са топлотном пумпом

Геотермална вода из бушотине (1) се уводи у резервоар (3), одакле се пумпом (4) транспортује кроз примарни круг измењивача топлоте - испаривача топлотне пумпе (5) где се расхлађује, а затим одлази у испуст (10). Кроз секундарни круг испаривача (5) протиче радни медијум топлотне пумпе који ту испарава одузимајући топлоту геотермалној води из примарног круга. Компресор (6) сабија радни медијум чиме се подиже његов топлотни потенцијал уз улагање рада. У кондензатору (7) се прегрејане паре радног медијума кондензују при чему предају топлоту разводној води која служи за грејање топлотних потрошача (9). У пригушном вентилу (8) радни медијум експандира чиме се постиже његова жељена температура, а затим одлази поново у испаривач (5) чиме се затвара кружни циклус. Разводна вода после коришћења у топлотним потрошачима (9) поново се враћа у кондензатор (7) на догревање.

3.1.4 Производња електричне енергије

Када су температура и притисак геотермалног флуида довољно високи тако да се из геотермалне бушотине добија прегрејана или влажна водена пара, могућа је производња електричне енергије.

На слици 3.7 дата је шема једног геотермалног погона за производњу електричне енергије. Геотермални флуид из бушотине (1) се уводи у измењивач топлоте - котла (3) у коме загрева радни флуид из секундарног круга. Радни флуид прелази у стање прегрејане водене паре и одводи се до турбине (4), где као и у класичним термоелектранама експандира и покреће генератор (5) за производњу електричне енергије.



Легенда :

- | | | |
|-------------------------|----------------------------------|----------------|
| 1. Геотермална бушотина | 4. Турбина | 7. Пумпа |
| 2. Регулациони вентила | 5. Генератор електричне енергије | 8. Испуст воде |
| 3. Измењивач топлоте | 6. Кондензатор | |

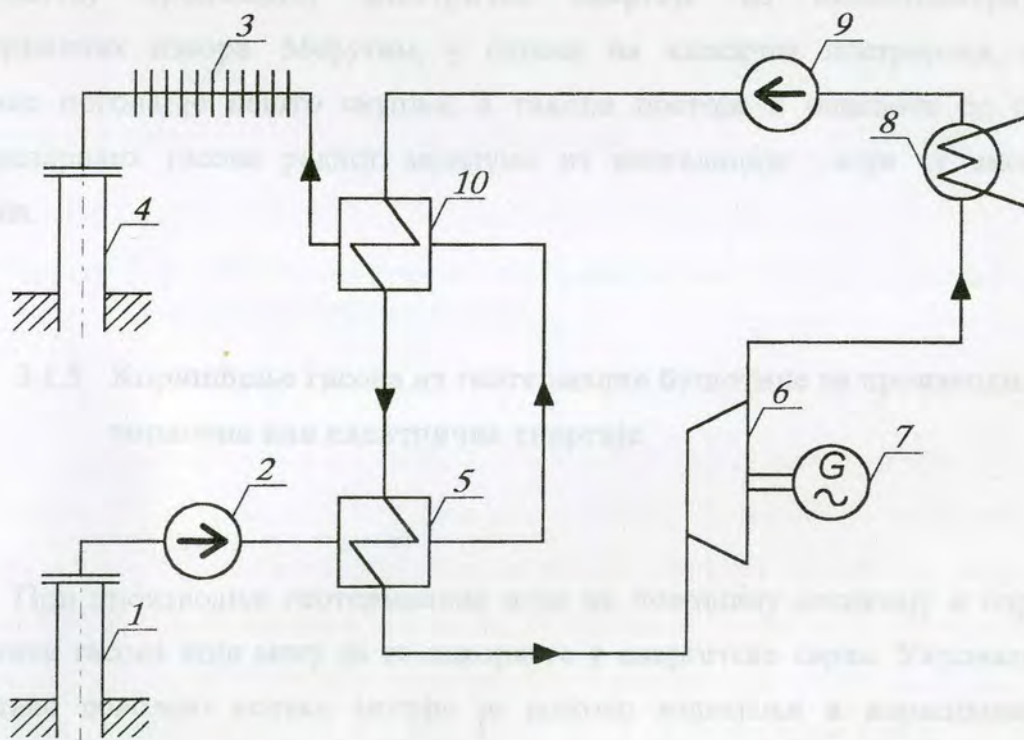
Слика 3.7 Шема геотермалне електране

Водена пара из турбине се одводи у кондензатор (6) где се кондензује и затим помоћу пумпе (7) одводи на поновно загревање у измењивач топлоте (3).

На жалост, геотермални извори који имају висок топлотни потенцијал неопходан за економски оправдану производњу електричне енергије су веома ретки у свету и код нас.

У случајевима када је температура геотермалног извора нешто нижа, тако да је геотермални флуид врела вода, могућа је производња електричне енергије путем бинарног циклуса. Данас је разрађено више топлотних шема и постројења, овог типа, који користе врелу геотермалну воду температура од 70 до 150 °C / 10 /.

На слици 3.8 приказана је принципијелна шема бинарног постројења за производњу електричне енергије.



Легенда :

- | | | |
|-------------------------|----------------------------------|--------------|
| 1. Геотермална бушотина | 5. Измењивач топлоте | 9. Пумпа |
| 2. Пумпа | 6. Турбина | 10. Догрејач |
| 3. Топлотни потрошачи | 7. Генератор електричне енергије | |
| 4. Повратна бушотина | 8. Кондензатор | |

Слика 3.8 Принципијелна шема бинарног погона за производњу електричне енергије

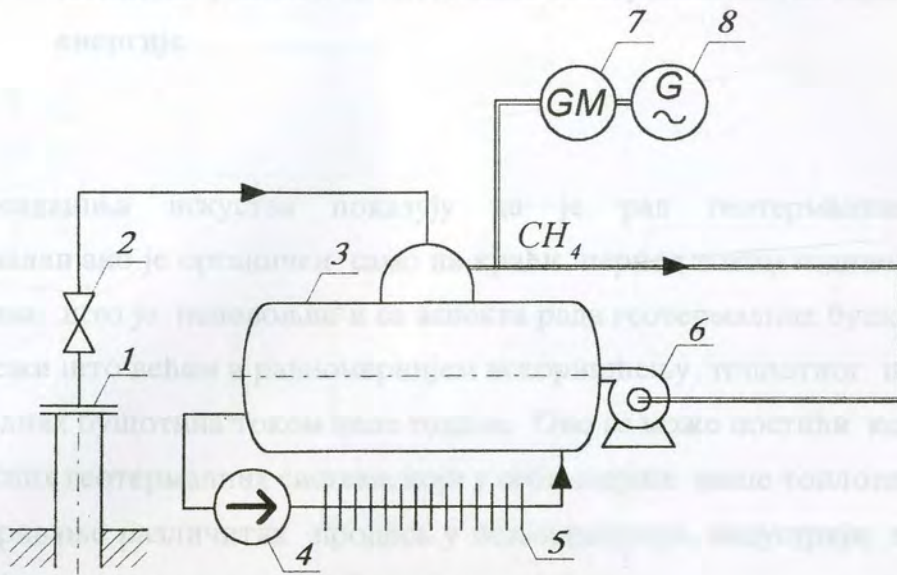
Геотермални флуид из бушотине (1) се помоћу пумпе (2) транспортује до измењивача топлоте - испаривача (5) где предаје своју топлотну енергију секундарном радном медијуму који је у овом случају течност са ниском тачком кључања. Радни медијум у измењивачу топлоте прелази у гасно стање високог притиска и одводи се у турбину (6) где експандира и покреће генератор (7) за производњу електричне енергије. Из турбине се радни медијум одводи до кондензатора (8) где се кондензује, а затим пумпом (9) враћа на догревање у догрејач (10) и поново у измењивач топлоте (5). Расхлађена геотермална вода из примарног круга се може користити за грејање нискотемпературских топлотних потрошача (3), а помоћу друге бушотине (4) да се враћа у геотермално лежиште чиме се спречава загађење околине.

Погони са бинарним циклусом представљају једину могућност за економичну производњу електричне енергије из нискотемпературних геотермалних извора. Међутим, у односу на класична постројења, израда оваквих погона је нешто скупља, а такође постоји и опасност од цурења лакоиспаривих гасова радног медијума из инсталације који су еколошки штетни.

3.1.5 Коришћење гасова из геотермалне бушотине за производњу топлотне или електричне енергије

При производњи геотермалних вода на површину доспевају и одређене количине гасова који могу да се искористе у енергетске сврхе. Уколико су те количине довољно велике могуће је њихово издвајање и коришћење за производњу топлотне или електричне енергије.

На слици 3.9 шематски је приказана геотермална инсталација са додатним уређајем за коришћење метана за допунско грејање или производњу електричне енергије.



Легенда:

- | | | |
|-------------------------|-----------------------|----------------|
| 1. Геотермална бушотина | 4. Пумпа | 7. Гасни мотор |
| 2. Регулациони вентил | 5. Топлотни потрошачи | 8. Генератор |
| 3. Дегазатор | 6. Горионик | |

Слика 3. 9 Шематски приказ геотермалне инсталације са уређајем за коришћење метана

Геотермална вода са високим садржајем метана се из бушотине (1) одводи у дегазатор (3) у коме се врши издвајање метана из топле геотермалне воде. Помоћу пумпе (4) геотермална вода се уводи у грејни систем са топлотним потрошачима (5). Издвојени метан се у принципу може искористити на два начина и то за производњу електричне енергије или топлоте. Електрична енергија се добија помоћу генератора (8) кога погони гасни мотор (7), док се топлота добија сагоревањем метана у горионику (6).

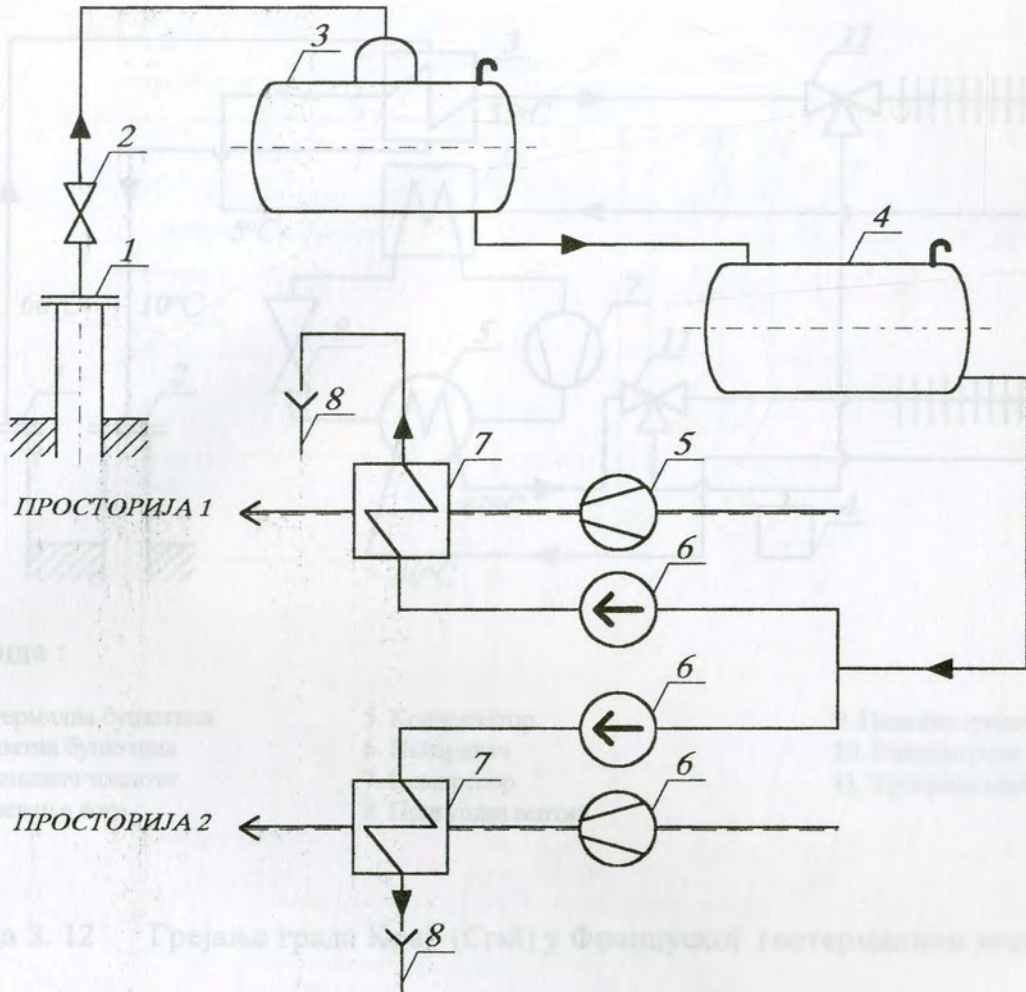
Ова решења су примењена у Србобрану и Кочанима (Македонија) где се врши догревање геотермалне воде помоћу метана који се издваја из геотермалне воде.

3.2 Изведена решења са системима за коришћење геотермалне енергије

Досадашња искуства показују да је рад геотермалних система нерационалан ако је органичен само на краћи период током године, од 2500 до 3500 часова, што је неповољно и са аспекта рада геотермалних бушотина. Због тога се тежи што већем и равномернијем искоришћењу топлотног потенцијала геотермалних бушотина током целе године. Ово се може постићи коришћењем комплексних геотермалних система који у себи садрже више топлотних апарата за остваривање различитих процеса у пољопривреди, индустрији, здравству и рекреацији, општој и заједничкој потрошњи итд.

На слици 3.11 је приказана топлотна шема за грејање свињогојске фарме у Мокрину помоћу геотермалне енергије, чији је укупни инсталирани капацитет 372 kW /10/. Из бушотине (1) геотермална вода температуре око 50 °C се одводи у дегазатор (3) одакле се слободним падом транспортује до резервоара (4), а одатле помоћу пумпи (6) кроз измењиваче топлоте вода - ваздух (7) где предаје топлоту ваздуху и хлади се на 28 °C, одакле одлази у испуст (8). Вентилатори (5) усисавају спољашњи ваздух који се у измењивачу топлоте (7) загрева до температуре 36 °C и удувавају га у просторије 1 и 2 у којима се врши узгој свиња. Уколико спољна температура падне испод -10 °C топао ваздух из просторија 1 и 2 се рециркулише. Цео процес регулисања температура је аутоматизован.

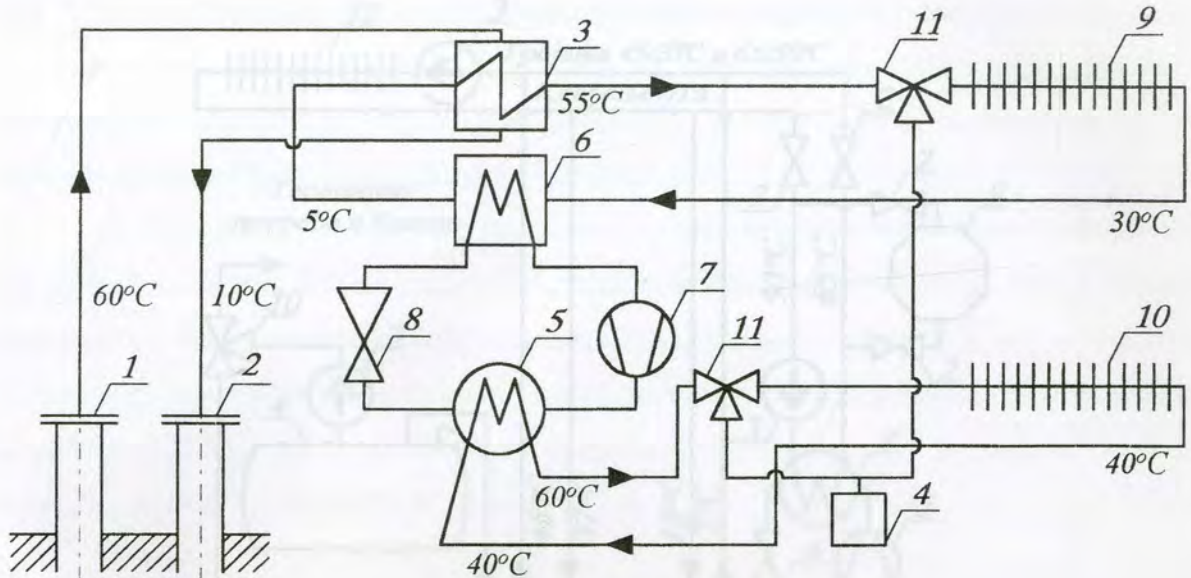
На слици 3.12 је приказано решење за грејање града Крај (Creil) од 4000 становника које је разрадио Биро за Геолошка истраживања из Париза (Bureau de Recherches Geologiques Et Minières) који се више од двадесет година бави коришћењем геотермалне енергије. Овде је предвиђен индиректан систем грејања са измењивачем топлоте (3) и три топлотне пумпе везане паралелно у грејну мрежу (на слици је приказана само једна топлотна пумпа), као и котлом за допунско грејање (4). Повратна вода из геотермалне мреже се враћа у тло кроз другу бушотину (2). Половина града се греје са радијаторским системом грејања (10), а друга половина помоћу панелног система (9).



Легенда :

- | | | |
|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| 1. Геотермална бушотина | 4. Резервоар-сбирник | 7. Измењивач топлоте |
| 2. Регулациони вентил | 5. Вентилатор-дуваљка | 8. Испуст воде |
| 3. Дегазатор | 6. Пумпа | |

Слика 3.11 Топлотна шема за грејање свињогојске фарме помоћу геотермалне воде /10/



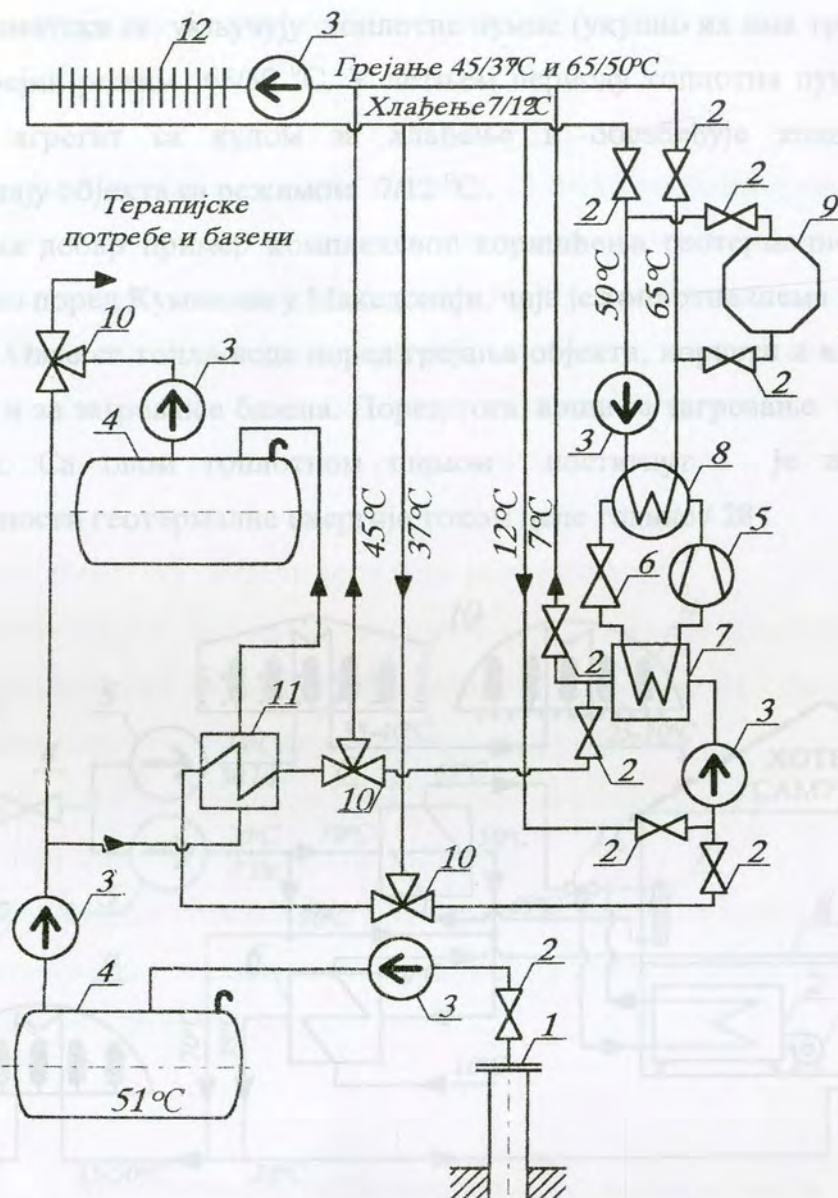
Легенда :

- | | | |
|-------------------------|--------------------|--------------------------|
| 1. Геотермална бушотина | 5. Кондензатор | 9. Панелно грејање |
| 2. Повратна бушотина | 6. Испаривач | 10. Радијаторско грејање |
| 3. Измењивач топлоте | 7. Компресор | 11. Трокрака славина |
| 4. Догревање воде | 8. Пригушни вентил | |

Слика 3. 12 Грејање града Крај (Crail) у Француској геотермалном водом

У нашој земљи геотермална енергија је нашла своју највећу примену за рекреативно балнеолошке потребе. У последње време уочљива је тенденција да се геотермална енергија што комплексније искористи у постојећим бањским центрима, тако да поред медицинских и рехабилитационих потреба служи и за грејање објекта, грејање базена, припрему потрошне топле воде итд.

Типичан пример реализованог објекта са комплексном применом геотермалне енергије је бања Јунаковић у чијем саставу је хотелски комплекс, терапеутски блок са базеном, сауне и други садржаји. На слици 3.13 приказана је топлотна шема система бање Јунаковић.



Легенда:

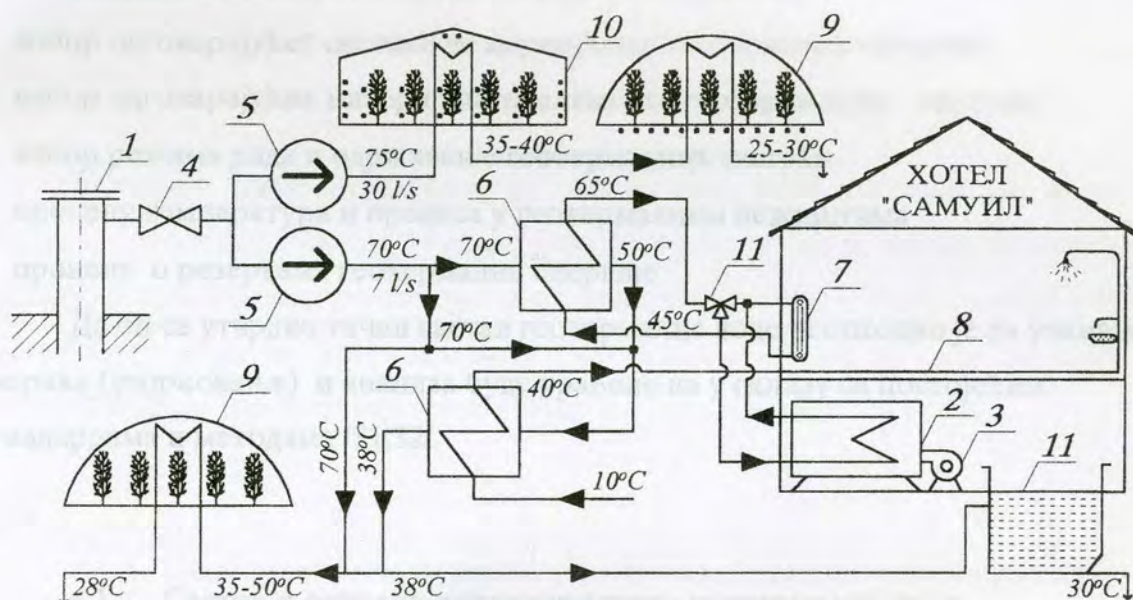
- | | | |
|-------------------------------|--------------------|-------------------------|
| 1. Геотермална бушотина | 5. Компресор | 9. Кула за хлађење воде |
| 2. Вентил | 6. Пригушни вентил | 10. Трокрака славина |
| 3. Пумпа | 7. Испаривач | 11. Измењивач топлоте |
| 4. Резервоар геотермалне воде | 8. Кондензатор | 12. Топлотни потрошачи |

Слика 3.13 Топлотна шема грејног система бање Јунаковић

Када је спољна температура до + 2 °C грејање објекта је са индиректним системом и грејним режимом 45/37 °C. Када је спољна температура испод

+ 2 °C аутоматски се укључују топлотне пумпе (укупно их има три) тако да се постиже грејни режим 65/50 °C. У летњем периоду топлотна пумпа ради као расхладни агрегат са кулом за хлађење и обезбеђује хладну воду за климатизацију објекта са режимом 7/12 °C.

Веома добар пример комплексног коришћења геотермалне енергије је бања Банско поред Куманова у Македонији, чија је топлотна шема приказана на слици 3.14. Овде се топла вода поред грејања објекта, користи и као санитарна топла вода и за загревање базена. Поред тога, врши се загревање пластеника и стакленика. Са овом топлотном шемом постигнут је висок степен искоришћености геотермалне енергије током целе године / 28 /.



Легенда:

1. Геотермална бушотина
2. Котао
3. Горионик
4. Регулациони вентил

5. Напојна пумпа
6. Измењивач топлоте
7. Радијаторско грејање
8. Санитарна топла вода

9. Пластеници
10. Стакленици
11. Трокрака славина
12. Базен за купање

Слика 3.14 Грејни систем у бањи Банско (код Куманова) /28/

4. САСТАВ И СВОЈСТВА ГЕОТЕРМАЛНЕ ВОДЕ

При експлоатацији грејних система са геотермалном водом веома су изражени проблеми стварања наслага од тешко растворних соли, запрљања зидова елемената система и корозије. Како би ови процеси могли успешно да се регулишу неопходно је познавање састава и својства геотермалне воде. Поред тога, у неким земљама прописи налажу да се анализа састава геотермалне воде изврши после њеног коришћења а пре пуштања у испуст у циљу заштите животне средине.

Подаци о саставу геотермалне воде се користе за:

- избор одговарајућег система за коришћење геотермалне енергије
- избор одговарајућих материјала за елементе геотермалних система
- избор режима рада и одржавање геотермалних система
- процену температура и процеса у геотермалним лежиштима
- процену о резервама геотермалне енергије

Да би се утврдио тачан састав геотермалне воде неопходно је да узимање узорака (узорковање) и анализа буду урађене на у складу са постојећим стандардима и методама /31,32/.

4.1 Састав и основне карактеристике геотермалне воде

Природне воде су вишекомпонентни системи који у себи садрже различите неорганске и органске супстанце. Геотермалне воде у односу на изворске и пијаће воде имају у свом саставу знатно више соли, гасова и повишену температуру што убрзава процесе корозије, таложeње наслага од чврстих материја и запрљање површина у контакту са водом. Ови процеси се у геотермалним системима одвијају континуално и веома су сложени.

На основу резултата досадашњих истраживања фактори који највише утичу на корозију, таложeње наслага од чврстих материја и запрљање металних површина у геотермалним системима су /33/:

- алкалност воде¹⁾
- садржај калцијума
- садржај растворених соли
- суспендоване чврсте честице
- садржај гасова: H_2S , O_2 , CO_2 , NH_3
- рН - вредност
- садржај хлоридних јона
- садржај сулфидних једињења
- садржај једињења угљен диоксида
- садржај једињења амонијака
- садржај сулфатних јона
- температура

У даљем раду анализиран је утицај појединих фактора на наведене процесе у геотермалним системима. Имајући у виду да је свака геотермална бушотина специфична, доношење поузданих закључака о својствима и утицају геотермалне воде на конструкционе материјале може се извести само на основу детаљно спроведених испитивања за сваки конкретан случај.

4.1.2 Поступак и стандарди за узорковање и анализу геотермалних вода

При узорковању и анализи геотермалних вода требало би посебно водити рачуна о томе да узорак буде на правилан начин припремљен за испитивање, тј. стабилизован како би се очувао његов првобитни састав. Разлике у саставу између геотермалне воде из бушотине и узорка могу да настану пре свега због промене садржаја растворених гасова као што су кисеоник, угљен диоксид и

¹⁾ Алкалност воде је назив који указује да вода има алкалну (базну) реакцију, тј. да је њена рН-вредност већа од 7. Код изворских и пијаћих вода алкалност потиче од садржаја бикарбоната калцијума и магнезијума и тада рН-вредност није већа од 8,35. Када вода садржи растворене карбонате, нпр. натријум-карбонат или хидроксиде, њена рН-вредност може да буде већа од 8,35.

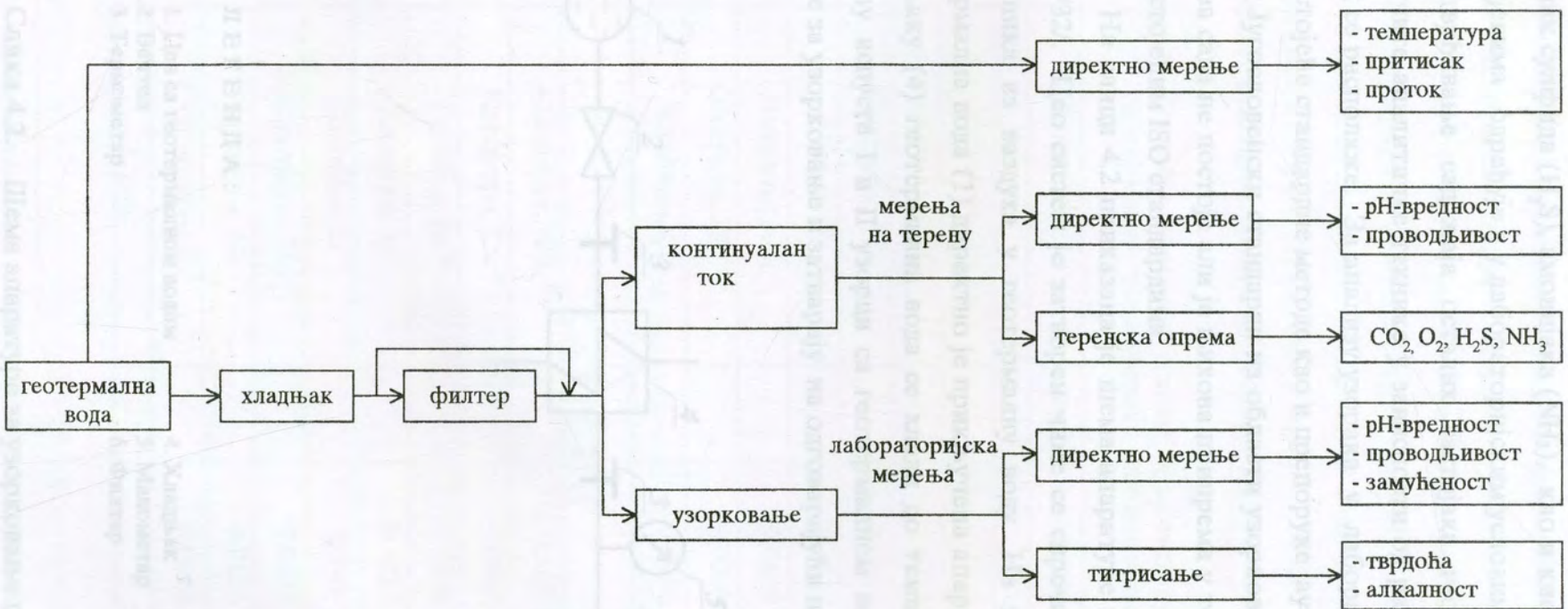
водоник сулфид. Ове промене настају најчешће приликом хлађења геотермалне воде после њеног изласка из бушотине и промене парцијалног притиска гасова. Ако се за чување узорака користе посуде од пластичних материјала требало би водити рачуна да, иако је добро заптивена, може да буде пропустљива за неке гасове као на пример кисеоник, због процеса континуалне оксидације гвожђа тј. преласка из двовалентног у тровалентно (феро-фери) или за водоник сулфид. Неки састојци из геотермалне воде као што су натријум, калијум и хлор углавном су стабилни тако да њихов садржај остаје непромењен под условом да су узорци правилно припремљени.

Како би се избегли проблеми око промене састава узорака са геотермалном водом потребно је да се на бушотини обави што је могуће већи број анализа. Ово се односи пре свега на одређивање садржаја растворених гасова у геотермалној води. Међутим за анализе које није могуће урадити на терену, већ само у лабораторијским условима, потребно је применити што сигурнију методику и апаратуру за узорковање и анализу /32/.

У циљу узимања репрезентативног узорка воде из геотермалне бушотине ISO стандард даје следеће препоруке /34/:

- узорковање извршити тек пошто истече довољна количина воде пуним капацитетом тако да се проток стабилизује, а узорак не садржи запрљања из бушотине.
- имати у виду понашање геотермалне бушотине током њеног досадашњег рада.
- пратити температуру, притисак и проток воде из геотермалне бушотине за све време испитивања.

На слици 4.1 приказана је принципијелна шема за узорковање и анализу нискотемпературних геотермалних вода. Мерењима на терену се утврђују температура, притисак, проток, рН-вредност и електрична проводљивост геотермалне воде. Колориметријска опрема се може користити како би се на бушотини одредио садржај растворених гасова: угљен диоксида (CO_2),



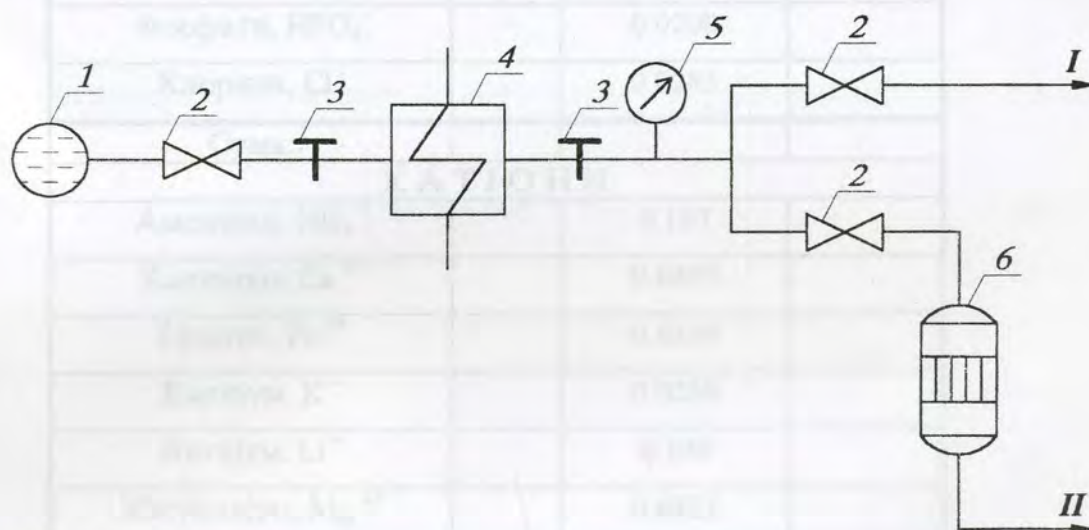
Слика 4.1. Шема блока узорковања и анализе геотермалних вода /32/

водоник сулфида (H_2S), амонијака (NH_3), као и кисеоника (O_2), који се у неким случајевима одређује и у лабораторијским условима.

За утврђивање садржаја осталих састојака геотермалне воде користе се различите аналитичке технике у зависности од радних услова и мерне опреме којом се располаже. За анализу узорака у лабораторијским условима користе се постојеће стандардне методе као и препоруке аутора /31,35/.

Југословенски стандарди из области узорковања и анализе геотермалних вода за сада не постоје али је њихова припрема у току и базираће се углавном на постојећим ISO стандардима.

На слици 4.2 приказана је шема апаратуре за узорковање геотермалне воде /32/. Цео систем је затворен чиме се спречава аерација, тј. продирање кисеоника из ваздуха у геотермалну воду. На цевовод кроз који протиче геотермална вода (1) директно је прикључена апаратура за узимање узорака. У хладњаку (4) геотермална вода се хлади до температуре спољног ваздуха, а помоћу испуста I и II узорци са геотермалном водом се директно убацују у посуде за узорковање и затварају на одговарајући начин.



ЛЕГЕНДА :

1. Цев са геотермалном водом
2. Вентил
3. Термометар

4. Хладњак
5. Манометар
6. Филтар

I Нефилтриран узорак
II Филтриран узорак

Слика 4.2. Шема апаратуре за узорковање геотермалне воде /32/

У табели 4.1 приказан је типичан формулар са подацима о хемијском саставу нискотемпературне геотермалне воде изражен преко садржаја анјона и катјона. Подаци су дати у јединицама mg/l и mgekv/l као и коефицијент помоћу кога се врши прерачунавање из mg/l у mgekv/l¹⁾. Када се врши контрола тачности хемијске анализе воде тада сума садржај анјона мора да буде једнак суми садржаја катјона израженим у mgekv/l. Међутим у пракси одступање од 5% представља задовољавајућу тачност /35/.

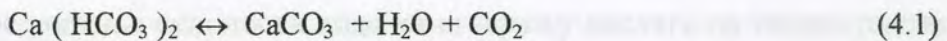
Табела 4.1 Типичан формулар о хемијском саставу нискотемпературне геотермалне воде - јонски растворене соли

Компонента	mg/l	коефицијент	mgekv/l
А Н Ј О Н И			
Бикарбонати, HCO_3^-		0.0164	
Карбонати, CO_3^{2-}		0.0333	
Сулфати, SO_4^{2-}		0.0208	
Флуор, F^-		0.0526	
Нитрати, NO_3^-		0.0161	
Фосфати, HPO_4^-		0.0208	
Хлориди, Cl^-		0.0282	
Сума:			
К А Т Ј О Н И			
Амонијак, NH_4^+		0.167	
Калцијум, Ca^{2+}		0.0499	
Гвожђе, Fe^{3+}		0.0358	
Калијум, K^+		0.0256	
Литијум, Li^+		0.144	
Магнезијум, Mg^{2+}		0.0823	
Натријум, Na^+		0.0435	
Стронцијум, Sr^{2+}		0.0228	
Сума:			

¹⁾ mgekv (милиграм-еквивалент) = 1/1000 gekv. gekv (грам-еквивалент) представља количник између атомске или јонске масе и валентности атома или јона. Када се ради о једињењима представља количник између молекулске масе и валентности дела молекула који учествује у конкретној реакцији.

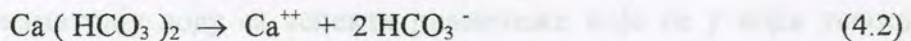
4.1.3. Оцена склоности геотермалних вода ка стварању наслага од тешко растворних соли

Једна од основних карактеристика геотермалних вода је њена изражена склоност ка стварању наслага од тешко растворних соли. Најчешћи састојак изворских и геотермалних вода је калцијум-бикарбонат који је у воденом раствору нестабилан и тежи да се разложи на калцијум карбонат и угљену киселину тј:

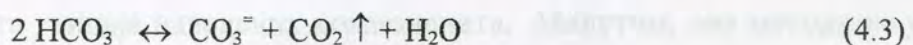


при чему се овај процес одвија на следећи начин /36/:

Растворени калцијум бикарбонат се јонизује у води на јоне калцијума и бикарбоната:



Јони бикарбоната се разлажу на карбонатне јоне, испарљиви угљен диоксид и воду :



а карбонатни јони реагују са јонима калцијума (реакција 4.2) што доводи до стварања нераствореног калцијум карбоната који се таложи:



Уколико у води дође до поремећаја равнотеже између бикарбоната, карбоната и угљене киселине могу да настану два карактеристична случаја. У случају када у води постоји вишак нераствореног калцијум-карбоната тада долази до његовог таложења на металним површинама и формирања чврстих наслага тзв. каменац. У другом случају када у води постоји вишак угљене киселине услови за формирање чврстих наслага су мање повољни. Уколико

дође до формирања превлаке од чврстих наслага калцијум - карбоната она ће да штити метал од даље корозије под условом да је континуална и мало порозана. У погледу састава, насlage су најчешће карбонатног типа (калцијум и магнезијум-карбонат), а могу бити присутна и нерастворна једињења као нпр. сулфати (CaSO_4), хидроксида (гвожђа), силицијум диоксид (SiO_2) итд.

4.1.3.1 Ланжелијеов (Langelier) и Ризнеров (Ryzner) индекс

За предвиђање склоности вода ка стварању наслага од тешко растворних соли и корозији, разрађено је више метода које на основу експерименталних резултата или одговарајућих математичких модела омогућавају одређивање наведених карактеристика. У случајевима када су чврсте насlage састављене углавном од калцијум -карбоната врло често се користе модели који се заснивају на Ланжелијеовом индексу засићења и Ризнеровом индексу стабилности. Оба ова индекса разматрају воду са аспекта равнотеже која се у води успоставља између концентрација компонената: карбоната, бикарбоната и угљене киселине. Корозионо дејство воде, односно њена тенденција ка процесима стварања или растварања наслага од калцијум-карбоната на металним површинама се оцењује само са аспекта утицаја наведених компонената. Међутим, ова метода не узима у обзир утицај других компонената из воде као нпр. хлорида, раствореног кисеоника, раствореног водоник-сулфида итд. Геотермалне воде су карактеристичне по томе да у свом саставу имају доста хлора, растворених гасова и других корозионих супстанци тако да се њихов утицај на наведене процесе мора посебно испитати експерименталним путем.

Ланжелијеов индекс (L.I.) и Ризнеров индекс (R.I.) по дефиницији су /37/:

$$\text{L.I.} = \text{pH} - \text{pH}_s \quad (4.5)$$

$$\text{R.I.} = 2\text{pH}_s - \text{pH} \quad (4.6)$$

где су:

pH - измерена актуелна pH-вредност воде при температури $25 \pm 1^\circ\text{C}$

pH_s - pH-вредност воде када је равнотежно засићена калцијум-карбонатом.

pH_s - вредност се може одредити експерименталним путем /35/ или помоћу упрошћене формуле /38/:

$$\text{pH}_s = f(t) - f[\text{Ca}^{2+}] - f(A) + f(R) \quad (4.7)$$

где су:

f(t) - функција која узима у обзир садржај угљене киселине и раствореног калцијума у зависности од температуре воде,

f[Ca²⁺] - функција која узима у обзир утицај концентрације калцијум-јона у mg/l,

f(A) - функција утицаја укупне алкалности воде у mgkv/l,

f(R) - функција утицаја укупног садржаја растворених соли у mg/l.

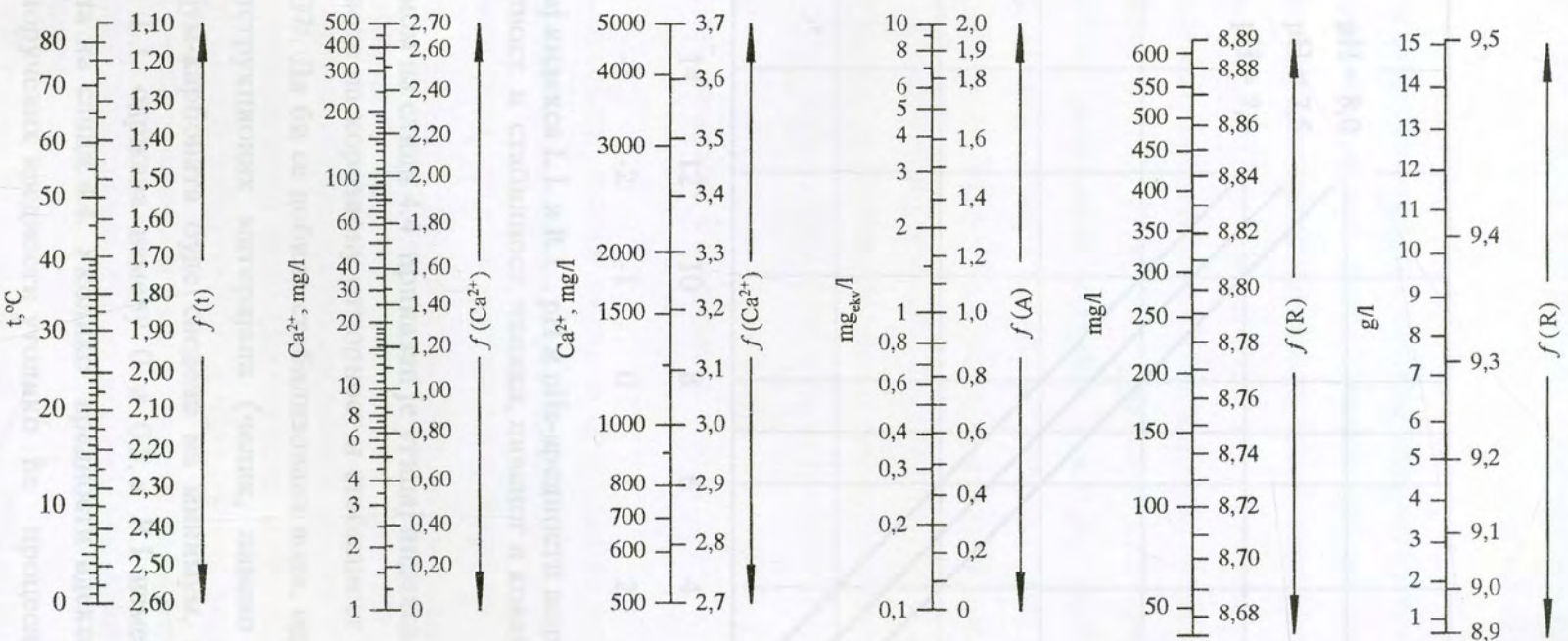
На слици 4.3 приказани су номограми за одређивање pH_s-вредности /39/.

Из једначина (4.5) и (4.6) следи да су индекси L.I. и R.I. као и pH-вредност међусобно зависни, тј. елиминисањем pH_s-вредности из ових једначина ће се добити:

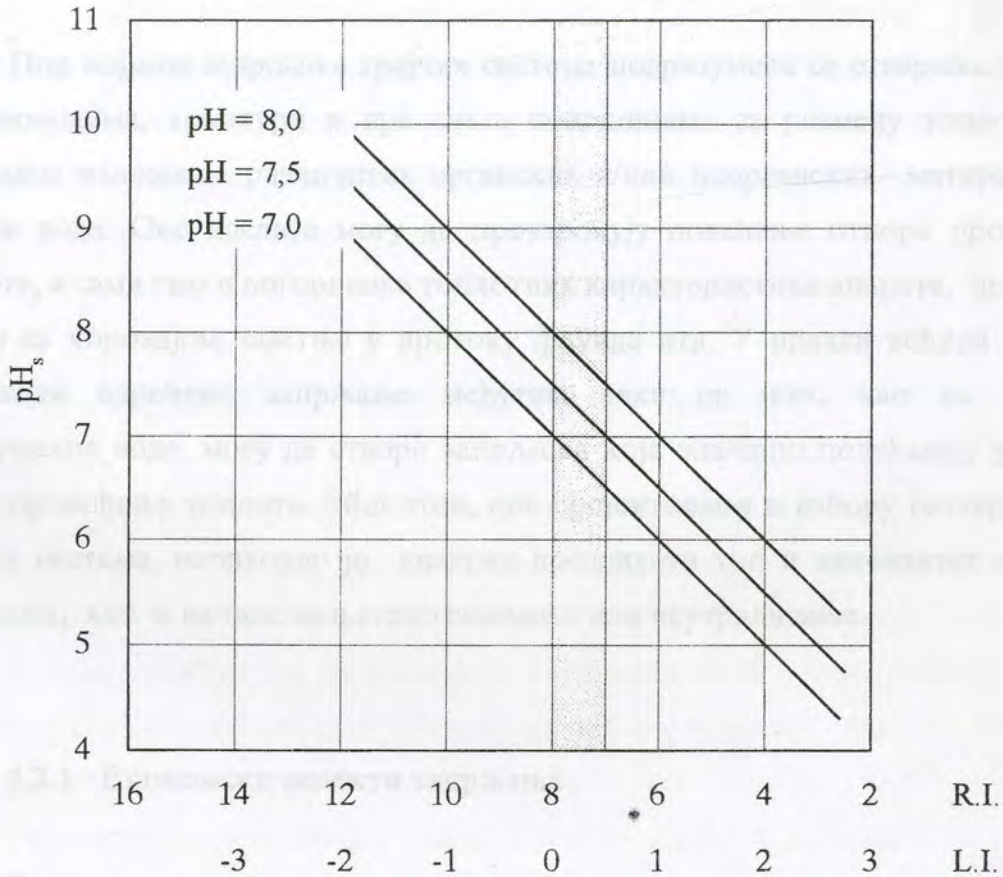
$$\text{R.I.} = \text{pH} - 2 \text{L.I.} \quad (4.8)$$

а то практично значи да је за оцену стабилности и корозивности воде довољно познавање само једаног од индекса L.I. или R.I.

Уколико је L.I. < 0 вода је агресивна јер раствара заштитни слој калцијум-карбоната са металних површина, а када је L.I. > 0 вода не раствара калцијум-карбонат и није агресивна. На основу овога следи да негативна вредност индекса L.I. означава тенденцију воде ка корозији, док његова позитивна вредност значи да вода има тенденцију ка стварању наслага од калцијум-карбоната.



Слика 4.3. Номограм за одређивање pH_s -вредности /39/



Слика 4.4. Утицај индекса L.I. и R.I. , pH и pH_s -вредности воде, на корозиону отпорност и стабилност челика, ливеног и кованог гвожђа /37/

Са дијаграмом на слици 4.4 приказан је утицај индекса L.I. и R.I., као и pH и pH_s -вредности воде на корозиону отпорност и стабилност челика, ливеног и кованог гвожђа /37/. Да би се добила стабилизована вода, односно да склоност ка корозији конструкционих материјала (челик, ливено гвожђе и сл.) и таложењу калцијум-карбоната буде сведена на минимум, потребно је да се вредност индекса L.I. одржава између 0 и 0,5, а R.I. између 7,0 и 8,0. Ова област је осенчена на слици 4.4. Уколико вредности индекса L.I. и R.I. више одступају од препоручених вредности утолико ће процеси корозије, односно таложења калцијум-карбоната бити интензивнији.

4.2 Запрљање грејних система са геотермалном водом

Под појмом запрљање грејних система подразумева се стварање наслага на цевоводима, арматури и пре свега површинама за размену топлоте као последица таложења различитих органских и/или неорганских материја које садржи вода. Ове насlage могу да проузрокују повећање отпора провођењу топлоте, а сами тим и погоршање топлотних карактеристика апарата, проблеме у вези са корозијом, сметње у протоку флуида итд. У пракси већина флуида производи одређено запрљање међутим неки од њих, као на пример геотермалне воде, могу да створе запрљања која значајно повећавају укупан отпор провођењу топлоте. Због тога, при пројектовању и избору геотермалних грејних система, неопходно је унапред предвидети тип и интензитет могућег запрљања, као и начине за његово смањење или неутралисање.

4.2.1 Економски аспекти запрљања

Разлози за повећано интересовање и проучавање процеса запрљања у последње две деценије су најчешће су економске природе. Тако је на пример утврђено да финансијски губитак настао због запрљања на измењивачима топлоте у Великој Британији износи 0.5% бруто националног дохотка или око 300-500 милиона фунти стерлинга у 1979. години, док је у рафинеријама САД овај губитак износио око 1,4 милијарди америчких долара (USD) за годину дана /40/. Јасно је да је трошак услед запрљања значајан, међутим потпуна економска анализа није могућа без познавања типа и интензитета запрљања. Уколико се процес запрљања може предвидети тада је могуће одредити и оптималан број апарата које треба периодично током године искључити из погона због чишћења и одржавања.

Почев од 1960. године па до данашњих дана учињен је значајан напредак у схватању процеса запрљања. Међутим, сам механизам стварања запрљања као и његова промена у зависности од времена, до данас није у потпуности разјашњен. Интересовање за ову област је значајно порасло у последњих

двадесетак година, што се посебно огледа у повећаном броју литературних података, као и стручних скупова. Значајнији извори информација о запрљању започињу углавном са пионирским радовима Таборека (Taborek), Епстајна (Epstain), Хасона (Hasson), Кнудсена и Роја (Knudsen & Roy). Године 1979. почео је да излази из штампе часопис *Fouling Prevention Research Digest*, а од 1978. у употреби су амерички стандарди ТЕМА /41/ са препорукама за извођење и пројектовање измењивача топлоте.

4.2.2 Дефиниција отпора провођењу топлоте услед запрљања

Отпор провођењу топлоте услед запрљања је отпор који се јавља при транспорту топлоте између радног флуида и површине за размену топлоте. У току експлоатације измењивача топлоте долази до таложења нечистоћа, чврстих материја и других запрљања на површинама за размену топлоте што проузрокује повећање укупног отпора провођењу топлоте, односно смањење коефицијента пролаза топлоте.

Укупан отпор провођењу топлоте услед запрљања површине за размену топлоте измењивача у току експлоатационог времена τ може се дефинисати изразом:

$$R = \frac{1}{k_{\tau}} - \frac{1}{k_0} \quad (4.9)$$

где су:

R [m^2K/W] - укупан отпор провођењу топлоте услед запрљања површине за размену топлоте

k_0 [W/m^2K] - вредност коефицијента пролаза топлоте за незапрљан измењивач, тј. на почетку експлоатационог периода ($\tau = 0$)

k_{τ} [W/m^2K] - вредност коефицијента пролаза топлоте за исти измењивач после експлоатационог периода τ

У општем случају за цилиндричну површину (цев) вредност коефицијента пролаза топлоте ће бити /29/:

$$\frac{1}{k_{\text{ref}}} = \frac{1}{\alpha_u} \cdot \frac{S_{\text{ref}}}{S_u} + R_u \cdot \frac{S_{\text{ref}}}{S_u} + R_z + \frac{1}{\alpha_s} \cdot \frac{S_{\text{ref}}}{S_s} + R_s \cdot \frac{S_{\text{ref}}}{S_s} \quad (4.10)$$

где су:

k_{ref} [W/(m²K)]- коефицијент пролаза топлоте за референтну површину

S_{ref} [m²] - референтна површина

α_u [W/(m²K)] - коефицијент прелаза топлоте са флуида на унутрашњу страну цеви (или обрнуто)

α_s [W/(m²K)] - коефицијент прелаза топлоте са флуида на спољашњу страну цеви (или обрнуто)

R_u [m² K/W] - отпори провођењу топлоте услед запрљања унутрашње стране цеви

R_s [m² K/W] - отпори провођењу топлоте услед запрљања спољашње стране цеви

R_z [m² K/W] - отпори провођењу топлоте кроз зид

$$R_z = \frac{S_{\text{ref}}}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda_z} \cdot \ln \frac{d_s}{d_u} \quad (4.11)$$

λ_z [W/mK] - коефицијент провођења топлоте за материјал зида

$S_u = d_u \cdot \pi \cdot l$ [m²] - унутрашња површина цеви

$S_s = d_s \cdot \pi \cdot l$ [m²] - спољашња површина цеви

d_u [m] - унутрашњи пречник цеви

d_s [m] - спољашњи пречник цеви

l [m] - дужина цеви

Уколико се за референтну површину усвоји спољашња површина цеви

($S_{\text{ref}} = S_s = \pi \cdot d_s \cdot l$) израз (4.10) добија облик:

$$\frac{1}{k_s} = \left(\frac{1}{\alpha_u} + R_u \right) \cdot \frac{d_s}{d_u} + R_z + \frac{1}{\alpha_s} + R_s \quad (4.12)$$

где је:

$$R_z = \frac{d_s}{2 \cdot \lambda_z} \cdot \ln \frac{d_s}{d_u} \quad (4.13)$$

Тачан прорачун укупног отпора провођењу топлоте услед запрљања није могућ јер је процес настајања запрљања веома сложен и зависи од параметара чији утицај може само приближно да се оцени. Због тога, вредност овог отпора се одређује експерименталним путем а добијене вредности се користе у практичним прорачунима /41/.

Укупан отпор провођењу топлоте услед запрљања R може да се дефиниши и помоћу тзв. фактора чистоће који износи /42/:

$$CF = \frac{k_t}{k_0} \quad (4.14)$$

Комбиновањем израза 4.9 и 4.14 добиће се:

$$R = \frac{1}{k_0} \left(\frac{1}{CF} - 1 \right) = \frac{1 - CF}{k_0 - CF} \quad (4.15)$$

На основу познате вредности фактора чистоће CF , који се одређује експериментално, може се одредити и вредност отпора R . За незапрљан измењивач, тј. на почетку експлоатационог периода је $CF=1$.

4.2.3. Анализа процеса запрљања

Процес запрљања подразумева процес стварања наслага од материја које садржи флуид на површинама које су у контакту са флуидом, а посебно на површинама преко којих се врши размена топлоте. У принципу запрљање може да настане тако да се у почетној фази наслага таложе на карактеристичну површину а затим у каснијој фази, како слој наслага постаје дебљи, може доћи до њиховог постепеног одвајања у зависности од механичке чврстоће, адхезионе силе између наслага и карактеристичне површине, брзине струјања флуида итд.

Запрљање је динамички процес тако да се отпор провођењу топлоте услед запрљања мења са временом и зависи од брзине формирања и одвајања наслага.

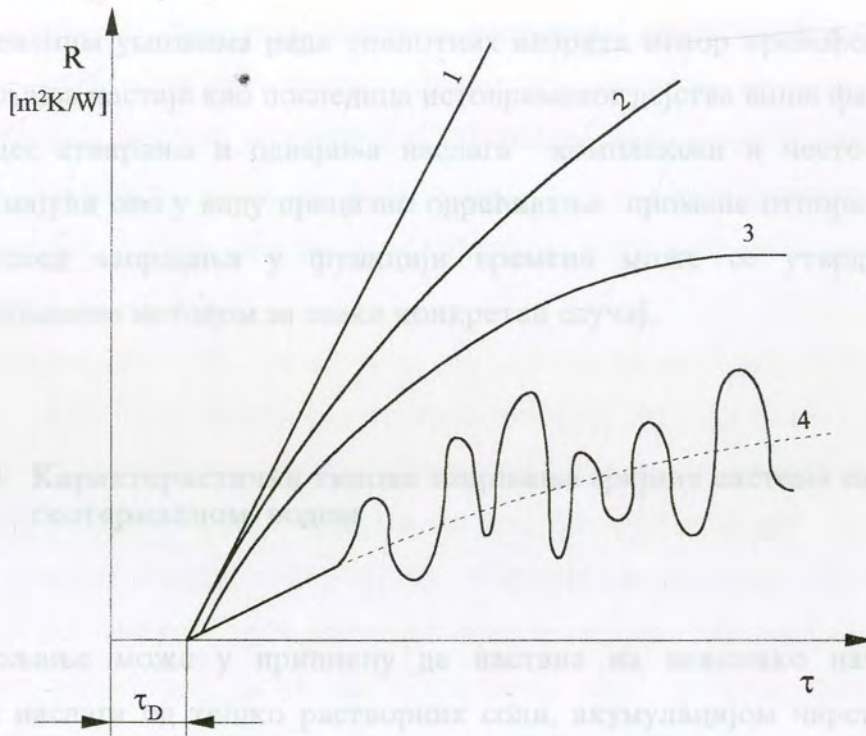
На слици 4.5 дат је графички приказ промене отпора провођењу топлоте услед запрљања R у функцији времена τ за различите типове запрљања.

Линеаран раст отпора провођењу топлоте услед запрљања, приказана правом (1), указује на то да је брзина формирања наслага константна док је брзина одвајања наслага мала, односно да је разлика између брзине формирања и одвајања наслага константна.

Промена приказана кривом (2) је карактеристична по томе јер после почетног периода у коме је отпор провођењу топлоте услед запрљања R имао приближно линеаран раст, почиње спорије да расте. Спорији раст отпора R може да буде последица мање брзине стварања наслага или веће брзине одвајања наслага, односно мање разлике између брзине стварања и одвајања наслага у односу на почетан (линеаран) период када је ова разлика била приближно константна.

Код случаја приказаног кривом (3) отпор R асимптотски достиже одређену вредност после почетног периода у коме је имао приближно линеаран раст. Оваква промена отпора провођењу топлоте услед запрљања је карактеристична за меке или крте насlage које се лако одвајају са површина на којима настају. У овом случају брзина стварања наслага је константна док је брзина одвајања наслага пропорционална дебљини насталих наслага. Поред овога промена отпора R , приказана са кривом (3), може да настане у случају

ако брзина стварања наслага константно опада због чега и дебљина новонасталих наслага спорије расте све док брзина стварања наслага не постане занемарљиво мала.



Легенда:

Облик промене отпора провођењу топлоте услед задрљања:

- | | |
|--------------|----------------|
| 1. Линеаран | 3. Асимптотски |
| 2. Опадајући | 4. Тестераст |

Слика 4.5 Карактеристични типови промене отпора провођењу топлоте услед задрљања у функцији времена /42/

Промена отпора провођењу топлоте услед задрљања приказан са "тестерастом" кривом (4) може да настане услед периодичних промена радних услова, на пример због периодичног третмана воде и последица је наглог одвајања створених наслага.

У многим случајевима у почетној фази рада топлотних апарата уочен је временски период τ_D у коме не долази до стварања наслага, односно нема отпора провођењу топлоте услед запрљања. Током овог периода на површинама за размену топлоте долази до стварања језгара из којих, у каснијој фази рада, настају наслаге.

У реалним условима рада топлотних апарата отпор провођењу топлоте услед запрљања настаје као последица истовременог дејства више фактора тако да је процес стварања и одвајања наслага комплексан и често међусобно зависан. Имајући ово у виду прецизно одређивање промене отпора провођењу топлоте услед запрљања у функцији времена може се утврдити само експерименталном методом за сваки конкретан случај.

4.2.4 Карактеристични типови запрљања грејних система са геотермалном водом

Запрљање може у принципу да настане на неколико начина и то: стварањем наслага од тешко растворних соли, акумулацијом чврстих честица суспендованих у води, услед корозионих продуката, стварањем органског филма (биозапрљање) или комбинациом наведених случајева.

Геотермалне воде садрже различите органске и неорганске супстанце, као и многе нечистоће чија брзина таложења зависи од температуре, притиска и брзине воде. Када се геотермална вода користи у грејним системима стварање ових наслага је готово неизбежно посебно на површинама за размену топлоте.

Присуство гасова као што су кисеоник, угљен-диоксид и водоник-сулфид заједно са хлоридним и сулфатним јонима доводи скоро сигурно до појаве корозије.

Геотермална вода представља изврсну средину за развој биозапрљања.

Због различитог састава геотермалних вода појаву стварања чврстих наслага и корозије треба испитати посебно за сваки случај помоћу одговарајуће експерименталне опреме како у лабораторијским тако и у експлоатационим условима.

4.2.4.1. Запрљање услед наслага од тешко растворних соли

Геотермалне воде су карактеристичне по томе јер садрже многе неорганске соли које имају нормалну или инверзну растворљивост¹⁾, као што су: калцијум карбонат, калцијум сулфат, различите врсте калцијум фосфата, калцијум и магнезијум силикати, калцијум и магнезијум хидроксид, натријум сулфат, литијум сулфат и карбонат. У геотермалним системима најчешће долази до стварања запрљања у чијем саставу има највише калцијум-карбоната и силицијума јер су једињења на бази калцијума и силицијума основни састојци земљине коре.

Стварање наслага запрљања од калцијум-карбоната углавном је последица наглог пада притиска геотермалне воде до чега обично долази при њеном изласку из геотермалне бушотине или у грејној инсталацији на местима као што су: вентили, разна сужења, мерни инструменти итд. У природним условима садржај калцијум-карбоната у геотермалној води је на граници засићења. При наглном паду притиска долази до ослобађања CO_2 из воде, уз истовремено повећање њене рН-вредности, због чега долази до раста концентрације карбонатних CO_3^{2-} јона у раствору. Ови јони реагују са јонима калцијума Ca^{++} што доводи до стварања нерастворног калцијум-карбоната који се таложи (реакције 4.3 и 4.4). Брзина ове реакције је велика тако да је стварање наслага CaCO_3 готово тренутно. С обзиром да калцијум-карбонат има инверзну растворљивост, тј. са порастом температуре смањује се његова растворљивост, насlage CaCO_3 се чест формирају и на површинама на којима се врши размена топлоте.

Овај тип запрљања су посебно проучавали Епстајн и други аутори. У новије време значајан допринос у овој области дао је Чен (Chan) који је развио математички модел таложења калцијум карбоната из воде у зависности од различитих радних услова /43,44/. Општи закључак је да постојећи математички модели нису довољно тачни за поуздано одређивање брзине стварања

¹⁾ Неорганске соли у води могу да имају нормалну или инверзну растворљивост, што значи да њихова растворљивост са порастом температуре расте или опада. У зависности од температуре вода може да постане презасићена због чега долази до појаве кристализације и стварања чврстих наслага од нерастворних соли.

запрљања, због чега се препоручују различите експерименталне методе /35/, као и оцена на бази Ланжелијевог индекса.

За разлику од калцијум-карбоната, који има инверзну растворљивост, силицијум има нормалну растворљивост што значи да са падом температуре опада и његова растворљивост у води. Због тога стварање наслага запрљања од силицијума у геотермалним системима најчешће настаје због пада температуре геотермалне воде и то на местима као што су излазна цев из геотермалне бушотине или делови грејне инсталације (цевоводи, површине за размену топлоте итд.). Процес стварања наслага од силицијума је комплекснији од процеса стварања наслага од калцијум-карбоната с обзиром да је и његова структура сложенија. Силицијум може да постоји у кристалном или аморфном облику, а поред тога он је и полиморфан, тј. може да формира кристале различитих структура као што су: кварц, калцедон или кристобалити, при чему сваки од ових кристала има различиту растворљивост у води. Због своје сложености кинетика таложења силицијума у геотермалној води није довољно разјашњена и представља предмет проучавања истраживача.

У свом раду /45/ Чен је анализирао запрљање геотермалног грејног система услед стварања наслага од силицијума. Том приликом узети су у обзир различити фактора као што су: рН-вредност геотермалне воде, њена температура, салинитет, брзина протицања итд. Резултати о брзини таложења наслага од силицијума, односно промена отпора провођењу топлоте услед запрљања од силицијума, су добијени на основу усвојеног математичког модела и експерименталних резултата остварених у лабораторијским и експлоатационим условима. За израчунавање промене отпора провођењу топлоте услед запрљања од силицијума у геотермалној води коришћен је израз /45/:

$$\frac{dR}{d\tau} = K_R \left[\frac{C_b - C_e(t_s)}{C_e(t_s)} \right]^p (C_{OH^-})^q \quad (4.16)$$

где су:

C_b - концентрација силицијума (SiO_2) у геотермалној води

- C_e - концентрација силицијума (SiO_2) у геотермалној води при
 њеном засићењу (при одговарајућој температури t_s)
 C_{OH^-} - моларна концентрација OH^- јона у геотермалној води
 K_R - константа (одређује се експериментално)
 q - константа (одређује се експериментално)
 p - експонент (ако је реакција изотермна, тј. $t_s = const.$ усваја се $p=2$)

При коришћењу овог израза усвојена је претпоставка да је реакција изотермна, односно да је температура геотермалне воде t_s константна. Међутим, у реалним условима рада температура t_s се мења при пролазу кроз измењивач топлоте па се за прорачун усваја њена средња вредност. На овај начин се чини одређена грешка јер вредност C_e значајно зависи од t_s .

Мерење отпора провођењу топлоте услед запрљања од силицијума у лабораторијским условима изведено је помоћу мерне инсталације која се састоји од измењивача топлоте цев-у-цев, примарног и секундарног цевовода који су повезани у затворен систем. Инсталација је израђена од висококвалитетних корозионо отпорних материјала. Кроз унутрашњу цев измењивача је протицала хемијски припремљена вода, а кроз ануларни простор дестилована демиреланизована вода. Састав воде која је протицала кроз унутрашњу цев је мењан како би се испитао утицај рН-вредности, услова струјања (Рејнолдсов број), садржај раствореног силицијума и салинитета (садржај $NaCl$) на брзину стварања запрљања од садржаја раствореног силицијума. Брзина таложења, тј. промена отпора провођењу топлоте услед запрљања, је одређена на основу разлика крајње и почетне вредности коефицијента пролаза топлоте измењивача, односно помоћу израза 4.9. На основу извршених испитивања констатује се да резултати добијени у лабораторијским условима знатно одступају од резултата добијених на основу усвојеног математичког модела. Међутим, изненађујуће добро слагање резултата је добијено на основу математичког модела и експлоатационих испитивања за два геотермална извора. Овом приликом параметари дефинисани у изразу 4.16 су имали вредности: $K_R = 0,9954$, $q = 0,862$ и $p = 2$.

4.2.4.2. Запрљање честицама

Запрљање честицама настаје услед акумулације материја суспендованих у води на некој од површина у грејном систему. Овај тип запрљања је веома чест у геотермалним системима, с обзиром да геотермална вода носи са собом многе нечистоће из бушотине. Поред тога, честице могу да настану и као продукт неког од процеса у геотермалној инсталацији као што су корозија, биозапрљање или хемијска реакција.

4.2.4.3. Запрљање корозионим продуктима

Запрљање корозионим продуктима настаје услед таложења продуката хемијске реакције настале између металних делова грејног система (укључујући и површине за размену топлоте) и воде. Сомерскејлс (Somerscales) и Касем (Kassem) /46/ су дефинисали два типа овог запрљања. *Ex situ* запрљање настаје услед таложења корозионих продукта који се формирају на једном делу грејног система а таложе у другом где доспевају помоћу воденог тока. Овај тип запрљања је прикладније класирати као запрљање честицама. Други тип запрљања је *in situ* или локална корозија која настаје и задржава се на површинама за размену топлоте или другим елементима система који су у контакту са водом.

4.2.4.4. Биозапрљање

Биозапрљање (биолошко запрљање) је резултат стварања органског филма на површинама за размену топлоте или неком другом делу геотермалне инсталације и састоји се од микроорганизама и њихових продуката. Код затворених система биозапрљање може у већини случајева добро да се

регулише са одговарајућим третманом воде, међутим код отворених система са геотермалном, морском и речном водом регулација је знатно тежа.

4.2.4.5. Комбиновано запрљање

Запрљање грејних системима настаје најчешће услед стварања чврстих наслага од нерастворних соли, акумулацијом суспендованих честица, услед локалне корозије или биозапрљања. У почетној фази рада један од наведених типова запрљања може да буде доминантан, али у каснијем раду могу да се појаве и остали типови. Иако је постигнут одређени напредак у разумевању појединих фаза настајања запрљања, укупан процес до сада није у потпуности разјашњен због своје сложености.

4.2.5. Методе и стандарди за мерење отпора запрљања

Мерење запрљања елемената грејних система изазвано деловањем нискотемпературских флуида, односно мерење отпор провођењу топлоте услед запрљања, данас се углавном врши методом ткз. константног топлотног флукса /42/. Метода се састоји у томе да се на референтну површину, преко које струји флуид познатог састава и температуре, доводи константна количина топлоте (константан топлотни флукс). На основу познате вредности топлотног флукса и температуре референтне површине пре почетка испитивања (чиста површина) и на крају испитивања (запрљана површина), могуће је одредити отпор провођењу топлоте услед запрљања. Грејање површина преко којих се врши размена топлоте се најчешће остварује помоћу електричне енергије на директан или индиректан начин, чиме је омогућено једноставно мерење и одржавање константне вредности топлотног флукса

Са стандардом ASTM D4778-88 /47/ дата је методологија за мерење брзине корозије и запрљања на површинама за размену топлоте измењивача услед

деловања воде познатог састава и брзине струјања. Апаратура помоћу које се мери брзина корозије и запрљање се поставља на улаз или излаз из измењивача топлоте тако да вода која протиче кроз измењивач пролази и кроз апаратуру. На овај начин се постиже да радни услови у апаратури приближно одговарају радним условима у измењивачу топлоте.

На слици 4.6 приказана је попречни пресек апаратуре за мерење брзине корозије и запрљања. У спољну цев (1) од пластичног материјала, смештена је испитна цев (2) пречника 3/8" - 1/2" познатог хемијског састава, док је у њу смештен електро грејач (3). Кроз цев (1) протиче вода чије се корозионо деловање и запрљање испитује тако да она струји преко цеви (2) која се греје помоћу електро грејача. Димензије апаратуре, брзина протичања воде кроз апаратуру као и вредност топлотног флукса, односно снага електро грејача, одређују се на основу димензија измењивача топлоте, брзине протичања воде кроз измењивач, температуре воде итд. и израчунавају се помоћу одговарајућих израза /47/.

Минимално време испитивања је 14 дана, а препоручено између 30 и 60 дана.

Брзина запрљања се утврђује на основу масе чврстих наслага створених током испитивања на зидовима испитне цеви (2), времена испитивања и референтне површине тј.:

$$v_d = \frac{m_d}{d_2 L_e \tau} \quad [\text{mg/mm}^2 \text{ h}] \quad (4.17)$$

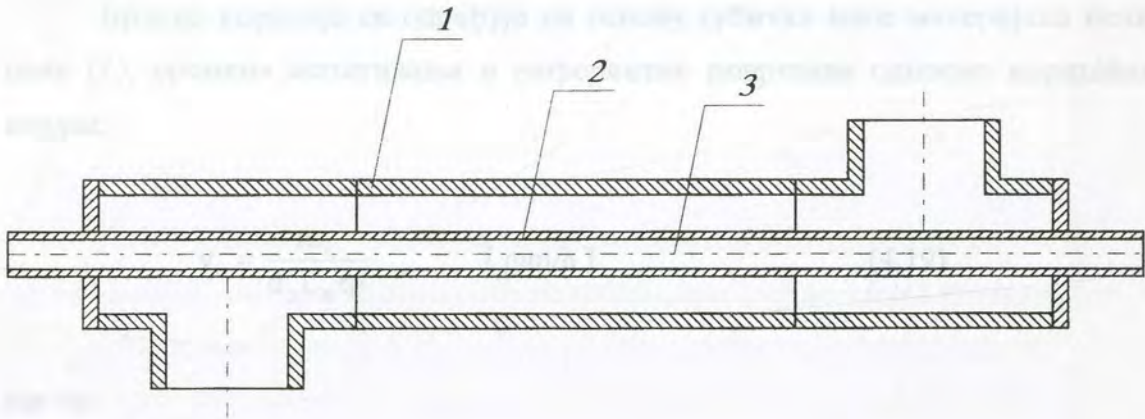
где су:

m_d [mg] - маса чврстих наслага

d_2 [mm]-спољни пречник испитне цеви

L_e [mm]- дужина испитне цеви изложена запрљању

τ [h] - време испитивања



Легенда:

- 1 Спољна цев
- 2 Испитна цев
- 3 Простор за електро грејач

Слика 4.6 Попречни пресек апаратуре за утврђивање корозије и задрљања према стандарду ASTM D4778-88 [47]

Маса чврстих наслага створених током испитивања m_d се одређује као разлика између масе испитне цеви на крају испитивања (задрљана цев) и очишћене од чврстих наслага (очишћена цев) тј.:

$$m_d = m_z - m_{od} \text{ [mg]} \quad (4.18)$$

где су:

m_z [mg]- маса испитне цеви на крају испитивања (задрљана цев)

m_{od} [mg]- маса испитне цеви после уклањања чврстих наслага (очишћена цев)

Маса чврстих наслага m_d може да се утврди и директним мерењем масе наслага издвојених са испитне цеви. Издвајање наслага се врши на механички или хемијски начин по тачно утврђеном поступку.

Брзина корозије се одређује на основу губитка масе материјала испитне цеви (2), времена испитивања и референтне површине односно коришћењем израза:

$$v_c = \frac{m_c}{d_2 L_h \tau \rho} \quad [\text{mm/h}] \quad (4.19)$$

где су:

m_c [mg]- губитак масе материјала испитне цеви услед корозије

L_h [mm]- дужина испитне цеви изложена грејању

ρ [mg/m³] - густина материјала испитне цеви

Губитак масе материјала испитне цеви услед корозије m_c се одређује као разлика између масе испитне цеви после поступка уклањања чврстих наслага m_{od} и њене масе пре почетка испитивања m_p кориговане за фактор који узима у обзир губитак масе материјала цеви услед корозије, тј.:

$$m_c = m_p \frac{m_{kc}}{m_{kp}} - m_{od} \quad (4.20)$$

где су:

m_p [mg]- почетна маса испитне цеви

m_{kp} [mg]- почетна маса контролног узорка

m_{kc} [mg]- маса контролног узорка после уклањања корозионих продуката

Контролни узорак представља комад материјал истог хемијског састава као и испитна цев. Овај узорак се подвргава одговарајућем физичко- хемијском поступку за издвајање корозионих продуката. Губитак масе материјала контролног узорка користи се за корекцију почетне масе испитне цеви услед корозије.

4.3. Понашање материјала у геотермалној води

Да би коришћење геотермалних вода било економски оправдано потребно је да експлоатациони век геотермалног система буде довољно дуг уз оптималне инвестиционе и трошкове рада и одржавања. Развој оваквих система захтева пажљиву анализу понашања материјала у геотермалној води.

4.3.1. Понашање метала у води

У зависности од садржаја растворених и суспендованих чврстих честица и гасова у води као и њене температуре, воде делују више или мање агресивно на метале. Основни узрочник корозије метала у води је растворени кисеоник. Корозију метала у води могу да успоре корозиони продукти или тешко растворне материје присутне у води. Тешко растворна једињења калцијума из воде таложе се на површини метала при одређеним условима стварајући тако заштитну превлаку која штити метал од корозије. Ово својство воде се оцењује на основу експерименталних испитивања или математичких модела на начин како је описано у поглављу 4.1.3.

Корозија метала у топлој води (од 25 до 65 °C) тече слично корозији метала у хладној води али знатно брже. Реакција (4.1), на повишеној температури се помера на десну страну уз издвајање калцијум-карбоната и повећање садржаја слободне угљене киселине. При хлађењу се равнотежа не успоставља брзо па вода са вишком угљене киселине делује агресивно на метал.

4.3.2 Основни типови корозије у геотермалној води

Код нискотемпературних геотермалних вода уочено је неколико карактеристичних типова корозије, а то су углавном следећи: равномерна, тачкаста или питинг, корозија са напрслинама, напонска, ерозиона, интеркристална, галванска корозија и разлагање легура.

4.3.2.1. Равномерна корозија

Овај тип корозије подразумева више или мање равномерно трошење материјала услед корозије без појаве тачкасте корозије или неког другог облика локалне корозије. Ако је корозија материјала равномерна, радни век материјала се може предвидети на основу експериментално одређене брзине корозије.

Брзина равномерне корозије се обично изржава као губитак масе материјала по јединици површине за одређено време v_{kor} или као смањање дебљине материјала за годину дана Δh тј:

$$v_{kor} = \frac{10\Delta m}{\tau} \quad [g/m^2h] \quad (4.21)$$

$$\Delta h = \frac{8,76v_{kor}}{\rho} \quad [mm/god] \quad (4.22)$$

где су:

Δm [mg/cm²] - губитак масе материјала по јединици површине

τ [h] - време излагања узорка дејству геотермалне воде

ρ [g/cm³]- густина материјала

Брзина корозије која се може усвојити као прихватљива зависи од цене материјала и радних услова, имајући пре свега у виду сигурност као и експлоатациони век постројења. За материјале као што су угљенични и ниско легирани челици, у табели 4.2 дате су препоруке о коришћењу у зависности од брзине корозије /48/.

Табела 4.2 Препоруке за коришћење угљеничних и нисколегираних челика у зависности од брзине корозије Δh [mm/год]^{*} /48/

Препоруке за коришћење	Δh [mm/год]
Потпуно задовољава	< 0.25
Пажљива употреба	< 0.75
Само за кратку употребу	< 1.5
Не задовољава	> 1.5

* За квалитетније материјале као што су високо легирани челици, месинг и алуминијум, вредности приказане у табели 4.2. треба поделити са 2.

Брзина равномерне корозије зависи од температуре и састава геотермалне воде. При вишој температури обично се повећава и брзина корозије која зависи и од других фактора који су у вези са температуром, као што су растворљивост кисеоника, хлора итд. Међутим, поуздани закључци у вези са брзином равномерне корозије металних материјала могу се извести само на основу детаљно спроведених испитивања.

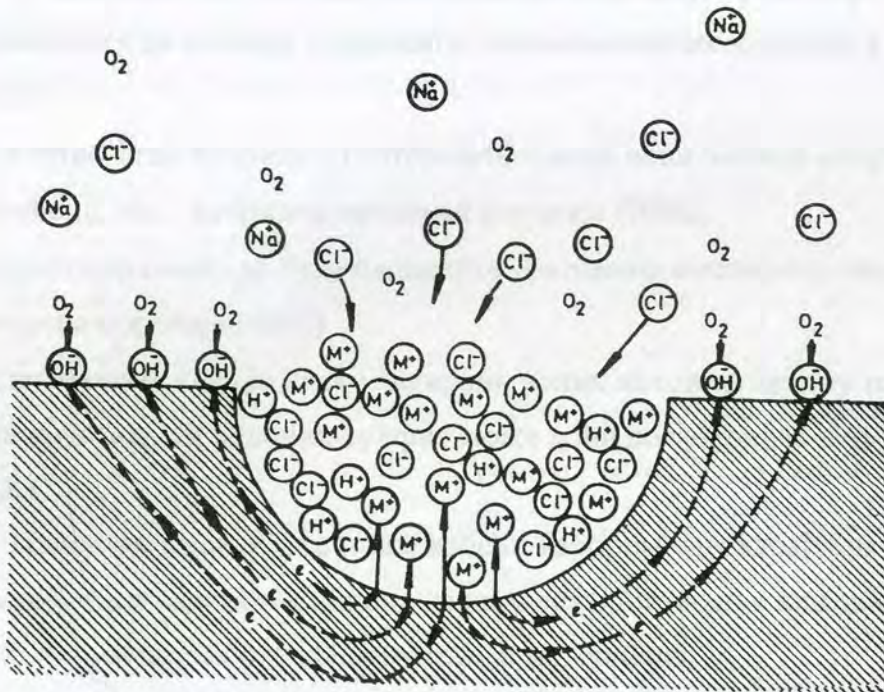
4.3.2.2. Тачкаста или питинг корозија

Тачкаста или питинг корозија је назив за појаву локалних корозионих оштећења или рупица на металној површини. Ова оштећења имају малу површину у односу на целокупну површину метала и подсећају на тачкице. Ако је метал подложен тачкастој корозији, тада равномерна корозија није меродавна за одређивање радног века материјала. Тачкаста корозија је веома непожељна

нарочито код измењивача топлоте с обзиром да плоче измењивача имају танке зидове и велику површину тако да и мале рупице могу да изазову оштећење целог апарата. Брзину настајања тачкасте корозије је углавном тешко предвидети и прогнозе нису довољно поуздане без детаљних експерименталних испитивања.

Тачкаста корозија настаје под утицајем различитих фактора тако да све оно што изазива пораст локалне корозије може да изазове и појаву рупица. На слици 4.7 приказана је принципијелна шема настанка тачкасте корозије /49/. У аерисаним флуидима концентрација кисеоника је нижа на дну рупица па ће се дно рупице понашати као анода у односу на околни метал који представља катоду. На тај начин доћи ће до трошења и продубљивање рупице. Ако је метална површина добро обрађена овај вид корозије ће се смањити.

Тачкаста корозија може такође да настане због нехомогености материјала, на пример услед присуства заостале шљаке у завареним спојевима. Појава ваздушних мехурова у струјном току може такође да изазове питинг - ефекат кавитације код пумпи што може да доведе и до појаве ерозионе корозије.



Слика 4.7 Процеси при питинг корозији /49/

4.3.2.3 Корозија са напрслинама

Корозија са напрслинама је слична тачкастој корозији и јавља се на одређеним местима у геотермалној инсталацији као што су: цеви, цевни спојеви, превоји плоча измењивача топлоте или на местима где постоје наслаге од каменца. Као и код тачкасте корозије и овде је тешко дати поуздану прогнозу о брзини раста напрслина.

4.3.2.4 Напонска корозија

Напонска корозија настаје углавном као последица истовременог дејства више фактора од којих су најзначајнији механички напони настали у процесу производње и монтаже металних елемената и утицај корозивних састојака из геотермалне воде : Cl^- , OH^- , NO_3^- , NH_4^+ јони, затим водоник-сулфид, кисеоник и др. Последице напонске корозије су: појава оштећења која брзо напредују и могу да изазову превремену кртост, оштећење или лом материјала.

У зависности од састава геотермалне воде и присуства корозионих састојака могу да настану различити типови напонске корозије у геотермалној води /33/:

- Због присуства хлорида у геотермалној води неки челици могу да буду оштећени, тзв. хлоридна напонска корозија (HNK).
- Легуре бакра могу да буду нападнуте траговима амонијака, тзв. амонијачна напонска корозија (ANK).
- У случајевима када је ниско легирани челик изложен дејству геотермалне воде која садржи водоник-сулфид може доћи до сулфидне напонске корозије (SNK).

Напонска корозија се може избећи избором одговарајућих материјала или уклањањем заосталих напона из процеса производње или заваривања помоћу термичког поступка отпуштања материјала.

Детаљни подаци о напонској корозији у зависности од материјала и састава флуида могу се наћи у одговарајућој литератури /48,50/.

4.3.2.5 Ерозиона корозија

Појам ерозиона корозија се користи за опис корозије изазване комбинацијом ерозије и корозије. Уколико флуид садржи суспендоване састојке или ако је брзина струјања велика или са турбуленцијама, ерозија ће тежити да одвоји продукте корозије или чврсте наслагe са металне површине чиме се брзина корозије значајно повећава. Уколико постоји могућност за појаву ерозионе корозије онда би требало изабрати знатно отпорнији материјал или металну површину заштитити на одговарајући начин.

4.3.2.6 Интеркристална корозија

Интеркристална корозија је најчешћи вид корозије метала, при чему су претежно нападнуте границе зрна (кристала) материјала. Последице интеркристалне корозије су прскање материјала, што може да изазове потпуно оштећење материјала, иако је губитак масе материјала услед корозије релативно мали у односу на његову укупну масу. Интеркристална корозија углавном напада легуре, а ређе и чисте метале. Настаје најчешће због нечистоћа које се стварају на границама зрна после термичких обрада метала, као што су: ковање, ваљање, заваривање или као резултат неправилне термичке обраде материјала у процесу његове обраде. Класичан пример интеркристалне корозије у процесним апаратима је појава распадања заварених спојева код нестабилизованих аустенитних челика. До ове појаве долази због смањења садржаја хрома дуж граница зрна услед таложења хром-карбида или интерметалних једињења (на пример, сигма фаза) на границама зрна у зони налегања на заварени спој где је температура за време заваривања 500 - 800 °C. Распадање завареног споја се може избећи термичким поступком отпуштања материјала после заваривања (загревањем, а затим спорим хлађењем) ако је то изводљиво или коришћењем материјала са ниским садржајем угљеника (<0,3% C) односно стабилизованог са додатком титана или нобијума.

4.3.2.7 Галванска корозија

Галванска корозија настаје када су различити метали у контакту посредством електролита. У овом случају настаје електрохемијски спрег у коме је један од метала на нижем (анода) а други на вишем потенцијалу (катада). У галванском спрегу анодни материјал кородира и троши се, док се на катодном материјалу стварају наслаге.

Ако се у опреми користе метали који производе галванску корозију тада је неопходно да буду изоловани један од другог како би се прекинуло електрично коло. Уколико је трошење анодног материјала дозвољено онда би требало повећати његову масу како би се надокнадио губитак материјала због корозије. Брзина корозије зависи од односа релативних површина анодног и катодног материјала. Велику катодну површину у односу на анодну би требало избегавати. Користећи се овом појавом, тј. да различити материјали могу да остваре галвански спрег, врши се заштита цевовода укопаних у земљу од корозије.

4.3.2.8 Разлагање легура

Разлагање или декомпозиција легура је појава при којој долази до издвајања једног од саставних елемената легуре. Код нискотемпературних геотермалних вода запажене су три врсте декомпозиције легура и то: издвајање цинка из месинга, графитизација ливеног гвожђа (гвожђе се исдваја док остаје угљенична решетка) и издвајање олова из калајних лемова /33/.

5. АНАЛИЗА РАДА ГРЕЈНОГ СИСТЕМА СА ИНДИРЕКТНИМ КОРИШЋЕЊЕМ ГЕОТЕРМАЛНЕ ЕНЕРГИЈЕ И ДОПУНСКИМ ИЗВОРОМ ТОПЛОТЕ

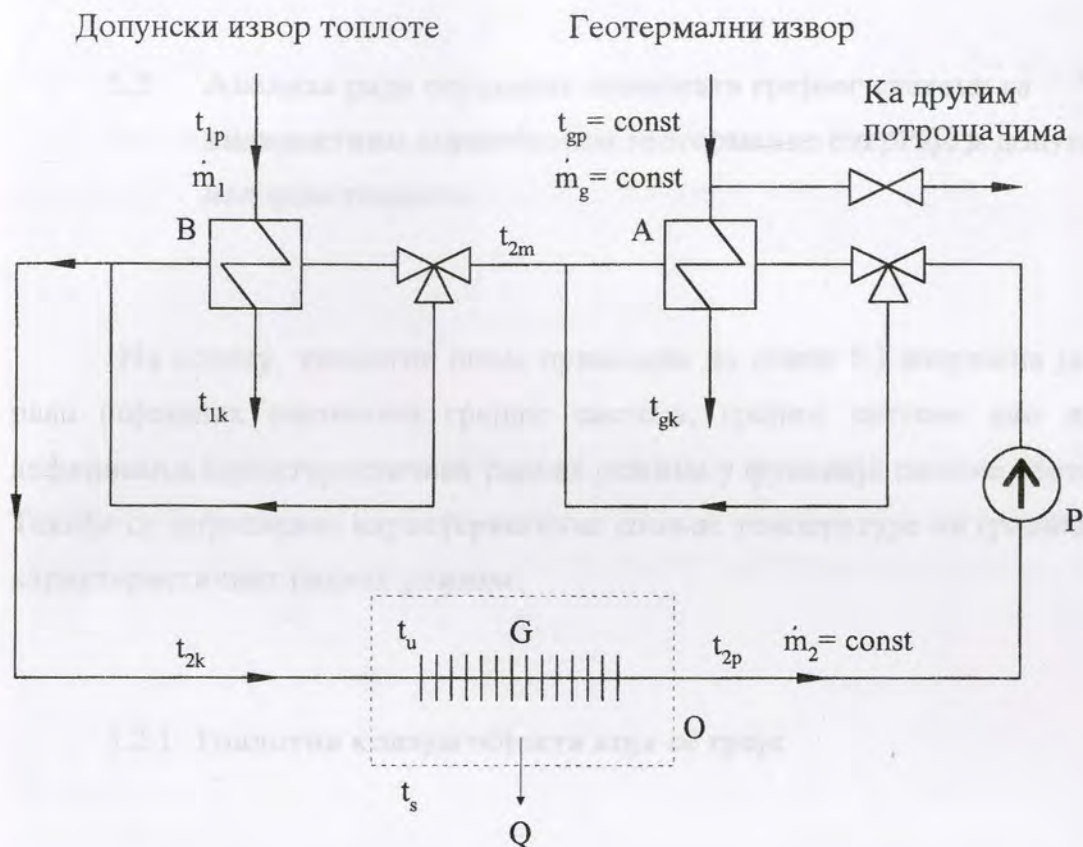
Геотермалне воде са нашег подручја су карактеристичне по томе да имају температуру између 40 и 80 °C, релативно висок степен минерализације и издашност извора од 10 до 50 l/s. Ове воде су погодне за примену у различитим нискотемпературским процесима као што су грејање пословних и стамбених објеката, стакленика, базена за купање, гајење риба и сл.

На основу карактеристике геотермалних вода са нашег подручја као и могућностима за њихово коришћење може се закључити да је примена топлотне шеме са индиректним коришћењем геотермалне енергије и допунским извором топлоте најцелисходније решење.

5.1 Опис грејног система

На слици 5.1 приказана је топлотна шема са индиректним коришћењем геотермалне енергије и допунским извором топлоте. Састоји се од следећих елемената: два измењивача топлоте А и В, грејних тела G која загревају објекат О, циркулационе пумпе Р и цевне мреже која повезује наведене елементе. Измењивач топлоте А је повезан са геотермалним извором и помоћу њега се покрива базни део топлотног оптерећења. Измењивач топлоте В представља допунски извор топлоте који омогућава покривање вршних потреба за грејањем у случајевима када је спољна температура ниска тако да геотермални извор, тј. измењивач А, није у стању да покрије топлотне губитке објекта који се греје. Као допунски извор топлоте се најчешће користи котао на конвенционално гориво или електричну енергију. Циркулациона пумпа обезбеђује константан проток воде у секундарном кругу ($m_2 = \text{const.}$). Ова вода се греје при пролазу кроз измењиваче топлоте А и В од почетне (t_{2p}) до крајње (t_{2k}) температуре.

Грејна тела (G) размењују топлоту са ваздухом у објекту, обезбеђујући на тај начин задату температуру ваздуха у самом објекту (t_u).



Слика 5.1 Топлотна шема грејног система са индиректним коришћењем геотермалне енергије и допунским извором топлоте

Температура геотермалне воде на улазу у измењивач А је практично константна и једнака је температури геотермалног извора умањеној за температурски пад настао услед топлотних губитака при транспорту геотермалне воде од изворишта до измењивача топлоте тј.: $t_{gp} = \text{const}$.

Издашност геотермалног извора има константну вредност током целе године тако да се може усвојити да је: $m_g = \text{const}$.

У случајевима када је спољна (атмосферска) температура довољно висока геотермални извор у потпуности задовољава топлотне потребе објекта који се греје, а истовремено постоји вишак топлоте која може да се искористи за друге

потребе. У овом случају вишак геотермалне воде се одводи помоћу обилазног вода до поменутих других потрошача на начин како је приказано на слици 5.1.

5.2 Анализа рада појединих елемената грејног система са индиректним коришћењем геотермалне енергије и допунским извором топлоте

На основу топлотне шеме приказане на слици 5.1 извршена је анализа рада појединих елемената грејног система, грејног система као целине и дефинисање карактеристичних радних режима у функцији спољне температуре. Такође су дефинисане карактеристичне спољне температуре на граници између карактеристичних радних режима.

5.2.1 Топлотни конзум објекта који се греје

Топлотни конзум објекта, односно количина топлоте у јединици времена потребна за његово грејање, у општем случају зависи од климатских услова места на коме се објекат налази (у првом реду спољне температуре, руже ветрова, оријентације објекта, положаја околних објеката, интензитета сунчевог зрачења итд.), од термоизолационих карактеристика материјала од којих је објекат израђен, квалитета израде објекта (од кога битно зависи интензитет инфилтрације спољашњег ваздуха у објекат) и жељене температуре у објекту тј.:

$$Q = \sum_i [k_i(t_s)F_i]_0 (t_u - t_s) \quad [W] \quad (5.1)$$

где су:

$k_i(t_s)$ [W/m² K] -коэффицијент пролаза топлоте за i -ту карактеристичну површину (F_i) објекта

F_i [m²] - карактеристична i -та површина објекта

t_u [°C] - унутрашња температура у објекту

t_s [°C] - спољна температура

Унутрашња температура у објекту је константна у току грејног периода, $t_u = \text{const}$

Ако је спољна температура једнака спољној пројектној температури ($t_s = t_{sp}$) онда је номинални топлотни конзум објекта:

$$Q_n = \sum_i [k_i(t_{sp})F_i]_0 (t_u - t_{sp}) \quad [\text{W}] \quad (5.2)$$

Где су:

Сматрајући да се коефицијент пролаза топлоте не мења битно са спољним условима, што је испуњено ако су отпори провођењу топлоте кроз зидове објекта већи од отпора прелазу топлоте са ваздуха на зид, тј. да је:

$$k_i(t_s) \approx \text{const}$$

следи да је:

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{t_u - t_s}{t_u - t_{sp}} \quad (5.3)$$

односно да се топлотни конзум за произвољну спољну температуру може изразити преко номиналног топлотног конзума и количника карактеристичних температурских разлика:

$$Q = Q_n \cdot \frac{t_u - t_s}{t_u - t_{sp}} \quad (5.4)$$

5.2.2 Размена топлоте између грејних тела и ваздуха у просторији

Количина топлоте коју грејна тела одају у јединици времена једнака је топлотном конзуму објекта за посматрану спољну температуру (услов који мора бити испуњен у случају ако се захтева да се температура ваздуха у просторији одржава на задатој вредности $t_u = \text{const}$):

$$Q = \sum_j (k_j F_j)_G (t_{sr_2} - t_u) \quad [W] \quad (5.5)$$

где су:

k_j [W/m²K] - коефицијент пролаза топлоте за грејно тело

F_j [m²] - карактеристична површина грејног тела

t_{sr_2} [°C] - средња температура воде из секундарног круга система грејања

У случају конвенционалних грејних тела, као што су радијатори, конвектори или панелно грејање, за које је доминантна природна конвекција, може се усвојити да је коефицијент пролаза топлоте приближно једнак коефицијенту прелаза топлоте са стране ваздуха, а температура зида приближно једнака температури воде из секундарног круга која струји кроз грејна тела.

У овом случају израз за количину топлоте коју одају грејна тела у јединици времена је:

$$Q = \sum_j (\alpha_j F_j)_G (t_{sr_2} - t_u) \quad (5.6)$$

Коефицијент прелаза топлоте са стране ваздуха је:

$$\alpha_j = \frac{Nu_j \cdot \lambda_v}{l_j} = \frac{C_j (Gr \cdot Pr)^z \cdot \lambda_v}{l_j} = \frac{C_j \cdot \lambda_v}{l_j} \cdot \left(\beta_v \cdot \frac{g \cdot \rho_v^2 \cdot c_{pv}}{\mu_v \cdot \lambda_v} \cdot l_j^3 \right)^z \cdot (t_{sr_2} - t_u)^z \quad (5.7)$$

где су:

$$Gr = \beta_v \cdot \frac{g \cdot l^3}{(\mu_v / \rho_v)^2} \cdot (t_{sr_2} - t_u) - \text{Грасхофов број}$$

$$Pr = \frac{\mu_v \cdot c_{pv}}{\lambda_v} - \text{Прантлов број}$$

C_j - константа у изразу за коефицијент прелаза топлоте

$\beta_v [K^{-1}]$ - коефицијент запреминског ширења ваздуха

$g=9,81 [m/s^2]$ - убрзање силе земљине теже

$\rho_v [kg/m^3]$ - густина ваздуха

$c_{pv} [J/(kg \cdot K)]$ - средњи масени специфични топлотни капацитет ваздуха

$\lambda_v [W/(m \cdot K)]$ - коефицијент провођења топлоте ваздуха

$\mu_v [Pa \cdot s]$ - коефицијент динамичке вискозности ваздуха

па ће израз за количину топлоте коју предају грејна тела у јединици времена бити:

$$Q = \sum_j \frac{C_j \cdot \lambda_v}{l_j} \cdot \left(\beta_v \cdot \frac{g \cdot \rho_v^2 \cdot c_{pv}}{\mu_v \cdot \lambda_v} \cdot l_j^3 \right)^z \cdot F_j \cdot (t_{sr_2} - t_u)^{1+z} \quad (5.8)$$

или у упрошћеном облику:

$$Q = C (t_{sr_2} - t_u)^{1+z} \quad (5.9)$$

где су:

$$C = \sum_j \frac{C_j \cdot \lambda_v}{l_j} \cdot \left(\beta_v \cdot \frac{g \cdot \rho_v^2 \cdot c_{pv}}{\mu_v \cdot \lambda_v} \cdot l_j^3 \right)^z \cdot F_j \quad [W/K^z] - \text{константа у изразу за}$$

интензитет размене топлоте

$t_{sr_2} [^{\circ}C]$ - средња температура грејног тела

$$t_{sr_2} = \frac{t_{2p} + t_{2k}}{2}$$

$t_{2p} [^{\circ}C]$ - температура секундарног флуида на излазу из грејног тела

$t_{2k} [^{\circ}C]$ - температура секундарног флуида на улазу у грејно тело

z - експонент у критеријалној једначини за природну конвекцију

Ако је спољна температура једнака спољној пројектној температури онда количина топлоте коју одају грејна тела у јединици времена је једнака номиналном топлотном конзуму објекта тј.:

$$Q_n = C (t_{sr,n} - t_u)^{1+z} \quad (5.10)$$

где су:

$$t_{sr,n} = \frac{t_{2p,n} + t_{2k,n}}{2}$$

$t_{2p,n}$ [°C] - номинална температура секундарног флуида на излазу из грејног тела

$t_{2k,n}$ [°C] - номинална температура секундарног флуида на улазу у грејно тело

На основу израза (5.9) и (5.10) следи да је:

$$\frac{Q}{Q_n} = \left(\frac{t_{sr} - t_u}{t_{sr,n} - t_u} \right)^{1+z} \quad (5.11)$$

Топлота коју секундарни флуид предаје грејним телима у јединици времена је:

$$Q = \dot{m}_2 c_{p2} (t_{2k} - t_{2p}) \quad (5.12)$$

где су:

\dot{m}_2 [kg/s] - масени проток секундарног флуида

c_{p2} [J/kgK] - средњи масени специфични топлотни капацитет секундарног флуида

или у односу на номинални топлотни конзум:

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{t_{2p} - t_{2k}}{t_{2p,n} - t_{2k,n}} \quad (5.13)$$

На основу израза (5.1 - 5.13) могу се одредити карактеристичне температуре секундарног флуида на улазу (t_{2k}) и излазу (t_{2p}) из грејних тела геотермалне инсталације приказане на слици 5.1 у зависности од односа топлотних конзума (Q/Q_n) односно температуре спољашњег ваздуха (t_s), при чему се задају вредности : спољне пројектне температуре (t_{sp}), температура ваздуха у објекту (t_u), номиналан топлотни конзум (Q_n) и номиналне температуре секундарног флуида испред ($t_{2k,n}$) и иза ($t_{2p,n}$) грејних тела:

$$t_{2p} = t_u + 0,5 \cdot \left[\left(\frac{Q}{Q_n} \right)^{\frac{1}{1+z}} (t_{2p,n} + t_{2k,n} - 2t_u) - \frac{Q}{Q_n} (t_{2k,n} - t_{2p,n}) \right] \quad (5.14)$$

$$t_{2k} = t_{2p} + \frac{Q}{Q_n} \cdot (t_{2k,n} - t_{2p,n}) \quad (5.15)$$

5.2.3 Размена топлоте у измењивачу А

Кроз измењивач топлоте А протиче геотермална вода и вода из секундарног круга посматраног грејног система. На основу једначина топлотног биланса за посматрани измењивач топлоте следи:

$$Q_A = \dot{m}_g \cdot c_{pg} \cdot (t_{gp} - t_{gk}) = \dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_{2m} - t_{2p}) \quad (5.16)$$

где су:

c_{pg} [J/kgK] - специфични топлотни капацитет геотермалне воде

t_{gk} [°C]-температура геотермалне воде на излазу из измењивача А

t_{2m} [°C] -температура секундарног флуида на излазу из измењивача А

Протоци оба флуида у току грејне сезоне су константни, па се може сматрати да је однос топлотних еквивалената секундарног и геотермалног флуида константан, тј.:

$$R_A = \frac{\dot{m}_2 \cdot c_{p2}}{\dot{m}_g \cdot c_{pg}} = \frac{t_{gp} - t_{gk}}{t_{2m} - t_{2p}} \approx \text{const} \quad (5.17)$$

Поред тога с обзиром да се коефицијент пролаза топлоте веома мало мења у току грејне сезоне, тј. $k_{iz,A} \approx \text{const.}$, може се сматрати да је и број јединица преноса константан за време експлоатационог периода тј.:

$$NTU_{2,A} = \frac{k_{iz,A} \cdot S_{iz,A}}{m_2 \cdot c_{p2}} \approx \text{const} \quad (5.18)$$

где су:

$k_{iz,A} [W/m^2K]$ -коефицијент пролаза топлоте за измењивач А

$S_{iz,A} [m^2]$ -површина за размену топлоте за измењивач А

С обзиром да постоји једнозначна веза између $NTU_{2,A}$, R_A и параметра топлотне ефикасности P_A за усвојену шему струјања флуида кроз измењивач топлоте, тј.: $P_A = f(NTU_{2,A}, R_A)$ /29/ следи да је у току грејне сезоне:

$$P_A \approx \text{const.}$$

У случају измењивача топлоте са супротносмерним током параметар топлотне ефикасности измењивача је /29/:

$$P = \begin{cases} \frac{1 - e^{-NTU_2 \cdot (1-R)}}{1 - R \cdot e^{-NTU_2 \cdot (1-R)}} & \text{за } R \neq 1 \\ \frac{NTU_2}{1 + NTU_2} & \text{за } R = 1 \end{cases} \quad (5.19)$$

Параметар топлотне ефикасности (P_A) измењивача топлоте А се може дефинисати као количник између стварно размењене количине топлоте (Q_A) и максимално размењене количине топлоте ($Q_{A,max}$) која би се добила ако се секундарни флуид при проласку кроз измењивач А загреје од почетне температуре (t_{2p}) до температуре која је једнака температури геотермалног флуида на улазу у измењивач А (t_{gp})тј.:

$$P_A = \frac{Q_A}{m_2 \cdot c_{p2} \cdot \Delta t_{max}} \quad (5.20)$$

где је:

Δt_{max} [$^{\circ}C$]- разлика између улазне и излазне температуре секундарног флуида у измењивач А, тј. $t_{gp} - t_{2p}$

На основу једначина топлотног биланса за измењивач топлоте А се добија:

$$P_A = \frac{t_{2m} - t_{2p}}{t_{gp} - t_{2p}} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_{max}} \quad (5.21)$$

На основу топлотне ефикасности измењивача А може се дефинисати и његова топлотна снага која износи:

$$Q_A = m_2 \cdot c_{p2} \cdot P_A \cdot (t_{gp} - t_{2p}) \quad (5.22)$$

Очигледно је у овом случају да је $Q_A = f(t_{2p})$ с обзиром да су остале величине у изразу (5.22) константне током грејне сезоне.

Теоријски гледано измењивач топлоте ће достићи своју максималну топлотну снагу $Q = Q_{max}$ када је површина за размену топлоте измењивача бесконачно велика, тј. $S_{iz} \rightarrow \infty$. У овом случају би дошло до изједначавања температура топлијег и хладнијег флуида у једном од пресека измењивача у зависности од величине односа топлотних еквивалената радних флуида R [29].

У теоријском случају рада измењивача топлоте са геотермалном водом у примарном кругу и супротносмерним током код кога је $S_{iz} \rightarrow \infty$ у зависности од вредности параметра R могу да настану три карактеристична случаја.

Са дијаграмом на слици 5.2 приказана је промена температура радних флуида у измењивачу топлоте са геотермалном водом и супротносмерним током код кога је $S_{iz} \rightarrow \infty$ за три карактеристична случаја када је: $R > 1$, $R < 1$ и $R = 1$.

У случају када је $R < 1$ могуће је изједначавање температура секундарног и геотермалног флуида на излазу секундарног флуида из измењивача топлоте и тада је: $t_{2m} = t_{gp}$.

Максимална температура секундарног флуида је:

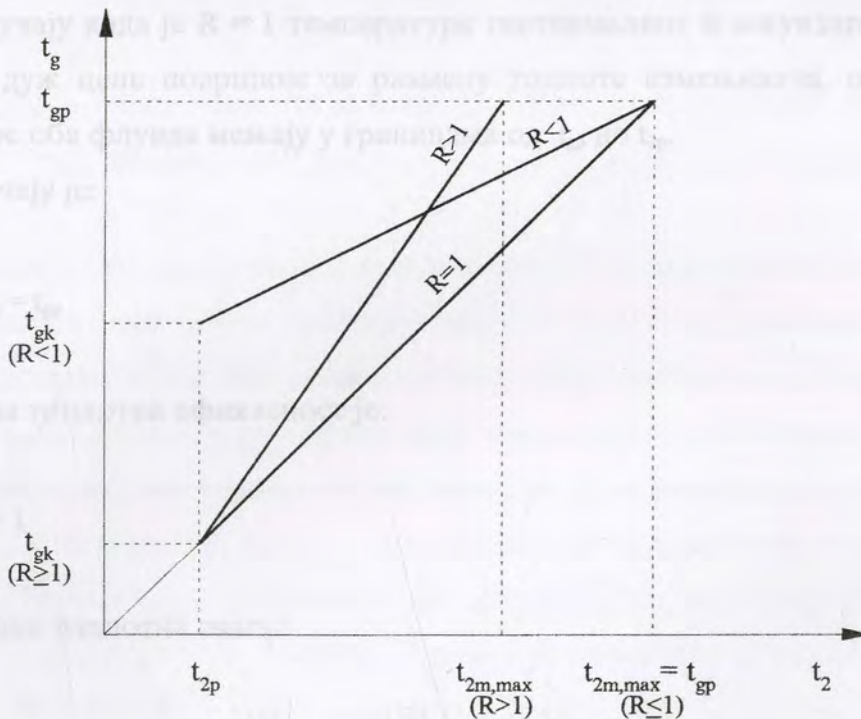
$$t_{2m,max} = t_{gp} \quad (5.23)$$

Максимална топлотна ефикасност је:

$$P_{max} = \frac{t_{2m} - t_{2p}}{t_{gp} - t_{2p}} = 1 \quad (5.24)$$

а максимална топлотна снага је:

$$Q_{max} = \dot{m}_2 c_{p2} (t_{gp} - t_{2p}) \quad (5.25)$$



Слика 5.2 Промене температура радних флуида у измењивачу топлоте са геотермалном водом и супротносмерним током струјања код кога је $S_{iz} \rightarrow \infty$ у случају када су: $R > 1$, $R < 1$ и $R = 1$

Када је $R > 1$ изједначавање температура радних флуида је могуће на улазу секундарног флуида у измењивач топлоте где би било: $t_{2p} = t_{gk}$. На основу овог услова као и израза (5.17) следи да је максимална температура секундарног флуида :

$$t_{2m,max} = t_{2p} + \frac{1}{R} \cdot (t_{gp} - t_{2p}) \quad (5.26)$$

Максимална топлотна ефикасност измењивача је:

$$P_{max} = \frac{t_{2m} - t_{2p}}{t_{gp} - t_{2p}} = \frac{1}{R} \quad (5.27)$$

а његова максимална топлотна снага износи:

$$Q_{max} = \dot{m}_g c_{pg} (t_{gp} - t_{2p}) \quad (5.28)$$

У случају када је $R = 1$ температуре геотермалног и секундарног флуида су једнаке дуж целе површине за размену топлоте измењивача, при чему се температуре оба флуида мењају у границама од t_{gp} до t_{2p} .

У овом случају је:

$$t_{2m,max} = t_{gp} \quad (5.29)$$

Максимална топлотна ефикасност је:

$$P_{max} = 1 \quad (5.30)$$

а максимална топлотна снага :

$$Q_{max} = \dot{m}_2 c_{p2} (t_{gp} - t_{2p}) = \dot{m}_g c_{pg} (t_{gp} - t_{2p}) \quad (5.31)$$

Генерално за измењивач топлоте са геотермалном водом и супротносмерним током код кога је $S_{iz} \rightarrow \infty$ максимална топлотна ефикасност и снага се могу дефинисати на следећи начин:

$$P_{\max} = \begin{cases} 1 & \text{за } R \leq 1 \\ \frac{1}{R} & \text{за } R > 1 \end{cases} \quad (5.32)$$

и

$$Q_{\max} = \begin{cases} \dot{m}_2 c_{p2} (t_{gp} - t_{2p}) & \text{за } R \leq 1 \\ \dot{m}_g c_{pg} (t_{gp} - t_{2p}) & \text{за } R > 1 \end{cases}$$

$$(5.33)$$

односно:

$$Q_{\max} = (\dot{m} c_p)_{\min} (t_{gp} - t_{2p}) \quad (5.34)$$

где је:

$(\dot{m} c_p)_{\min}$ - мањи топлотни еквивалент једног од флуида који протичу кроз апарат

У реалним условима рада измењивача топлоте има коначну површину за размену топлоте тако да увек постоји одређена температурска разлика између топлијег и хладнијег флуида у било ком пресеку измењивача. Имајући ово у виду јасно је да ће топлотна ефикасност као и снага измењивача у реалним условима рада бити увек мања од максималних које је могуће достићи само у теоријском случају када је $S_{iz} \rightarrow \infty$. На основу овога следи да ће у случају рада измењивача топлоте А, приказаног на слици 5.1, са геотермалном водом у примарном кругу и супротносмерним током у реалним условима рада бити:

$$\begin{aligned} P_A &< P_{A,\max} \\ Q_A &< Q_{A,\max} \end{aligned} \quad (5.35)$$

5.2.4 Анализа рада грејног система у зависности од температуре спољног ваздуха

За анализу рада грејног система са геотермалном водом и допунским извором топлоте, приказаном на слици 5.1, од значаја су две карактеристичне температуре спољног ваздуха и то прелазна и искључна температура, које могу да се дефинишу на следећи начин.

Спољна прелазна температура $t_{s,pr}$ представља минималну температуру спољног ваздуха до које геотермални извор у потпуности задовољава топлотне потребе објекта који се греје. Ова температура се може одредити из услова: $t_{s,pr} = t_s (Q_A = Q)$, односно изједначавањем израза (5.22) и (5.4).

Спољна искључна температура $t_{s,is}$ представља температуру спољног ваздуха при којој је искористива топлотна снага геотермалног извора нула, односно температуру спољног ваздуха при којој се измењивач топлоте А искључује из погона. Ова температура се може одредити из услова: $t_{s,is} = t_s (Q_A = 0)$, односно на основу израза (5.14) и (5.22).

При раду посматраног грејног система са геотермалном водом и допунским извором топлоте могу у принципу да настану три карактеристична случаја у зависности од вредности температуре спољног ваздуха.

1. Температура спољног ваздуха t_s је виша од прелазне температуре $t_{s,pr}$:

$$t_s \geq t_{s,pr}$$

У овом случају ради само измењивач А. Геотермални извор у потпуности задовољава топлотне потребе објекта који се греје а постоји и вишак топлотне енергије која по потреби може да се користити за друге потрошаче тј.:

$$Q_A(t_s) \geq Q(t_s) \quad (5.36)$$

2) Температура спољног ваздуха је нижа од прелазне али је виша од спољне искључне температуре $t_{s,is}$:

$$t_{s,is} < t_s < t_{s,pr}$$

У рад се укључује и додатни извор топлоте, тако да раде оба измењивача топлоте А и В. Геотермални извор не може у потпуности да задовољи топлотне потребе потрошача с обзиром да је:

$$Q_A(t_s) < Q(t_s) \quad (5.37)$$

3) Температура спољног ваздуха је нижа или једнака са искључном:

$$t_s \leq t_{s, is}$$

У овом случају ради само измењивач В. Геотермални извор се искључује из погона јер је његова искористива снага нула тј.: $Q_A(t_s) = 0$ тако да се топлотне потребе објекта покривају само из допунског извора:

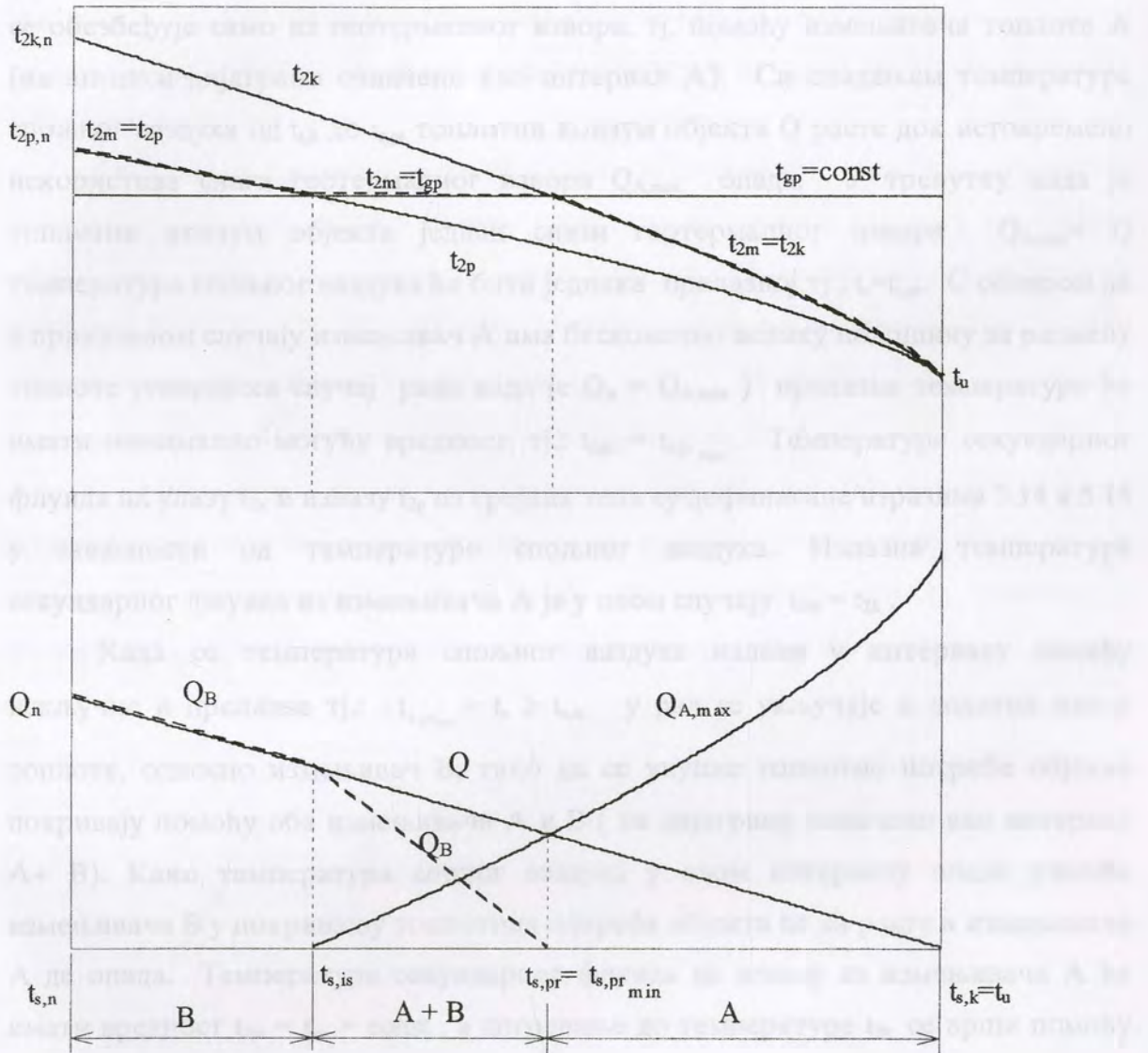
$$Q_B(t_s) = Q(t_s) \quad (5.38)$$

Помоћу дијаграма на сликама 5.3 - 5.8 анализиран је рад посматраног грејног система са геотермалном водом и допунским извором топлоте као целине у функцији спољне температуре. У горњем делу дијаграма приказане су промене температура секундарног флуида на улазу (t_{2k}) и излазу (t_{2p}) из грејних тела, као и температуре на излазу из измењивача А (t_{2m}), а у доњем делу дијаграма приказане су промене топлотног конзума објекта који се греје (Q) и топлотних снага измењивача А и В (Q_A , Q_B) у функцији температуре спољног ваздуха (t_s).

При анализи рада геотермалног грејног система разматрани су следећи случајеви:

- измењивач топлоте А има: бесконачно велику површину за размену топлоте (теоријски случај рада када је $S_{iz} \rightarrow \infty$, односно $Q_A = Q_{A, max}$) или реалну (тада је $Q_A < Q_{A, max}$)
- геотермални извор има велику издашност (у овом случају однос топлотних еквивалената секундарног и геотермалног флуида је $R_A \leq 1$), или малу издашност (тада је $R_A > 1$)
- температура геотермалног извора је : висока (случај када је $t_{gp} > t_{2k, n}$), средња ($t_{2k, n} > t_{gp} \geq t_{2p, n}$) или ниска ($t_{gp} < t_{2p, n}$).

Са дијаграмом на слици 5.3 приказан је случај када: измењивач топлоте А има бесконачно велику површину за размену топлоте (теоријски случај рада и тада је $Q_A = Q_{A,max}$), геотермални извор има велику издашност ($R_A \leq 1$) и температура геотермалног извора је ниска (случај када је $t_{gp} < t_{2p,n}$).



Слика 5.3 Промена температуре секундарног флуида, топлотног конзума и топлотне снаге измењивача А и В и у зависности од спољне температуре за случај када : измењивач топлоте А има бесконачно велику површину за размену топлоте ($Q_A = Q_{A,max}$), а геотермални извор има велику издашност ($R_A \leq 1$) и ниску температуру ($t_{gp} < t_{2p,n}$).

У случају када је спољна температура једнака крајњој односно температури у објекту $t_s = t_{s,k} = t_u$, топлотни конзум објекта једнак нули па је $t_{2p} = t_{2k} = t_{2m}$, тј. нема потребе за радом грејног система. Геотермални извор, у овом случају, може у потпуности да се искористи за грејање других потрошача.

У случају када је температура спољног ваздуха нижа од крајње али је виша или једнака прелазној, тј.: $t_{s,k} > t_s \geq t_{s,pr}$ потребна топлота за грејање објекта се обезбеђује само из геотермалног извора, тј. помоћу измењивача топлоте А (на апсциси дијаграма означено као интервал А). Са опадањем температуре спољног ваздуха од $t_{s,k}$ до $t_{s,pr}$ топлотни конзум објекта Q расте док истовремено искористива снага геотермалног извора $Q_{A,max}$ опада. У тренутку када је топлотни конзум објекта једнак снази геотермалног извора $Q_{A,max} = Q$ температура спољног ваздуха ће бити једнака прелазној тј.: $t_s = t_{s,pr}$. С обзиром да у приказаном случају измењивач А има бесконачно велику површину за размену топлоте (теоријски случај рада када је $Q_A = Q_{A,max}$) прелазна температура ће имати минимално могућу вредност, тј.: $t_{s,pr} = t_{s,pr_{min}}$. Температуре секундарног флуида на улазу t_{2k} и излазу t_{2p} из грејних тела су дефинисане изразима 5.14 и 5.15 у зависности од температуре спољног ваздуха. Излазна температура секундарног флуида из измењивача А је у овом случају $t_{2m} = t_{2k}$.

Када се температура спољног ваздуха налази у интервалу између искључне и прелазне тј.: $t_{s,pr_{min}} > t_s \geq t_{s,is}$ у рад се укључује и додатни извор топлоте, односно измењивач В, тако да се укупне топлотне потребе објекта покривају помоћу оба измењивача А и В (на дијаграму означено као интервал А+ В). Како температура спољног ваздуха у овом интервалу опада учешће измењивача В у покривању топлотних потреба објекта ће да расте а измењивача А да опада. Температура секундарног флуида на излазу из измењивача А ће имати вредност $t_{2m} = t_{gp} = const.$, а догревање до температуре t_{2k} се врши помоћу измењивача В, при чему је:

$$Q_B = \dot{m}_2 c_{p2} (t_{2k} - t_{2m}) \quad (5.39)$$

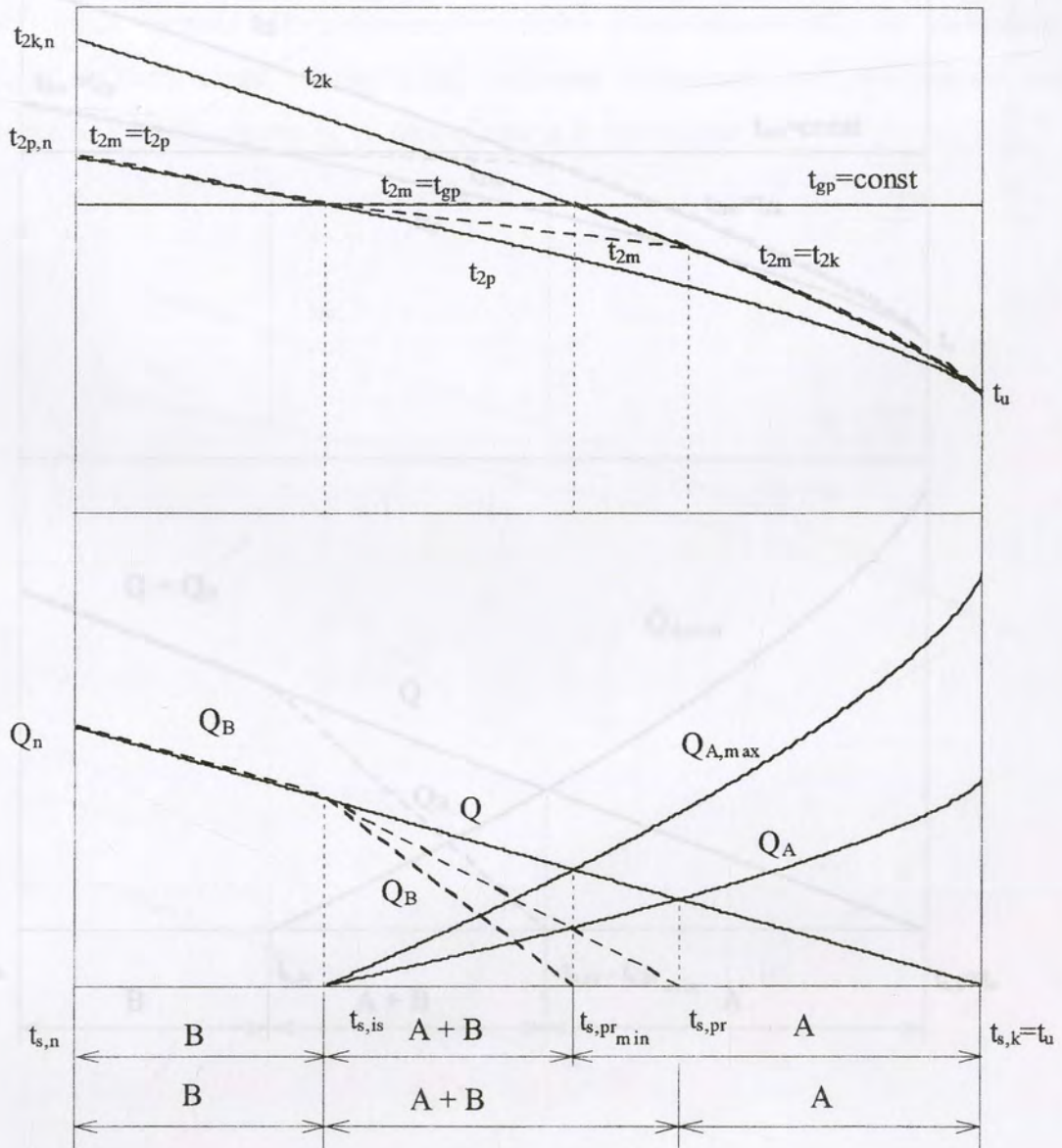
Температура спољног ваздуха при којој је температура секундарног флуида на улазу у измењивач А једнака температури геотермалног извора ($t_{2p} = t_{gp}$) је дефинисана као искључна температура $t_s = t_{s, is}$. При овој температури спољног ваздуха је $Q_{A, max} = 0$.

Када је температура спољног ваздуха нижа од искључне, тј.: $t_s < t_{s, is}$ топлотне потребе се покривају само помоћу измењивач В док је измењивач А ван погона (на дијаграму означено као интервал В). У овом случају је $t_{2m} = t_{2p}$ па се догревање секундарног флуида од температуре t_{2p} до t_{2k} врши само помоћу допунског извора топлоте.

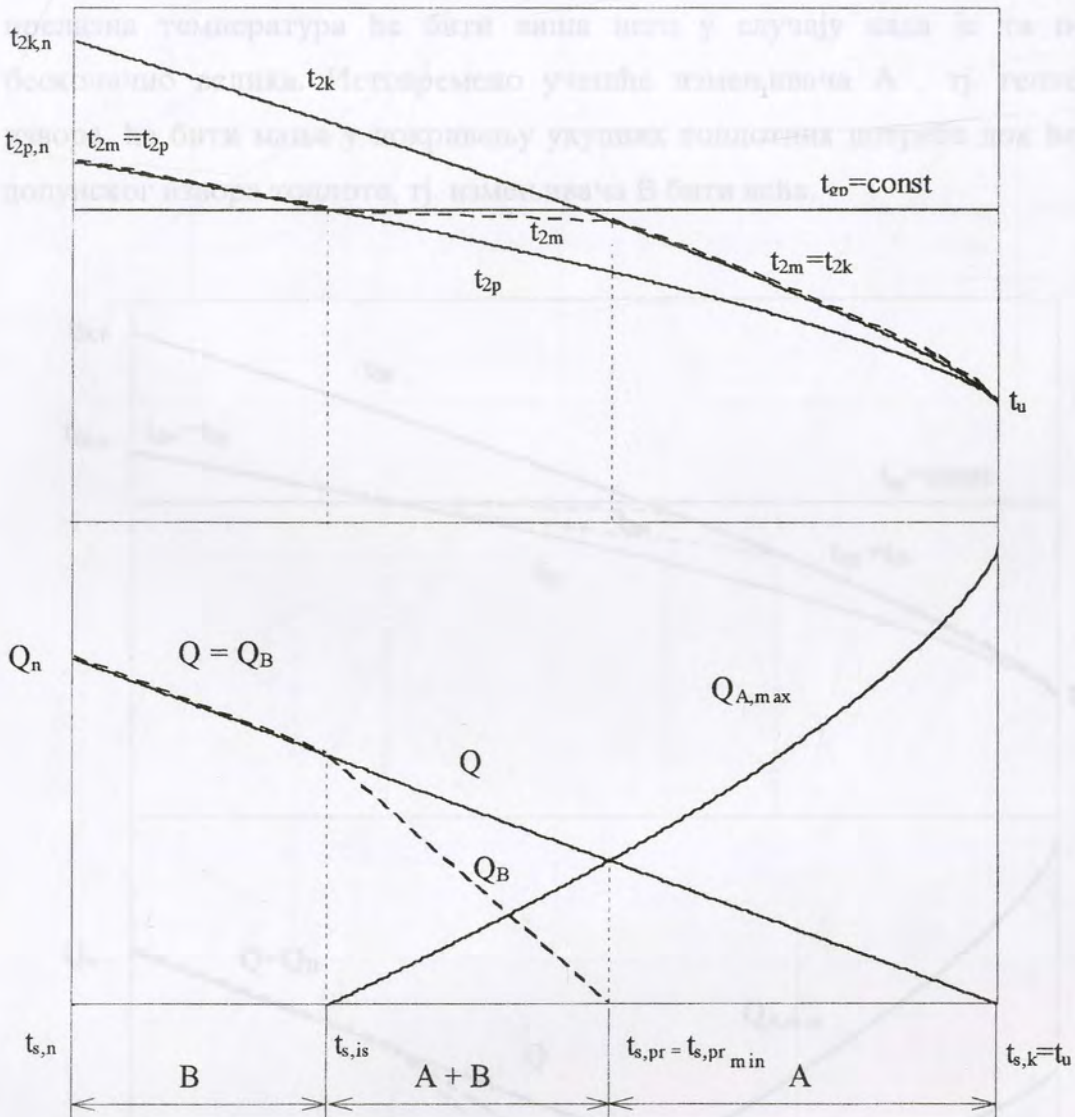
На слици 5.4 упоредо су анализирана два случаја и то: први кад измењивач топлоте А има бесконачно велику површину за размену топлоте (теоријски случај рада када је $Q_A = Q_{A, max}$) и други када има реалну површину за размену топлоте ($Q_A < Q_{A, max}$). У оба ова случаја геотермални извор има велику издашност ($R_A \leq 1$) и ниску температуру ($t_{gp} < t_{2p, n}$). У другом случају прелазна температура ће имати вишу вредност од минималне тј.: $t_{s, pr} > t_{s, pr, min}$. Поред тога, учешће измењивача А, тј. геотермалног извора, у покривању укупних топлотних потреба ће се смањити док ће се повећати учешће допунског извора топлоте тј. измењивача В. Када је спољна температура између прелазне и искључне $t_{s, k} > t_s \geq t_{s, pr}$ излазна температура из измењивача А ће бити:

$$t_{2m} = t_{2p} + \frac{Q_A}{m_2 \cdot c_{p2}} \quad (5.40)$$

На слици 5.5 приказан је случај када измењивач топлоте А има бесконачно велику површину за размену топлоте ($Q_A = Q_{A, max}$), а геотермални извор малу издашност ($R_A > 1$) и ниску температуру ($t_{gp} < t_{2p, n}$). Максимална топлотна ефикасност измењивача А је мања него у случају када геотермални извор има велику издашност ($R_A \leq 1$) при истим осталим радним условима.



Слика 5.4 Упоредна анализа рада грејног система када измењивач топлоте A има бесконачно велику површину за размену топлоте ($Q_A = Q_{A,max}$) и реалну ($Q_A < Q_{A,max}$). У оба случаја геотермални извор има велику издашност ($R_A \leq 1$) и ниску температуру ($t_{gp} < t_{2p,n}$)

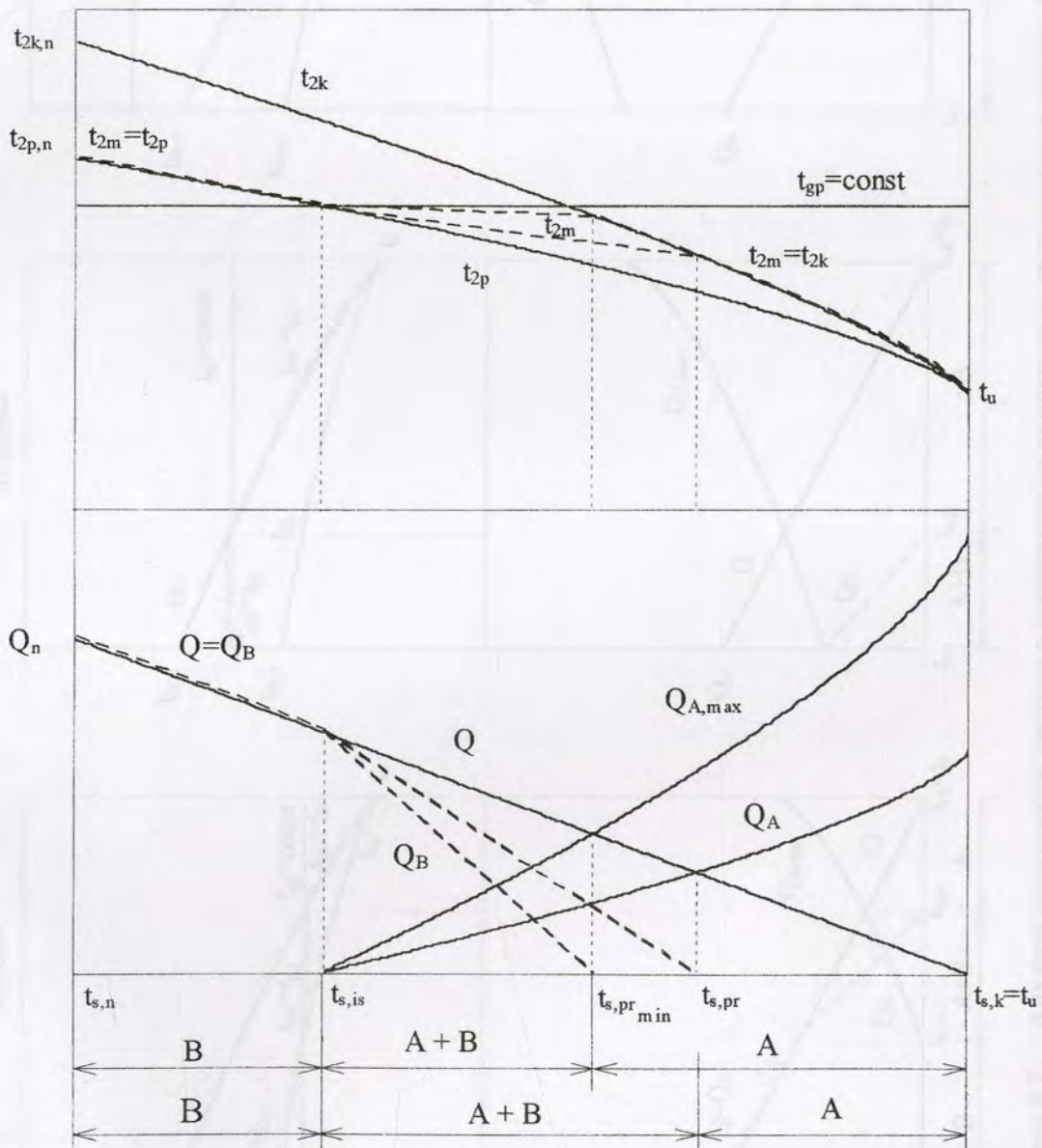


Слика 5.5 Анализа рада грејног система у случају када: измењивач топлоте А има бесконачно велику површину за размену топлоте ($Q_A = Q_{A,max}$), а геотермални извор малу издашност ($R_A > 1$) и ниску температуру ($t_{gp} < t_{2p,n}$).

На слици 5.6 упоредо су су анализирана два случаја и то: први кад измењивач топлоте А има бесконачно велику површину за размену топлоте ($Q_A = Q_{A,max}$) и други када има реалну површину за размену топлоте ($Q_A < Q_{A,max}$). У

оба ова случаја геотермални извор има малу издашност ($R_A > 1$) и ниску температуру ($t_{gp} < t_{2p,n}$).

У случају кад измењивач А има реалну површину за размену топлоте прелазна температура ће бити виша него у случају када је та површина бесконачно велика. Истовремено учешће измењивача А, тј. геотермалног извора, ће бити мање у покривању укупних топлотних потреба док ће учешће допунског извора топлоте, тј. измењивача В бити веће.



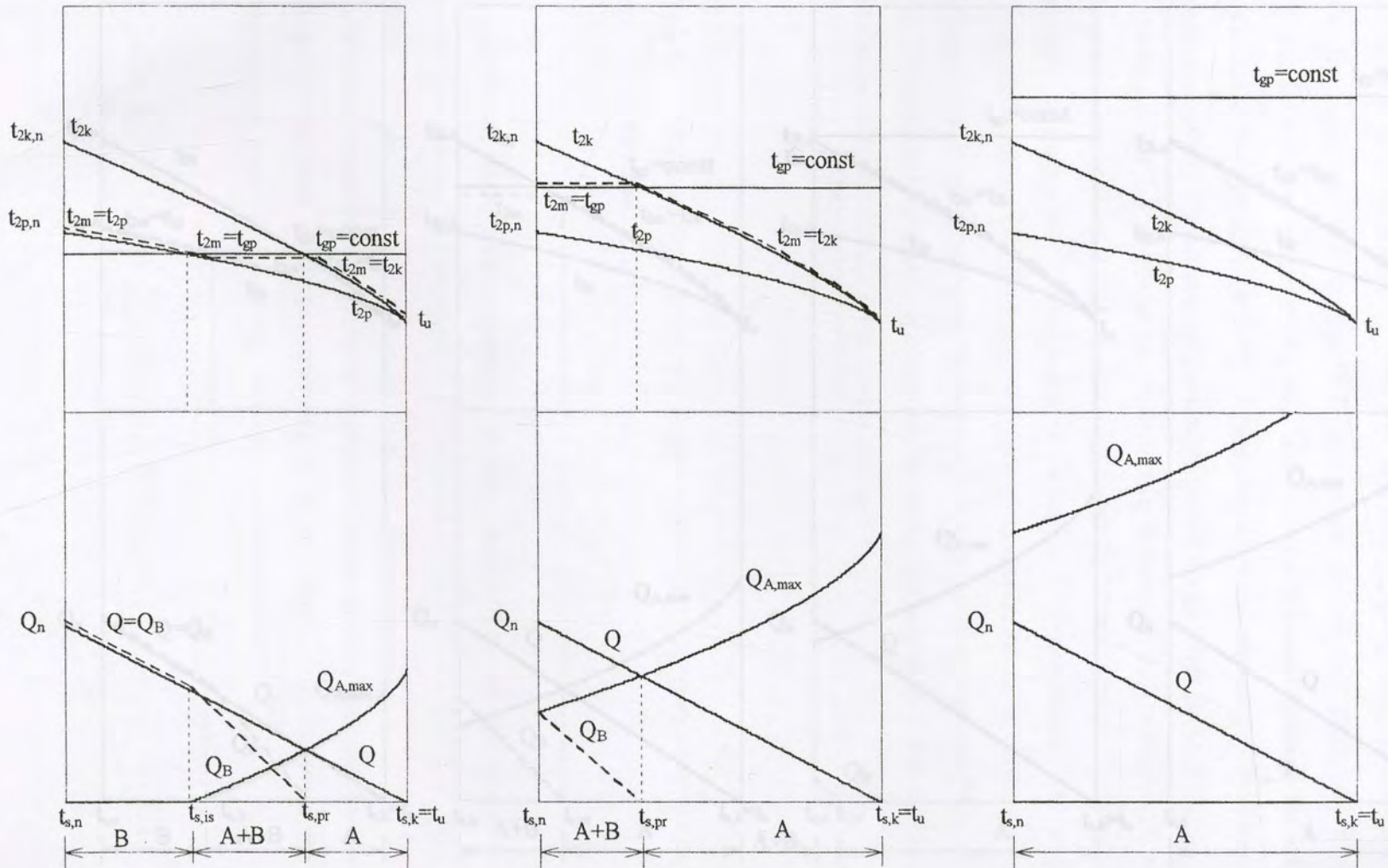
Слика 5.6 Упоредна анализа рада грејног система када су: $R_A > 1, t_{2k,n} > t_{2p,n} > t_{gp}$ и када је топлотна снага измењивача А: $Q_A = Q_{A,max}$ и $Q_A < Q_{A,max}$

Температура геотермалног извора:

а) ниска

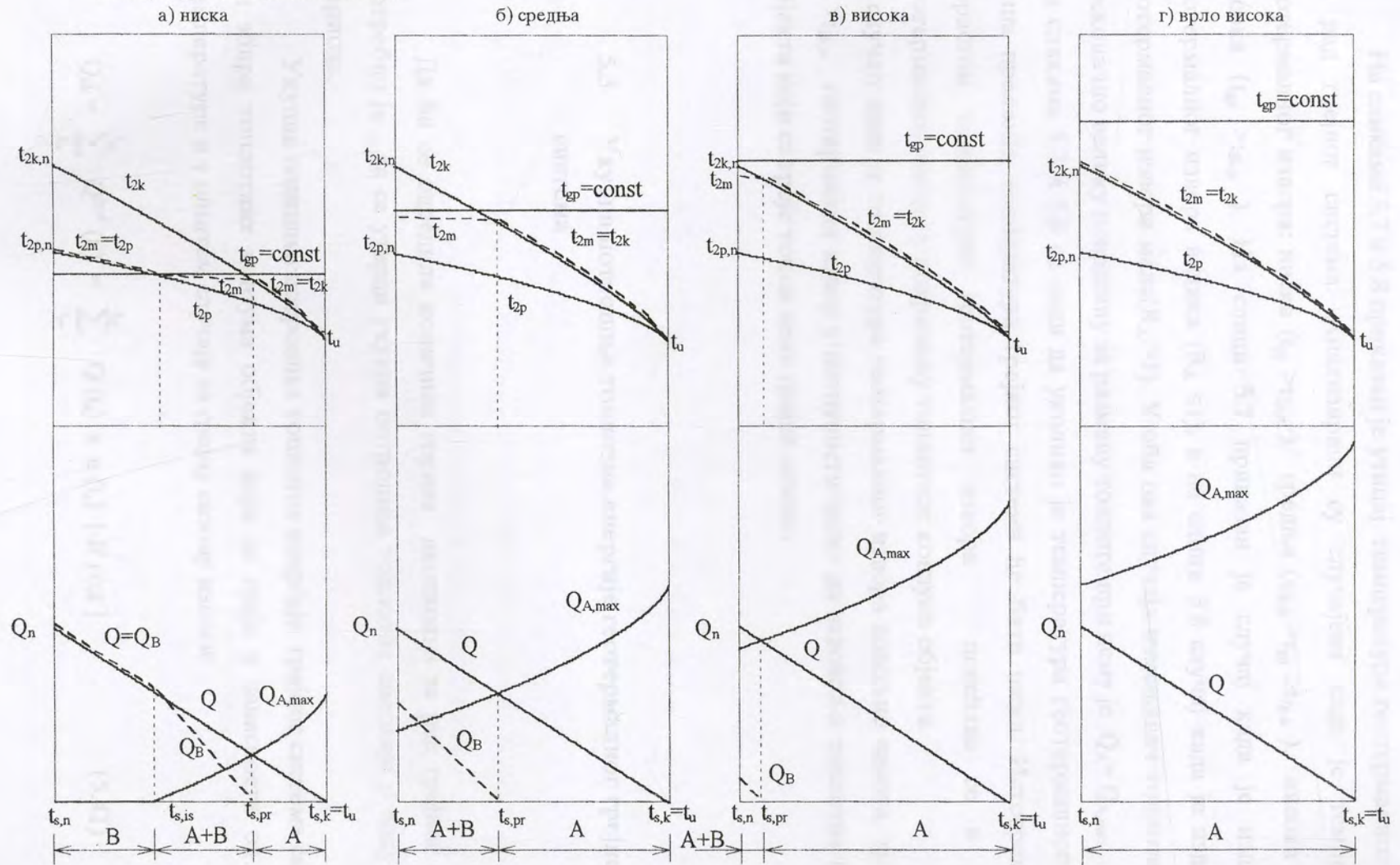
б) средња

в) висока



Слика 4.7 Анализа рада грејног система у зависности од температуре геотермалног извора. Случај када је издашност извора велика ($R_A \leq 1$), а измењивач А има бесконачно велику површину за размену топлоте ($Q_A = Q_{A,max}$)

Температура геотермалног извора:



Слика 4.8 Анализа рада грејног система у зависности од температуре геотермалног извора. Случај када је издашност извора мала ($R_A > 1$), а измењивач А има бесконачно велику површину за размену топлоте ($Q_A = Q_{A,max}$)

На сликама 5.7 и 5.8 приказан је утицај температуре геотермалног извора на рад грејног система. Анализирани су случајеви када је температура геотермалног извора: ниска ($t_{gp} > t_{2p,n}$), средња ($t_{2k,n} > t_{gp} \geq t_{2p,n}$), висока и врло висока ($t_{gp} > t_{2k,n}$). На слици 5.7 приказан је случај када је издашност геотермалног извора велика ($R_A \leq 1$), а на слици 5.8 случај када је издашност геотермалног извора мала ($R_A > 1$). У оба ова случаја измењивач топлоте А има бесконачно велику површину за размену топлоте при чему је $Q_A = Q_{A,max}$.

На сликама 5.7 и 5.8 се види да уколико је температура геотермалног извора виша прелазна температура грејног система ће бити нижа. Истовремено са порастом температуре геотермалног извора повећава се и учешће геотермалног извора у покривању топлотног конзума објекта.

У случају када је температура геотермалног извора довољно висока, тј. када је $t_{gp} > t_{2k,n}$, геотермални извор у потпуности може да задовољи топлотне потребе објекта који се греје током целе грејне сезоне.

5.3 Укупна потрошња топлотне енергије геотермалног грејног система

Да би се одредила количина горива неопходна за рад грејног система потребно је да се утврди укупна потрошња топлотне енергије у току грејног периода.

Укупна годишња потрошња топлотне енергије грејног система састоји се од збира топлотних конзума објекта који се греје у зависности од спољне температуре и у општем случају за грејну сезону износи:

$$Q_{uk} = \sum_{t_{sn}}^{t_{sk}} Q^{god}(t_s) = \sum_{t_{sn}}^{t_{sk}} Q(t_s) \tau_n(t_s) \quad [J/год] \quad (5.41)$$

где су:

- $Q^{\text{god}}(t_s)$ [J/ год]-годишња потрошња топлотне енергије при одређеној температури спољашњег ваздуха у току грејног периода
- $Q(t_s)$ [W]- топлотни конзум објекта у зависности од спољне температуре
- τ [s/дан]- време рада грејног система у току дана
- $n(t_s)$ [дан/ год]- фреквенција појава појединих спољних температура током грејног периода у данима

На основу анализе рада геотермалног грејног система, приказаног на слици 5.1, следи да се укупна потрошња топлотне енергије за рад грејног система покрива из геотермалног и допунског извора топлоте, при чему је:

- количина топлоте која се уштеди у току грејног периода услед коришћења геотермалног извора:

$$Q_{\text{ušt,uk}} = \sum_{t_{\text{sk}}}^{t_{\text{sis}}} Q_{\text{ušt}}^{\text{god}}(t_s) = \sum_{t_{\text{sk}}}^{t_{\text{sis}}} Q_A(t_s) \tau n(t_s) \text{ [J/ год]} \quad (5.42)$$

где су:

- $Q_{\text{ušt}}^{\text{god}}(t_s)$ [J/ год] - годишња уштеда топлотне енергије услед коришћења геотермалног извора при одређеној температури спољашњег ваздуха у току грејног периода
- $Q_A(t_s)$ [W] - топлотна снага измењивача А у зависности од спољне температуре

- укупна потрошња допунског извора топлоте у току грејног периода је:

$$Q_{\text{dop,uk}} = \sum_{t_{\text{spr}}}^{t_{\text{sp}}} Q_{\text{dop}}^{\text{god}}(t_s) = \sum_{t_{\text{spr}}}^{t_{\text{sp}}} Q_B(t_s) \tau n(t_s) \text{ [J/ год]} \quad (5.43)$$

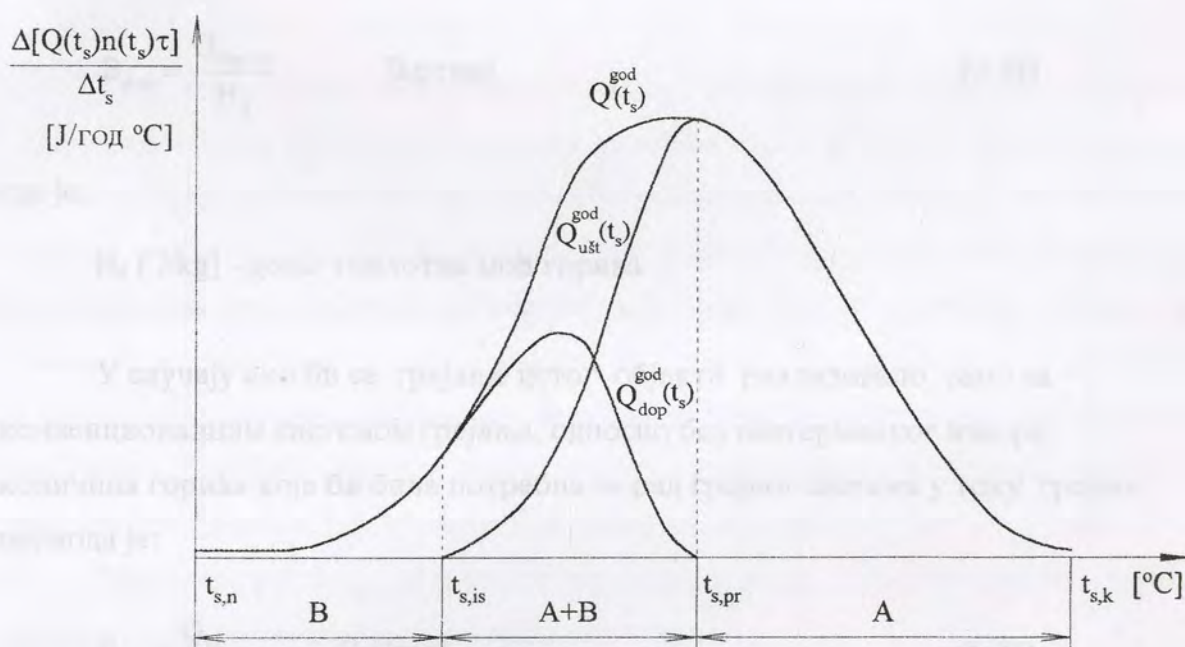
где су:

$Q_{\text{dop}}^{\text{god}}(t_s)$ [J/год]-годишња потрошња топлотне енергије допунског

извора топлоте при одређеној температури спољашњег ваздуха у току грејног периода

$Q_B(t_s)$ [W]- топлотна снага измењивача В у зависности од температуре спољашњег ваздуха

На слици 5.9 је за посматрани геотермални грејни систем дат типски дијаграм који приказује односе између:



Слика 5.9 Типски дијаграм годишње потрошње топлотне енергије геотермалног грејног система $Q^{\text{god}}(t_s)$, годишње производње топлотне енергије геотермалног извора $Q_{\text{ušt}}^{\text{god}}(t_s)$ и годишње потрошње топлотне енергије допунског извора топлоте $Q_{\text{dop}}^{\text{god}}(t_s)$ у функцији спољне температуре током грејног периода

годишње потрошње топлотне енергије геотермалног грејног система $Q^{\text{god}}(t_s)$, годишње уштеде топлотне енергије остварене коришћењем геотермалног

извора $Q_{\text{ušt}}^{\text{god}}(t_s)$, као и годишње потрошње топлотне енергије допунског извора топлоте $Q_{\text{dop}}^{\text{god}}(t_s)$ у функцији температуре спољашњег ваздуха током грејног периода. Површине ограничене овим линијама и апсцисом представљају респективно: укупну потрошњу топлотне енергије геотермалног грејног система Q_{uk} , укупну уштеду топлотне енергије остварене коришћењем геотермалног извора $Q_{\text{ušt,uk}}$ и укупну потрошњу топлотне енергије допунског извора топлоте $Q_{\text{dop,uk}}$ у току грејног периода.

Количина горива која је потребна за рад посматраног геотермалног грејног система у току грејног периода једнака је потрошњи горива допунског извора топлоте и износи:

$$B_{\text{dop}} = \frac{Q_{\text{dop,uk}}}{H_d} \quad [\text{kg/год}] \quad (5.44)$$

где је:

H_d [J/kg] - доња топлотна моћ горива

У случају ако би се грејање истог објекта реализовало само са конвенционалним системом грејања, односно без геотермалног извора, количина горива која би била потребна за рад грејног система у току грејног периода је:

$$B_{\text{uk}} = \frac{Q_{\text{uk}}}{H_d} \quad [\text{kg/год}] \quad (5.45)$$

Уштеда која се може остварити у потрошњи горива током грејне сезоне коришћењем геотермалног грејног система уместо конвенционалног износи:

$$B_{\text{ušt}} = B_{\text{uk}} - B_{\text{dop}} \quad [\text{kg/год}] \quad (5.46)$$

односно:

$$B_{ust} = \frac{Q_{ust}}{H_d} \quad [\text{kg/год}] \quad (5.46)$$

Да би оцена о исплативости коришћења геотермалног грејног система била реалнија потребно је да се поред потрошње горива узму у обзир и други релевантни техно економски параметри од којих зависе укупни инвестициони и погонски трошкови различитих грејних система.

5.4 Техноекономска оптимизација рада геотермалног грејног система

Техноекономска оптимизација рада геотермалног грејног система подразумева да се на основу познатих техничко-технолошких услова одреде параметри рада система тако да његови укупни трошкови рада буду минимални, односно мањи или једнаки са трошковима рада одговарајућег грејног система који користи конвенционално гориво или неки други топлотни извор. У техничко технолошке услове спадају пре свега: температура и издашност геотермалног извора, топлотни конзум објекта који се греје, климатски услови у којима се објекат налази, а у параметре рада система: грејни режим, димензије измењивача топлоте, тип и површина грејних тела итд.

Процена укупних годишњих трошкова рада геотермалног грејног система се може извести на основу општег израза:

$$C_{uk} = a C_{inv} + C_{pog} \quad (5.47)$$

где су:

C_{inv} - инвестициони трошкови, (дин)

a - стопа амортизације, (1/год)

C_{pog} - погонски (експлоатациони) трошкови, (дин/год)

За посматрани случају рада геотермалног система са допунским извором топлоте, приказаном на слици 5.1, израз 5.47 ће имати облик:

$$C_{uk,gt} = (C_{i1} + C_{i2}) \cdot (a + k_r) + V_{dop} C_g + C_{el} (E_p + E_o) \quad [\text{дин/год}] \quad (5.48)$$

где су:

C_{i1} [дин]- инвестициони трошкови геотермалног система

C_{i2} [дин]- инвестициони трошкови допунског система грејања

k_r [1/год] - коефицијент који узима у обзир годишње трошкове ремонта

V_{dop} [kg/год]- потрошња горива допунског извора топлоте

C_g [дин/kg] - цена горива

E_p [kWh/год] - годишња потрошња ел. енергије за погон пумпе

E_o [kWh/год] - годишња потрошња ел. енергије за остале потребе

C_{el} [динара/kWh] - цена електричне енергије

У инвестиционе трошкове геотермалног система (C_{i1}) спадају трошкова уградње и монтаже : измењивача топлоте А, циркулационе пумпе, грејних тела, цевовода са арматуром, као и трошкови израде геотермалне бушотине. Инвестициони трошкови за допунско грејање (C_{i2}) обухватају цену: котла, горионика, резервоара за гориво са арматуром, измењивача топлоте В, аутоматику и електроинсталацију.

У погонске трошкове спадају пре свега трошкови: горива за рад допунског извора топлоте, електричне енергије за рад циркулационе пумпе као и трошкови ремонта.

Стопа амортизације представља смањење вредности постројења за време његове експлоатације које се рачуна као трошак, а чијом се надокнадом обезбеђује проста или проширена репродукција радног процеса. Она зависи од радног века постројења и банкарских камата /29/ и израчунава се по формули:

$$a = \frac{p \cdot (1 + p^n)}{(1 - p)^n - 1} \quad (5.49)$$

где су:

p - годишња вредност каматне стопе на кредит за куповину опреме

n - [год] радни век постројења

Уколико предузеће не користи банкарске кредите за куповину опреме онда је:

$$a = \frac{1}{n} \quad (5.50)$$

Трошкови ремонта су најчешће пропорционални са инвестиционим трошковима.

Ако би се објекат са слике 5.1 грејао само помоћу конвенционалног система грејања, односно без геотермалног извора, укупни годишњи трошкови рада би били:

$$C_{uk,kon} = C_{i,kon} (a + k_r) + V_{uk} C_g + C_{el} (E_p + E_o) \quad [\text{дин/год}] \quad (5.51)$$

где су:

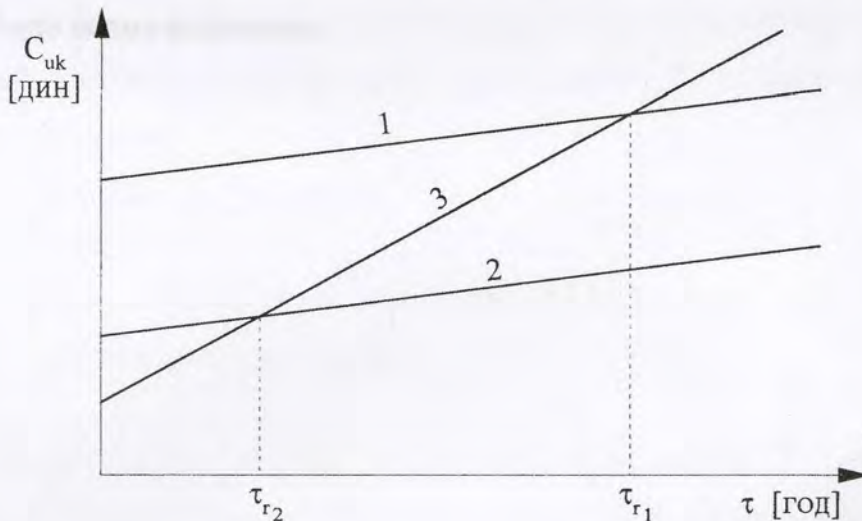
$C_{i,kon}$ [дин]- укупни инвестициони трошкови конвенционалног система грејања

V_{uk} [kg/год] -годишња потрошња горива за грејање

Укупни инвестициони трошкови конвенционалног система грејања су у принципу мањи од укупних инвестиционих трошкова геотермалног грејног система и то пре свега због додатних инвестиционих улагања у геотермални систем C_{it} . Ова улагања могу да буде веома значајна пре свега због трошкова израде геотермалне бушотине.

Погонски трошкови код оба грејна система у највећој мери зависе од потрошње горива. Код геотермалног грејног система потрошња горива $V_{\text{доп}}$ је мања него код конвенционалног $V_{\text{ук}}$, јер се допунски извор топлоте укључује само по потреби тј. када је спољна температура ниска тако да геотермални извор не може у потпуности да обезбеди потребну топлоту за грејање објекта, због чега су и погонски трошкови геотермалног грејног система мањи.

Са дијаграмом на слици 5.10 приказана је зависност између: укупних трошкова рада геотермалног грејног система са допунским извором топлоте за случајеве када инвестициони трошкови обухватају израду геотермалне бушотине (на дијаграму приказано са правом 1) и без трошкова израде геотермалне бушотине (права 2), и укупних трошкова рада одговарајућег грејног система који користи само конвенционално гориво (права 3) у току експлоатационог периода τ .



Легенда

Укупни трошкови рада грејних система:

1. Геотермални укључујући трошкове израде геотермалне бушотине
2. Геотермални без трошкова израде геотермалне бушотине
3. Конвенционални

Слика 5.10 Упоредна анализа укупних трошкова рада геотермалног и конвенционалног грејног система

Укупни инвестициони трошкови геотермалног грејног система (1) су знатно виши од укупних инвестиционих трошкова конвенционалног система грејања(3). Међутим експлоатациони трошкови геотермалног грејног система (1) су нижи, тако да ће после одређеног периода рада τ_{r1} укупни трошкови рада оба система бити једнаки. После периода τ_{r1} укупни трошкови рада геотермалног грејног система (1) ће бити мањи од укупних трошкова рада конвенционалног система грејања (3). Уколико геотермални извор већ постоји, тако да нису потребна улагања у израду геотермалне бушотине, укупни инвестициони трошкови овог грејног система (2) ће бити знатно нижи у односу на геотермални грејни систем (1) код кога је потребна изградња геотермалне бушотине. У овом случају укупни трошкови рада геотермалног грејног система (2) ће бити мањи од укупних трошкова рада конвенционалног система грејања(3) већ после времена τ_{r2} које је знатно краће од времена τ_{r1} .

У нашој земљи постоји већи број изграђених геотермалних бушотина чија се топлотна енергија не користи, па би њихо коришћење у грејним системима било веома исплативо.

5.1. Истраживања геотермално-градњевних изградња система геотермалног грејања

Да се избор одређеног система за геотермално грејање и изградња система геотермалног грејања је првенствено зависи од карактеристика геотермалног извора, који су главне карактеристике геотермалног извора: температура и концентрација геотермалног извора. Температурна карактеристика геотермалног извора је температура у бушотици, која је одређена температуром у бушотици и температуром у бушотици. Температурна карактеристика геотермалног извора је температура у бушотици, која је одређена температуром у бушотици и температуром у бушотици. Температурна карактеристика геотермалног извора је температура у бушотици, која је одређена температуром у бушотици и температуром у бушотици.

6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСТРАЖИВАЊА

У циљу добијања релевантних података неопходних за избор топлотне шеме и материјала опреме за коришћење геотермалне енергије извршена су испитивања која су обухватила следеће:

1. Испитивање техничко-технолошких карактеристика геотермалне воде
2. Испитивање корозионог понашања металних материјала у геотермалној води
3. Испитивање промене отпора провођењу топлоте услед запрљања у геотермалним грејним системима

Испитивања су изведена у лабораторијским и експлоатационим условим и том приликом је коришћена геотермална вода из извора у ПИК "7.јули"-Дебрц. На основу извршених испитивања изведени су закључци који се односе на геотермалну воду из Дебрца међутим с обзиром да су испитивања рађена по одговарајућим методологијама могуће је да се слична испитивања изведу и на другим локалитетима.

6.1 Испитивање техничко-технолошких карактеристика геотермалне воде "Дебрц"

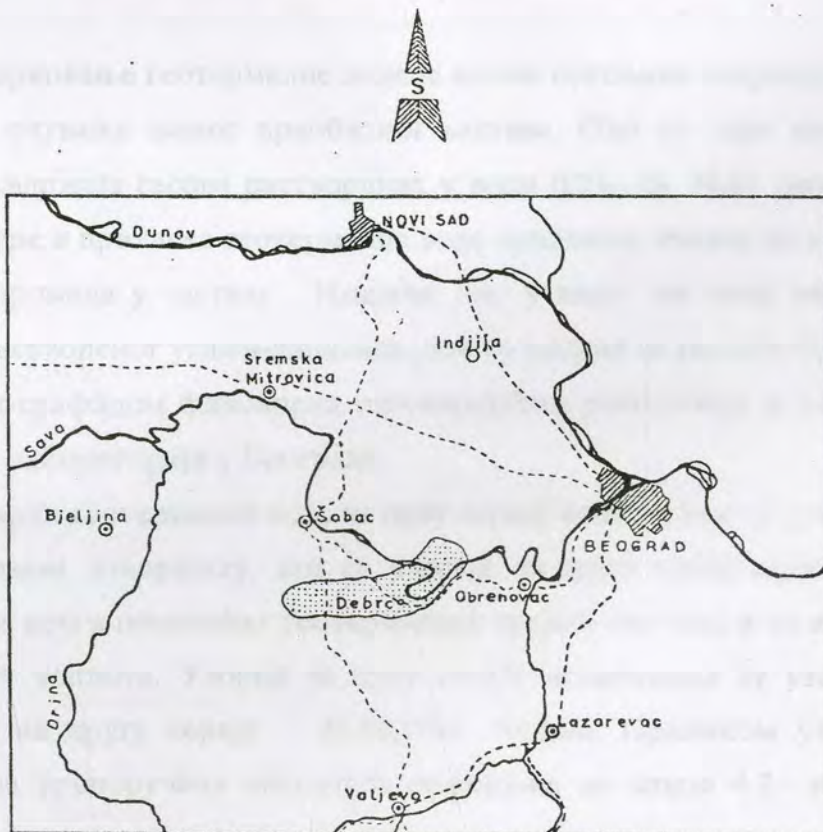
За избор грејног система са геотермалном водом и одговарајућих материјала од основне важности је познавање двеју техничко-технолошких карактеристика геотермалне воде, а то су њена: корозиона активност у односу на металне материјале и склоности ка стварању чврстих наслага на унутрашњим површинама грејног система. Наведене техничко-технолошке карактеристике зависе пре свега од састава, температуре и брзине протицања геотермалне воде.

Анализа састава геотермалне воде је изведена на основу две серије испитивања обављених са геотермалном водом из ПИК "7 јули"- Дебрц.

6.1.1 Основни подаци о истражном бунару геотермалне воде "Дебрц"

У месту Месарцу крај Дебрца, Мачва, удаљеном 52 km од Београда, на земљишту Пољопривредно-индустријског комбината ПИК "7.јули" израђен је 1992. године истражни бунар из кога се добија геотермална вода температуре 50-54°C. Дубина бунара је 1002 m а издашност му је 12-14 l/s при надпритиску на самоизливу од 1 bar. На слици 6.1 приказан је географски положај опитног полигона "Дебрц", на коме су 1987. године започети истражни радови ради коришћења геотермалне воде за потребе ПИК "7.јули" /51/.

Почев од 1987. године на опитном полигону "Дебрц" израђено је неколико истражних бушотина и после њих у првој половини 1992. године израђен је истражни бунар.



Слика 6.1. Географски положај опитног полигона "Дебрц"

Геотермална вода из истражног бунара "Дебрц" потиче из карстне издани, која је откривена у подручју Семберије, Мачве, Посаво-Тамнаве и Срема /18/.

У ПИК "7. јули" геотермална вода се тренутно користи за грејање радних просторија и хала површине од око 2500 m². Примењен је индиректан систем грејања са измењивачем топлоте у примарном кругу и допунским грејањем помоћу два котла на течном гориву. Пројектовани номинални топлотни конзум износи 140 kW, а грејни режим 65/45⁰ C. Планира се израда нових бунара ради повећања количине геотермалне воде како би могла вишенаменски и интензивније да се користи за сушење житарица, загревање стакленика и у друге сврхе.

6.1.2 Узорковање геотермалне воде и методе анализе

Узорковање геотермалне воде је веома осетљива операција која треба да обезбеди очување њеног првобитног састава. Ово се пре свега односи на очување садржаја гасова растворених у води (CO₂, O₂, H₂S) јер због промене температуре и притиска геотермалне воде приликом излива из изворишта може доћи до промена у саставу. Имајући ово у виду на лицу места је одређен садржај раствореног угљен-диоксида, док су узорци са раствором кисеоником и водоник-сулфидом фиксирани одговарајућим реагенсима и њихов садржај је одређен у лабораторији у Београду.

Узорци геотермалне воде за прву серију испитивања су узети директно из цеви на самом изворишту, док су узорци за другу серију испитивања узети из примарног круга постојећег геотермалног грејног система и то из улазне цеви у измењивач топлоте. Узорци за прву серију испитивања су узети 06.07.1995. године, а за другу серију 26.10.1996. године. Приликом узорковања није коришћена препоручена апаратура приказана на слици 4.2 због недостатка финансијских средстава за њену израду.

За анализу воде и одређивање релевантних физичко-хемијских карактеристика коришћене су стандардне методе које се примењују у специјализованим лабораторијама за испитивање вода /35/.

6.1.3 Резултати анализе

Резултати физичко-хемијске анализе за обе серије испитивања су груписани и приказани су у табелама 6.1, 6.2, 6.3 и 6.4. У табелама су приказани подаци за обе серије испитивања, при чему су са (1) наведени подаци добијени анализом узорка узетог 6.07.1995, а са (2) подаци добијени из узорка узетог 26.10.1996. године.

6.1.3.1 Физичко-хемијске карактеристике геотермалне воде "Дебрц"

У табели 6.1 дате су физичко-хемијске карактеристике, које се односе на воду као целовит систем (температура) и оне у којима долази до изражаја збирни садржај њеног вишекомпонентног хемијског састава (рН-вредност, електрична проводљивост, сума минералних супстанци, тврдоћа, сума органских супстанци).

Табела 6.1 Збирне физичко-хемијске карактеристике геотермалне воде "Дебрц"

Узорци узети: 06.07.1995. (1) и 25.10.1996. (2)

Ред. бр.	Карактеристике	Узорак	
		(1)	(2)
1.	Температура °С	53	49,4
2.	<u>Електрохемијске карактеристике</u>		
	рН-вредност	7,71	7,50
3.	Електрична проводљивост μScm^{-1} на 20°С	486	620
	<u>Минералне супстанце</u>		
4.	Суви остатак на 105°С, mg/l	356	386
5.	Сума минералних супстанци, mg/l	519	563
	<u>Тврдоћа</u>		
6.	Укупна тврдоћа, °dH	10,36	10,57
7.	Пролазна тврдоћа, °dH	9,32	9,51
8.	Стална тврдоћа, °dH	1,04	1,06
	<u>Органске супстанце</u>		
9.	Утрошак KMnO_4 mg/l	1,30	1,20

Као што се из табеле 6.1 види резултати за обе серије испитивања (колоне 1 и 2) се битно не разликују. Констатоване разлике се могу објаснити различитим местом и временом узимања узорака. По рН-редности (7,71 и 7,50) вода показује слабо алкалну реакцију. По електричној проводљивости (486 и 620 μScm^{-1} на 20°C) и суми јонски растворених минералних супстанци (519 и 563 mg/l) испитивана вода спада у воде средњег нивоа минерализације /39/, а разлике између два мерења су највероватније последица нечистоћа у цевоводу. По укупној тврдоћи (10,36 °dH и 10,57 °dH) вода спада је умерено тврде. Утрошак калијум-перманганата (1,30 и 1,20 mg/l) указују на врло мали садржај органских супстанци у испитиваној води.

6.1.3.2 Јонски растворене минералне соли

Садржај јонски растворених минералних соли дат је у табели 6.2

Табела 6.2 Јонски растворене минералне соли у геотермалној води "Дебрц"

Ред бр.	Компонента	Узорак 1			Узорак 2		
		mg/l	mgekv/l	mgekv %	mg/l	mgekv/l	mgekv %
	<u>Катјони</u>						
1.	Амонијум, NH_4^+	1,56	0,114	1,82	1,75	0,13	1,9
2.	Натријум, Na^+	46,00	2,001	2,92	58,3	2,53	37,4
3.	Калијум, K^+	7,12	0,182	32,10	7,46	0,19	2,8
4.	Калцијум, Ca^{2+}	41,04	2,048	32,85	44,59	2,23	32,9
5.	Магнезијум, Mg^{2+}	20,88	1,646	26,41	18,74	1,48	21,87
6.	Гвожђе, Fe^{3+}	4,50	0,242	3,87	4,00	0,21	3,1
7.	Манган, Mn^{2+}	0,05	0,002	0,03	0,05	0,002	0,03
Сума:		121,15	6,235	100,00	134,84	6,772	100,00

	Анјони						
8.	Бикарбонати, HCO ₃ ⁻	332	5,451	87,56	350,8	5,75	84,6
9.	Хлориди, Cl ⁻	5,0	0,141	2,26	9,8	0,27	3,9
10.	Сулфати, SO ₄ ²⁻	30,14	0,627	10,07	37,15	0,77	11,3
11.	Нитрити, NO ₂ ⁻ - N	<0,001	-	-	-	-	-
12.	Нитрати, NO ₃ ⁻ - N	0,46	0,007	0,11	0,46	0,007	0,2
Сума		367,60	6,226	100,00	398,21	6,797	100,00

Провером односа садржаја анјона и катјона израженог у mgkv/l (анјонско-катјонски биланс) добија се вредност 0,998 за узорак (1), односно 1,004 за узорак (2), што указује да је анализа урађена са великом тачношћу /35/.

Повећано присуство катјона калцијума, магнезијума и гвожђа указује на могућност таложења каменца на унутрашњим површинама геотермалног грејног система. Наиме, наведени катјони са одговарајућим анјонима (карбонатним, хидроксилиним) могу да створе тешко растворна једињења. Садржај јона гвожђа је 10 пута већи од максимално допуштеног садржаја у води за пиће (0,3 mg/l) .

Од анјона наведених у табели 6.2 значајан утицај на корозиону активност воде би могли да имају хлоридни, сулфатни и карбонатни јони.

6.1.3.4 Растворени гасови и недисосоване супстанце

Садржај растворених гасова и недисосованих супстанци приказан је у табели 6.3. Из табеле 6.3 се запажа да је садржај раствореног кисеоника у узорку воде узетом на улазу у измењивач топлоте (2) два пута већи од садржај у узорку узетом на изворишту геотермалне воде (1). Ово повећање се може објаснити појавом апсорпције, тј. растварања кисеоника из ваздуха који се налази у цевоводу кроз који се транспортује геотермална вода од изворишта до измењивача топлоте.

Табела 6.3 Растворени гасови и недисосоване супстанце у геотермалној води "Дебрц"

Р.бр	Компонента	Садржај [mg/l]	
		1	2
	<u>Растворени гасови</u>		
1.	Кисеоник, O ₂	1,45	2,88
2.	Водоник-сулфид, H ₂ S	1,43	0,40
3.	Слободни угљен-диоксид, CO ₂	6,7	9,8
	<u>Недисосоване супстанце</u>		
4.	Силицијумова киселина, као SiO ₂	30,0	30,0

Истовремено садржаја водоник-сулфида у узорку (2) је мањи него у узорку (1) што је највероватније последица десорпције овог гаса из воде при њеном транспорту кроз цевовод. Садржај слободног угљен-диоксида је истог реда величине за оба узорка, а разлике су највероватније последица апсорпције овог гаса из ваздуха при транспорту геотермалне воде кроз цевовод.

На основу резултата из табеле 6.3 требло би посебно указати да кисеоник, водоник-сулфид и угљен-диоксид имају јако корозионо дејство на низ материјала па о том треба посебно водити рачуна при избору одговарајућих материјала за грејне системе са геотермалном водом.

6.1.2 Одређивање склоности геотермалне воде ка растварању калцијум-карбоната

Утврђени садржај слободног угљен-диоксида у геотермалној води указује на то да вода не садржи тзв. агресивну угљену киселину која раствара калцијум-карбонат. Да би се ова претпоставка проверила, одређена је склоност воде ка растварању калцијум-карбонат помоћу следеће методе [35]. Маса од 3 g спрашеног калцијум-карбоната (хемијски чистог мермера) сипа се у 300 ml воде у конусну боцу и затвори са брушеним чепом. После 3 дана контакта воде са калцијум-карбонатом на собној температури уз повремено мешање, одређује се рН- вредност и укупна алкалност воде засићене калцијум-карбонатом (рН_s-

вредност и алкалност A_c) и пореди са првобитним вредностима (pH-вредност и алкалност A). Добијени резултати унети су у табелу 6.4.

Табела 6.4 Способност растварања калцијум-карбоната (агресивност воде)

Карактеристика	Узорак	
	1	2
pH-вредност (почетна)	7,71	7,50
pH _s -вредност (после засићења)	7,74	7,40
A [mg ekv/l] (почетна)	5,45	5,75
A _s [mg ekv/l] (после засићења)	5,60	5,54

Према вредностима из табели 6.4 за узорак (1) је $pH_s > pH$ и $A_s > A$, што би указивало да вода показује извесну склоност ка растварању калцијум-карбоната. Међутим, разлике $pH_s - pH$ и $A_s - A$ су врло мале и блиске грешки мерења ових величина што допушта извођење закључака да вода занемарљиво мало раствара калцијум-карбонат. За узорак (2) је $pH_s < pH$ и $A_s < A$, што би указивало да вода показује извесну склоност ка таложењу калцијум-карбоната. Међутим и у овом случају разлике $pH_s - pH$ и $A_s - A$ су врло мале и могу се приписати грешки мерења.

Како су pH-вредности и алкалности пре и после засићења воде калцијум-карбонатом веома блиске, може се закључити да геотермална вода не раствара калцијум-карбонат тако да се он таложи на металним површинама. Истовремено то значи да ће метална површина на којој се таложи калцијум-карбонат бити заштићена од корозије.

6.1.3 Ланжелијеов и Ризнеров индекс

За карактеризацију воде у погледу таложења каменца и њеног корозионог дејства користе се Ланжелијеов индекс засићења и Ризнеров индекс стабилности. Оба индекса разматрају воду са аспекта равнотеже која се у води успоставља између једињења: карбоната, биокарбоната и угљене киселине. Корозионо дејство воде се посматра само са аспекта утицаја наведених једињења тако што се даје процена о склоности ка таложењу калцијум-карбоната на металним материјалима. Овде се не узима се у обзир утицај других компонената у води (нпр. хлорида, раствореног кисеоника, раствореног водоник-сулфида и др.) на корозију метала.

Ланжелије-ов индекс (L.I.) и Ризнер-ов индекс (R.I.) по дефиницији су /37/:

$$L.I. = pH - pH_s$$

$$R.I. = 2pH_s - pH$$

а одређивање бројних вредности L.I. и R.I је детаљно приказано у поглављу 4.

На основу података о хемијској анализи геотермалне воде "Дебрц", приказане у табели 6.2 и одговарајућих номограма (слика 4.2), одређена је pH_s вредност за узорак на изворишту (1) која износи 7,01. Према томе, вредности Ланжелијеовог и Ризнеровог индекса су:

$$L.I. = 7,71 - 7,01 = 0,70$$

$$R.I. = 14,02 - 7,71 = 6,31$$

Пошто је Ланжелијеов индекс позитиван, испитивана вода није агресивна, тј. не раствара заштитни слој калцијум-карбоната исталожен по зидовима металних цеви. Истовремено вода показује слабу тенденцију таложења каменца. Вредност Ризнер-овог индекса 6,31 је већа за 0,31 од вредности 6,0 у односу на коју се по Ризнеру оцењује вода у погледу таложења односно растварања

каменца. Добијена вредност Ризнеровог индекса указује на исти закључак, који је произашао из Ланжелијеовог индекса, тј. да испитивана вода има слабу тенденцију таложења каменца и није агресивна.

Закључци о корозивности и стабилности геотермалне воде "Дебрц" изведени на основу индекса L.I и R.I. се поклапају са закључцима добијеним на основу методе засићења воде калцијум-карбонатом. Међутим, обе ове методе узимају у обзир само садржај карбоната, бикарбоната и угљене киселине у води док је утицај осталих фактора занемарен. Имајући ово у виду јасно је да се прецизнији резултати могу добити само на основу додатних експерименталних испитивања у којима се морају узети у обзир и остали релевантни фактори као што су садржај гасова у води, температура воде, квалитет материјала, брзина протицања воде итд.

6.1.4 Закључаци на основу испитивања техничко-технолошких карактеристика геотермалне воде

На основу две серије испитивања хемијског састава и релевантних физичко-хемијских карактеристика геотермалне воде из ПИК "7 јули"- Дебрц са аспекта корозивности и стабилности (тенденције ка стварању наслага од калцијум-карбоната) могу се извести следећи закључци:

- Да би се добио систематски увид у корозиону активност геотермалне воде према металним материјалима и склоност према стварању чврстих наслага на унутрашњим површинама елемената грејног система рационално је физичко-хемијске карактеристике поделити у три групе: 1. Збирне физичко-хемијске карактеристике, 2. Јонски растворене супстанце, 3. Растворени гасови и недисосоване супстанце.
- Испитивана геотермална вода показује слабо алкалну реакцију и спада у воде са средњим нивоом минерализације. Овај ниво минерализације испољава се у вредности електричне проводљивости која омогућава, ако су остали услови испуњени, одвијање процеса електрохемијске корозије.

- Два узорака геотермалне воде узета у интервалу од 15,5 месеци са различитих места постојећег геотермалног грејног система ПИК 7.јули-Дебрц и то са изворишта и улаза воде у измењивач топлоте не разликују се битно по резултатима физичко-хемијске анализе изузев у погледу садржаја гасова и то: кисеоника, водоник-сулфида и угљен-диоксида.
- Повећан садржај раствореног кисеоника и угљен-диоксида, а мањи садржај раствореног водоник-сулфида у узорку узетом на улазу у измењивач топлоте у односу на узорак са изворишта може се објаснити појавом апсорпције, односно десорпције ових гасова из ваздуха који се налази у цевоводу кроз који се транспортује геотермална вода. Садржај кисеоника од 2,88 mg/l, водоник-сулфида од 1,43 mg/l и угљен-диоксида од 9,8 mg/l указује на могућу појаву корозије материјала у геотермалној води.
- Измерен садржај хлоридних и сулфатних јона је такав да не утиче битно на корозиону активност ових анјона на материјале.
- Присуство јона калцијума, магнезијума и гвожђа од значаја је за таложење нерастворних једињења које ови катјони стварају са одговарајућим анјонима (карбонатним, хидроксилним)
- Према резултатима испитивања склоност воде ка растварање спрашеног калцијум-карбоната и вредностима Ланжелије-овог и Ризнер-овог индекса испитивана вода показује малу тенденцију таложења, односно растварања каменца карбонатног типа.
- Према вредности Ланжелије-овог и Ризнер-овог индекса испитивана вода испољава слабу тенденцију у погледу корозионе активности на метале.
- У циљу добијања прецизнијих података о корозивности и стабилности геотермалне воде неопходна су додатна испитивања која би требало да узму у обзир и остале релевантне факторе као што су температура воде, квалитет материјала, брзина протицања воде итд.

6.2 Испитивање корозионог понашања металних материјала у геотермалној води

За избор металних материјала од којих се израђују елементи опреме за коришћење геотермалне енергије од основне важности је познавање корозионог понашања ових материјала у геотермалној води. У том циљу извршена су одговарајућа испитивања по стандардним методама. Испитивање корозионог понашања металних материјала у геотермалној води обављено је у лабораторијским и експлоатационим условима са геотермалном водом из бушотине у Дебрцу.

6.2.1 Избор материјала и њихове основне карактеристике

За испитивања су одабрани метални материјали које се данас најчешће користе за израду грејних системима а то су: нерђајући челик, нискоугљенични челик и сиво ливено гвожђе.

Од нерђајућих челика за испитивање су одабрани узорци од три врсте хром-никал аустенитних челика произведених у Немачкој. Њихове упоредне ознаке по немачком стандарду DIN 17440, југословенском JUS C.В0.600 и америчком стандарду AISI су:

1. W.Nr.1.4301	JUS Č.4580	AISI 304
2. W.Nr.1.4541	JUS Č.4572	AISI 321
3. W.Nr.1.4571	JUS Č.4574	AISI 316

Челик Č 4580, познат као 18/8, је нестабилизвана врста аустенитног челика која се данас најчешће користи у процесној индустрији. Овај челик је подложен интеркристалној корозији при неодговарајућем термичком третману.

Челик Č 4572 је верзија аустенитног челика Č 4580 стабилизвана са титаном.

Челик Č 4574 је стабилизвана врста аустенитног челика који у свом саставу има молибден због чега има већу корозиону отпорности.

За узорак од нискоугљеничног челика узета је цев декларисана као Č.1212 од које се по стандарду JUS C.B5.021 производе бешавне цеви.

За узорке од сивог ливеног гвожђа узети су делови вентила и радијатора из постојеће грејне инсталације у Дебрцу. За њих нису добијени ближи подаци о врсти гвожђа.

6.2.2. Анализа састава одабраних материјала

Да би се утврдиле тачне вредности физичко-хемијског састава одабраних узорака материјала, односно да би се проверио састав и квалитет материјала које наводи произвођач, извршене су одговарајуће анализе. Хемијске анализе су урађене у сарадњи са Лабораторијом фабрике одливака ИЛР из Београда и том приликом примењене су методе које се стандардно користе у овој Лабораторији.

У табели 6.5 дати су резултати хемијске анализе за три одабране врсте нерђајућих челика, а упоредо су дате и вредности које прописује DIN 17440. Одређен је садржај основних легирајућих елемената: С, Сг, Ni, Мо и Ti. Узорци су испитани методом оптичке спектрометрије помоћу спектрометра тип APL 3460. Као што се из табеле 6.5 види, вредности садржаја С, Сг, Ni, Мо и Ti одговарају вредностима које прописује DIN 17440. Вредности за Сг и Ni код сва три челика су ближе доњој граници прописаних вредности, док је вредност за С код челика Č 4580 једнака прописаној максималној вредности. На основу извршене анализе може се констатовати да хемијски састав одабраних узорака од нерђајућих челика одговара вредностима предвиђеним стандардом DIN 17440 и JUS C.B0.600.

Табела 6.5 Хемијског састава узорака од нерђајућег челика добијен на основу анализе и вредности које прописује DIN 17440

Ознака материјаа	Хемијски састав, мас. %				
	C	Cr	Ni	Mo	Ti
узорак 1	0,07	18,12	9,08	-	-
W.Nr.1.4301	max 0,07	17,0÷19,0	8,5÷10,5	-	-
узорак 2	0,05	17,58	9,31	-	0,36
W.Nr.1.4541	max 0,08	17,0÷19,0	9,0÷12,0	-	$\geq 5x\%C \leq 0.08$
узорак 3	0,06	17,40	10,60	2,34	0,35
W.Nr.1.4571	max 0,08	16,5÷18,5	10,5÷13,5	2,0÷2,5	$\geq 5x\%C \leq 0.08$

У табели 6.6 приказани су вредности хемијске анализе узорка од нискоугљеничног челика и вредности које прописује JUS C.B5.021 за челик Č.1212 и Č.1213. На основу утврђеног садржаја C у узорку од нискоугљеничног челика може се закључити да анализирани челик није Č.1212, како је декларисан, већ Č.1213 кога карактерише већа вредност затезне чврстоће.

Табела 6.6 Резултати хемијске анализа узорка од нискоугљеничног челика и вредности које прописује JUS C.B5.021 за челик Č1212 и Č.1213

Ознака материјала	Хемијски састав, мас. %				
	C	Si	Mn	P	S
Узорак(Č.1212)	0,20	0,28	0,44	0,011	0,010
Č.1212 по JUS C.B5.021	$\leq 0,17$	0,10÷0,35	$\geq 0,40$	max 0,05	max 0,05
Č.1213 по JUS C.B5.021	$\leq 0,22$	0,10÷0,35	$\geq 0,40$	max 0,05	max 0,05

У табели 6.7 приказани су резултати хемијске анализе узорака од сивог ливеног гвожђа.

Табела 6.7 Хемијска анализа узорака од сивог ливеног гвожђа

Ознака материјала	Хемијски састав, мас. %				
	C	Si	Mn	P	S
узорак(ферит)	3,98	2,19	0,47	0,75	0,15
узорак(перлит)	3,23	1,88	0,99	0,078	0,21
LGF2-подгрупа P2 и S2 по JUS C.J2.010	min 3,8	1,75÷2,25	0,70÷1,10	0,70÷1,10	0,04÷0,06

Хемијски састав материјала од кога је изливен радијатор и вентил може се најприближније поредити са саставом сивог ливеног гвожђа LGF2-подгрупа P2 и S2 по JUS C.J2.010 датог у табели 6.7. Садржај Mn и S код испитаних узорака знатно одступа од вредности прописане ЈУС-ом, тако да за узорке није пронађена одговарајућа стандардна ознака. Међутим у циљу означавања узорци су у даљем тексту дефинисани као ферит (узорак од радијатора) и перлит (узорак од вентила) , што најприближније одговара њиховим структурама.

6.2.3 Испитивање утицаја геотермалне воде на одабране материјале у лабораторијским условима

За испитивање корозионе отпорности узорака од нерђајућег челика, нискоугљеничног челика и сивог ливеног гвожђа у лабораторијским условима коришћена је хемијска метода. Она се заснива на одређивању губитка масе испитиваног узорка, као и утврђивању морфолошких промена које су настале на површинама узорка под дејством геотермалне воде. На основу губитка масе узорка одређује се брзина корозије материјала, а на основу морфолошких

промена може се оценити тип корозионог оштећења услед дејства геотермалне воде.

6.2.3.1 – Опис методе и општи услови испитивања

Узорак геотермалне воде узиман је директно из бушотине у Дебрцу одакле је допремљен у лабораторију у Београду. За испитивање су припремљена по три узорка, димензија сва 20x30x3 mm, од сваког материјала тј. од: нерђајућих челик Č 4574, Č 4572 и Č 4580, нискоугљеничног челика Č.1213, сивог ливеног гвожђа (ферит и перлит).

Припрема узорака за испитивање и само испитивање изведено је у складу са стандардним поступком и то на следећи начин /52/:

1. Узорци су мокро брушени у четири фазе: са силицијум-карбидним папиром финоће 160, 320, 600 и полирани са Al_2O_3 финоће 1 μm .

2. Одмашћивање је извршено у етанолу а испирање са дестилованом водом у ултразвучном купатилу.

3. После сушења узорака измерена им је маса на аналитичкој ваги и утврђен изглед површине помоћу металографског микроскопа.

4. Узорци су стављени у стаклене посуде (6 посуда запремине 0,7 dm³) које су потпуно напуњене са геотермалном водом. У сваку посуду стављена су по три узорка од истог материјала. Посуде су затворене херметички и стављене у термостат коме је одржавана температура на $50 \pm 2^\circ C$, у току целог периода испитивања од 47 дана.

5. После периода од 47 дана, узорци су извађени из посуда и извршено је уклањање корозионих продуката у складу са стандардом JUS C.A5.005.

Овим стандардом утврђени су поступци за уклањање продуката корозије са метала и легура који се стварају током њиховог излагања дејству корозионе средине без значајнијег уклањања основног метала. На овај начин омогућено је одређивање губитка масе метала до кога долази у току излагања дејству

корозионе средине. Поступак скидања корозионих продуката изведен је на следећи начин:

- После вађења из корозионе средине узорци се брзо суше помоћу филтер папира и одлажу у ексикатор.
- Утврђује се изглед површине узорака са аспекта корозије помоћу металографског микроскопа, израда фотографија.
- Врши се скидање корозионих продуката и то механички и хемијски:
 - Механички: под струјом воде и четкањем одговарајућом четком.
 - Хемијски: помоћу раствора С.3.5. за челик \checkmark 1213 и сиво ливено гвожђе и раствора С.7.1. за нерђајући челик, на основу ЈУС С.А5.005.
 - Раствор С.3.5.:* 500 ml хлороводоничне киселине (HCl , $\rho = 1,19 \text{ g/ml}$), 3,5g хексаметилентетрамина, дестилована вода до 1000 ml, температура раствора 20 до 25°C,
 - Раствор С.7.1:* 100 ml азотне киселине (HNO_3 , $\rho = 1,42 \text{ g/ml}$), дестиловане воде до 1000 ml, температура раствора 60 °C.
- Узорци се перу и суше са филтар папиром а затим смештају у ексикатор где остају 4-5 часова.

6. После скидања корозионих продуката измерена је маса узорка помоћу аналитичке ваге и најзад

7. Извршен је преглед површина под металографским микроскопом (увећање $\times 100$) са аспекта појаве тачкасте корозије и других врста локалне корозије и опис истих. Код тачкасте корозије евидентирани су: број рупица (питова) по јединици површине, расподела, облик, пречник, средња и максимална дубина.

Од свих узорка метала припремљен је и по један тзв. контролни узорак који служи за одређивање губитка масе основног метала насталог приликом поступка уклањања продуката корозије. Он се припрема на исти начин као и узорци који се испитују. Контролни узорак се не излаже деловању геотермалне воде, али се са њега врши скидање корозионих продуката истим поступком као и са узорка који су били испитивани у геотермалној води. Мерењем масе контролног узорка пре и после поступка уклањања корозионих продуката

добија се вредност губитка масе основног материјала узорка изазваног уклањањем корозионих продуката. Ова вредност се користи за корекцију губитка масе узорка са кога се врши уклањање продукта корозије, тако да губитак масе испитиваног узорка материјала услед корозије у геотермалној води износи:

$$\Delta m = \Delta m_o - \Delta m_{kon} \text{ [mg/cm}^2\text{]} \quad (6.1)$$

где су:

$\Delta m \text{ [mg/cm}^2\text{]}$ - губитак масе узорка услед дејства геотермалне воде

$\Delta m_o \text{ [mg/cm}^2\text{]}$ - губитак масе узорка услед уклањања корозионих продуката

$\Delta m_{kon} \text{ [mg/cm}^2\text{]}$ - губитак масе контролног узорка

На основу вредности Δm може се израчунати средња брзина корозије v_{kor} као и смањење дебљине метала услед корозије Δh коришћењем израза 4.21 и 4.22:

$$v_{kor} = \frac{10\Delta m}{\tau} \text{ [g/m}^2\text{h]}$$

$$\Delta h = \frac{8,76v_{kor}}{\rho} \text{ [mm/god]}$$

где су:

$\tau \text{ [h]}$ - време излагања узорка дејству геотермалне воде

$\rho \text{ [g/cm}^3\text{]}$ - густина материјала

Коришћење ових израза има смисла уколико је корозија равномерна.

6.2.3.2 Резултати испитивања корозионе отпорности сивог ливеног гвожђа и нискоугљеничног челика Č.1213

После испитивања узорака у геотермалној води у трајању од 47 дана, на начин како је претходно описано, изведен је поступак уклањања корозионих продуката. Поступак је поновљен четири пута за челик Č.1213 и сиво ливено гвожђе (перлит), а пет пута за сиво ливено гвожђе (ферит). Време једног циклуса скидања корозионих продуката, тј. време држања узорка у раствору за скидање корозионих продуката износило је 30 минута. Маса материјала узорка је мерена пре и после сваког поступка скидања корозионих продуката, па је на основу ове разлике одређен и губитак масе узорка за сваки циклус:

$$\Delta m_i = m_{p,i} - m_{k,i} \quad [\text{mg}/\text{cm}^2] \quad (6.4)$$

где су:

Δm_i - губитак масе узорка услед уклањања корозионих продуката

i - редни број циклуса

$m_{p,i}$ - маса узорка пре поступка уклањања корозионих продуката

$m_{k,i}$ - маса узорка после поступка уклањања корозионих продуката

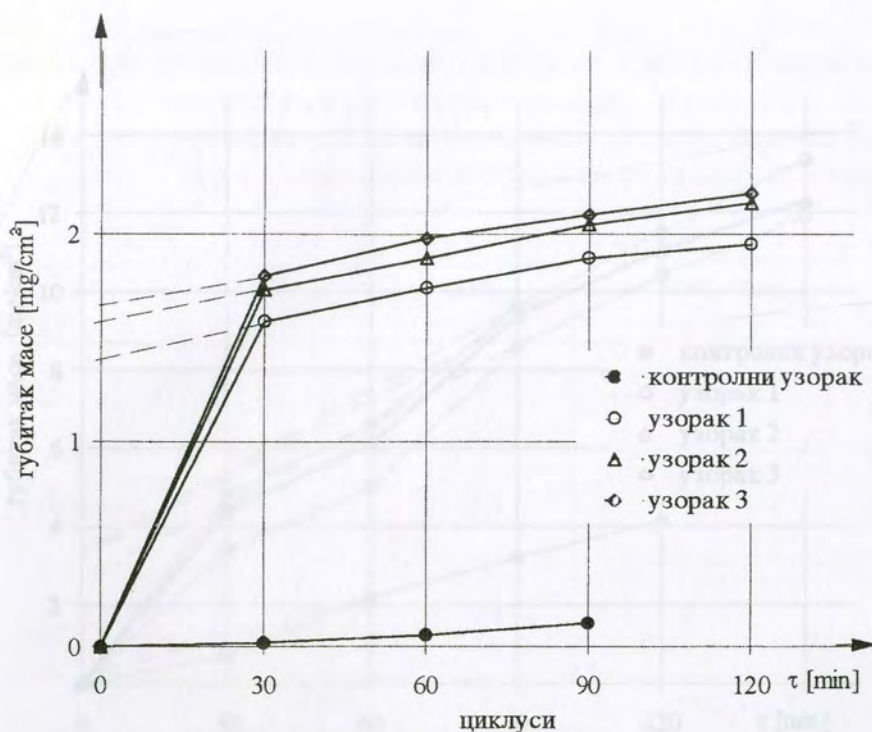
У табели 6.8 приказани су резултати мерења губитка масе испитиваних узорака од челика и сивог ливеног гвожђа као и губитак масе контролног узорка после сваког циклуса уклањања корозионих продуката.

Табела 6.8 Резултати мерења губитка масе узорака челика Č.1213, сивог ливеног гвожђа (SL) и контролних узорака услед уклањања корозионих продуката

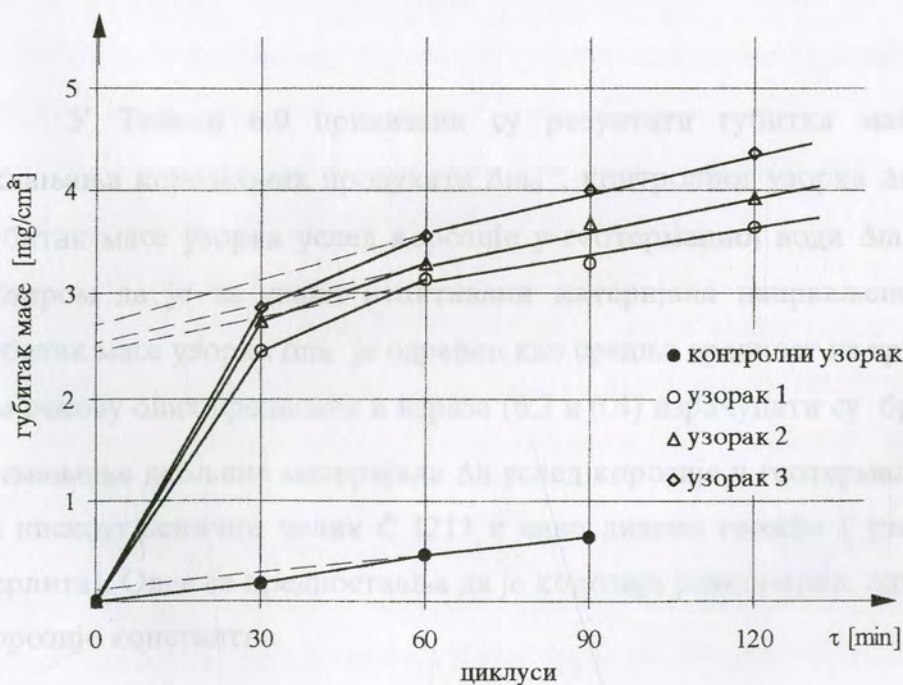
Узорци	S^* [cm ²]	Δm_1 [mg/cm ²]	Δm_2 [mg/cm ²]	Δm_3 [mg/cm ²]	Δm_4 [mg/cm ²]	Δm_5 [mg/cm ²]
Č.1213 (узорак 1)	19,6	1,551	0,173	0,127	0,051	-
Č.1213 (узорак 2)	19,6	1,709	0,087	0,199	0,127	-
Č.1213 (узорак 3)	19,6	1,755	0,189	0,107	0,087	-
Č.1213(контролни узорак)	18	0,017	0,050	0,056	-	-
SL (перлит-узорак 1)	11	2,691	0,554	0,364	0,254	-
SL (перлит-узорак 2)	11,1	2,387	0,676	0,180	0,333	-
SL (перлит-узорак 3)	10,5	2,800	0,714	0,429	0,333	-
SL (перлит-контрол. узорак)	11,8	0,135	0,330	0,169	-	-
SL (ферит-узорак 1)	13,2	3,735	1,659	3,401	1,803	1,333
SL (ферит-узорак 2)	12,2	4,541	1,623	3,369	1,606	0,552
SL (ферит - узорак 3)	11	4,882	1,809	3,149	1,964	1,354
SL (ферит-контрол. узорак)	9,7	0,711	1,474	1,124	0,969	-

* $S[\text{cm}^2]$ - површина узорка изложена деловању корозије

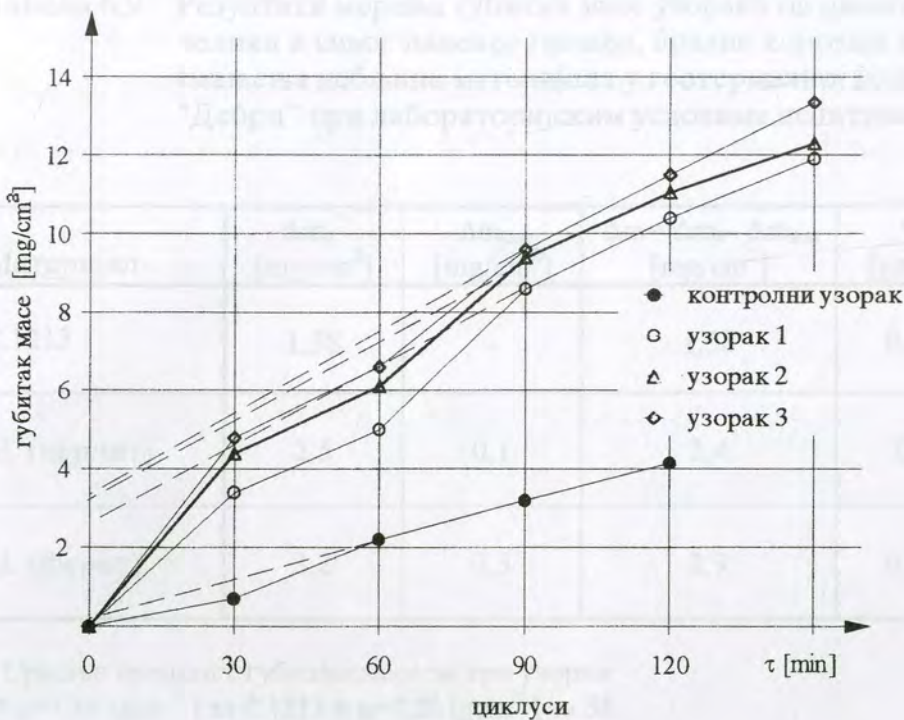
На сликама 6.8 до 6.10 дат је графички приказ резултата из табеле 6.8, тј. приказани су губици масе узорака по јединици површине Δm_i у функцији циклуса, односно времена уклањања корозионих продуката τ . Екстраполацијом добијених резултата на ординатну осу, односно на време пре поступка уклањања корозионих продуката, одређује се губитак масе узорка изазван корозијом Δm_0 , тј. губитак масе узорка услед корозије у геотермалној води. Да би се одредио прави губитак масе узорка услед корозије у геотермалној води Δm потребно је да се вредност Δm_0 коригује са губитком масе основног материјала, односно контролног узорка Δm_{kon} , сходно изразу (6.1).



Слика 6.8 Губитак масе узорка од Č 1213 у функцији времена скидања корозионих продуката



Слика 6.9 Губитак масе узорка од сивог ливеног гвожђа (перлит) у функцији времена скидања корозионих продуката



Слика 6.10 Губитак масе узорка од сивог ливеног гвожђа (ферит) у функцији времена скидања корозионих продуката

У Табели 6.9 приказани су резултати губитка масе узорка услед уклањања корозионих продуката Δm_0 , контролног узорка Δm_{kon} као и прави губитак масе узорка услед корозије у геотермалној води $\Delta m = \Delta m_0 - \Delta m_{kon}$. С обзиром да је за сваки испитивани материјала направљено по три узорка, губитак масе узорка Δm_0 је одређен као средња вредност из три мерења.

На основу ових вредности и израза (6.3 и 6.4) израчунати су брзина корозије v_{kor} и смањење дебљине материјала Δh услед корозије у геотермалној води "Дебрц" за нискоугљенични челик Š 1213 и сиво ливено гвожђе (узорци од ферита и перлита). Овде се предпоставља да је корозија равномерна, односно да је брзина корозије константна.

Табела 6.9 Резултати мерења губитка масе узорака од нискоугљеничног челика и сивог ливеног гвожђа, брзине корозије и смањења дебљине материјала у геотермалној води "Дебриц" при лабораторијским условима испитивања

Материјал	Δm_0^* [mg/cm ²]	Δm_{kor} [mg/cm ²]	$\Delta m = \Delta m_0 - \Delta m_{kor}$ [mg/cm ²]	v_{kor} [gm ⁻² h ⁻¹]	Δh^{**} [mm/год]
Č.1213	1,58	-	1,58	0,014	0,016
SL (перлит)	2,5	0,1	2,4	0,02	0,025
SL (ферит)	3,2	0,3	2,9	0,025	0,03

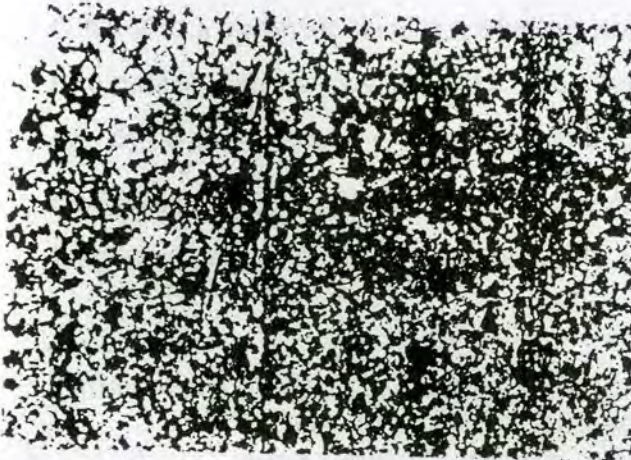
* Средња вредност губитка масе за три узорка

** $\rho = 7,86$ [gcm⁻³] за Č.1213 и $\rho = 7,20$ [gcm⁻³] за SL

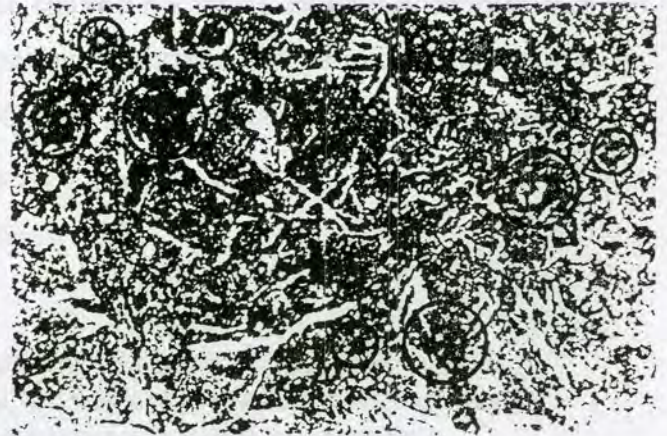
На основу добијених резултата може се констатовати да је брзина корозије одабраних материјала у геотермалној води "Дебриц" измерена у лабораторијским условима мала ($< 0,25$ mm/god.), тако да ови материјали у потпуности задовољавају у погледу отпорности према корозији (табела 4.2) /48/. Велика вредност губитка масе узорка од сивог ливеног гвожђа (слике 6.9 и 6.10) је последица значајних губитака масе основног метала током процеса улкањања корозионих продуката. На основу овога се може закључити да коришћени раствор за уклањање корозионих продуката (С.3.5 по JUS C.A5.005) није погодан за сиво ливено гвожђе и/или да је време једног циклуса тј. време држања узорка у раствору за уклањање корозионих продуката исувише дуго. Због тога, резултате мерења губитака масе сивог ливеног гвожђа требало би узети као оријентационе.

После уклањања корозионих продуката са узорака нискоугљеничног челика Č. 1213 и сивог ливеног гвожђа проучена је површина уз помоћ металографског микроскопа. Карактеристичан изглед површине појединих узорака метала, после 47 дана стајања у геотермалној води при температури $t = 50 \pm 2$ °C , приказан је на сликама 6.11 до 6.13. На основу слике 6.11 се може закључити да је корозија код нискоугљеничног челика равномерна јер на

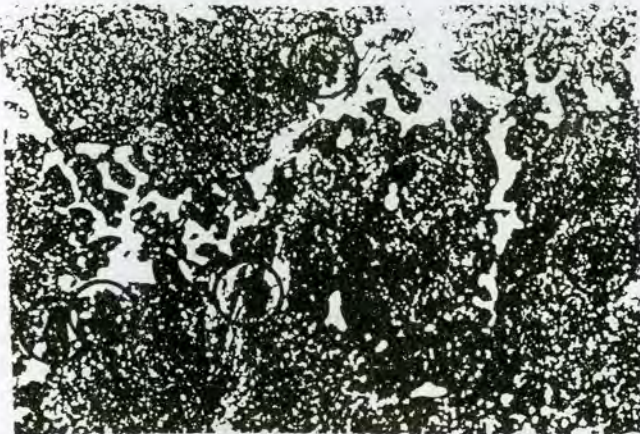
узорцима нису примећена корозиона оштећења у форми рупица. На површини узорка од сивог ливеног гвожђа (перлит) уочена је интензивна локална корозија у форми рупица, које су на слици 6.12 означене помоћу кругова, и захватају површину од 10 до 250 μm^2 . Код узорака од сивог ливеног гвожђа (ферит), (слика 6.13) уочена је интензивна локална корозија у форми рупица, које захватају површину од 10 до 100 μm^2 .



Слика 6.11 Изглед површине узорка од нискоугљеничног челика Č.1213 после испитивања, увећано 200 пута



Слика 6.12 Изглед површине узорка од сивог ливеног гвожђа (перлит) после испитивања, увећано 200 пута



Слика 6.13 Изглед површине сивог ливеног гвожђа (ферит) после испитивања, увећано 200 пута

6.2.3.3 Резултати испитивања корозионе отпорности нерђајућих челика

Пошто су узорци од нерђајућих челика стајали 47 дана у геотермалној води примењен је исти поступак за испитивање корозионе отпорности као и код узорка од сивог ливеног гвожђа и нискоугљеничног челика. Скидање корозионих продуката је поновљено два пута, са раствором С.7.1 по ЈУС С.А5.005, а губитак масе одређен је после сваког поступка скидања корозионих продуката. На основу губитка масе основног и контролног узорка израчунати су брзина корозије v_{kor} и смањење дебљине материјала Δh услед корозије у геотермалној води "Дебрц" на начин описан у поглављу 6.2..3.2.

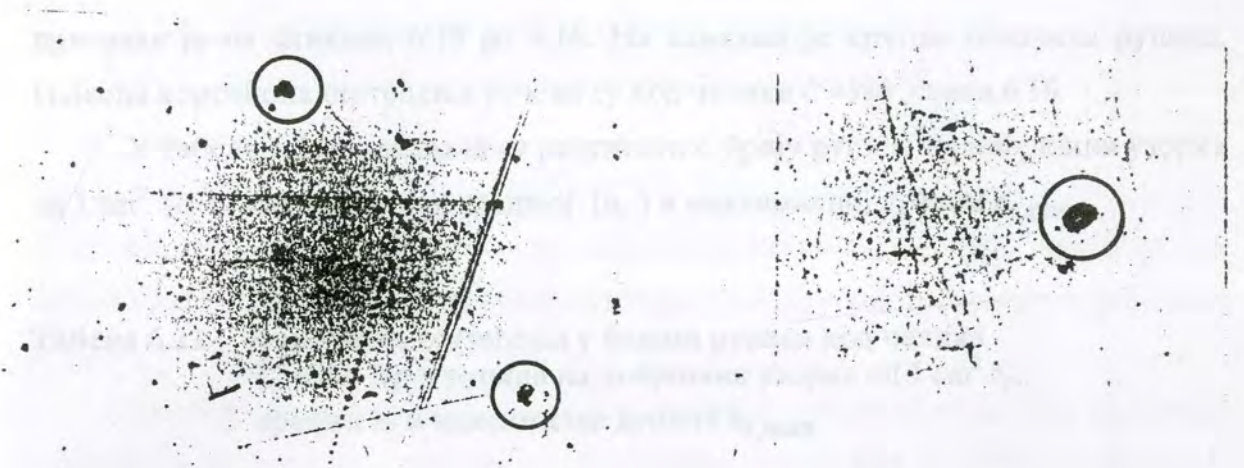
Резултати испитивања су приказани у табели 6.10.

Табела 6.10 Резултати мерења губитка масе узорка од нерђајућег челика, брзине корозије и смањења дебљине материјала у геотермалној води "Дебрц" при лабораторијским условима испитивања

Врста челика	Δm [mg cm ⁻²]	v_{kor} [mg m ⁻² h ⁻¹]	Δh [μ m/god]
Č 4580	0,081	0,59	0,66
Č 4572	0,100	0,73	0,81
Č 4574	0,094	0,69	0,77

На основу ових резултата може се констатовати да је брзина корозије занемарљиво мала, односно да нерђајући челик потпуно задовољава у погледу корозионе стабилности у геотермалној води "Дебрц".

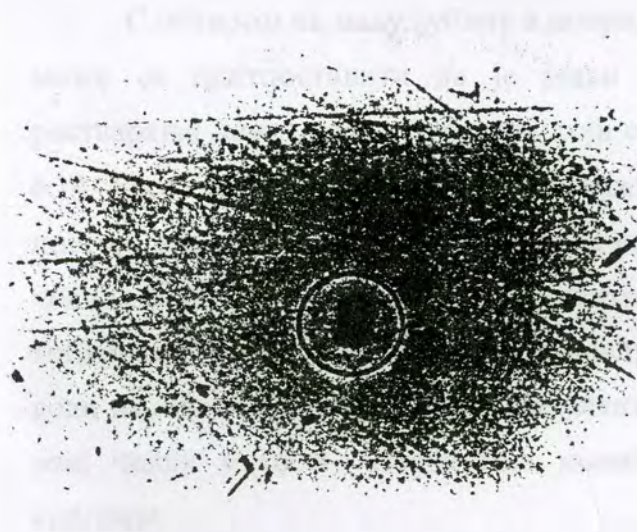
Проучавањем површине узорка од нерђајућих челика, уз помоћ металографског микроскопа, констатовано је да постоје корозиона оштећења у форми малих рупица. Карактеристичан изглед површине појединих челика



Испитивање	$\sigma_{0.2}$	$\sigma_{0.01}$	$\sigma_{0.001}$
Č 4574	8	2.8	7

Слика 6.14 Изглед површине челика Č4574 после испитивања, увећано 200 пута

Слика 6.15 Изглед површине челика Č 4572 после испитивања, увећано 200 пута



Слика 6.16 Изглед површине челика Č 4580, после испитивања, увећано 200 пута

приказан је на сликама 6.15 до 6.16. На сликама је кругом означена рупица. Највећа корозиона оштећења уочена су код челика Č 4580, слика 6.16.

У табели 6.11 приказани су резултати о броју рупица на површини узорка од 1 cm^2 (c_r), као и њиховој средњој (h_r) и максималној дубини $h_{r,max}$.

Табела 6.11 Корозиона оштећења у форми рупица код челика Č 4580. Број рупица на површини узорка од 1 cm^2 c_r , средња h_r и максимална дубини $h_{r,max}$

Врста челика	c_r [cm^{-2}]	h_r [μm]	$h_{r,max}$ [μm]
Č 4580	8	2,8	7
Č 4572	6	2,4	6
Č 4574	1,3	1,5	3

С обзиром на малу дубину и површину рупица, посебно код челика Č 4574, може се претпоставити да је један део оштећења настао као резултат растварања неметалних укључака који су присутни на површини челика, слика 6.14. Иако је изгубљена маса приближно једнака код све три врсте челика, постоји разлика у оштећењима која је евидентирана на површини узорка. Код челика Č 4580 и Č 4572 већа је концентрација и дубина рупица, па се на основу тога може извести закључак да највећу корозиону отпорност у геотермалној води има челик Č 4574. Овакав резултат је могао и да се очекује с обзиром да овај челик у свом саставу има молибден који повећава отпорност према корозији.

6.2.4 Испитивање утицаја геотермалне воде на одабране материјале у експлоатационим условима

На основу испитивања у лабораторијским условима изведени су закључци о корозионом понашању одабраних материјала у геотермалној води "Дебрц".

Истраживања у експлоатационим условима имала су за циљ да се испита понашање материјала у условима дуготрајног протицања геотермалне воде. У том циљу конструисана је посебна мерна инсталација која је монтирана на самом изворишту у Дебрцу и у којој су узорци метала били директно изложени деловању геотермалне воде. За испитивање су коришћени узорци од истих материјала који су испитани у лабораторијским условима, тј. нискоугљенични челик, сиво ливено гвожђе и нерђајући челик.

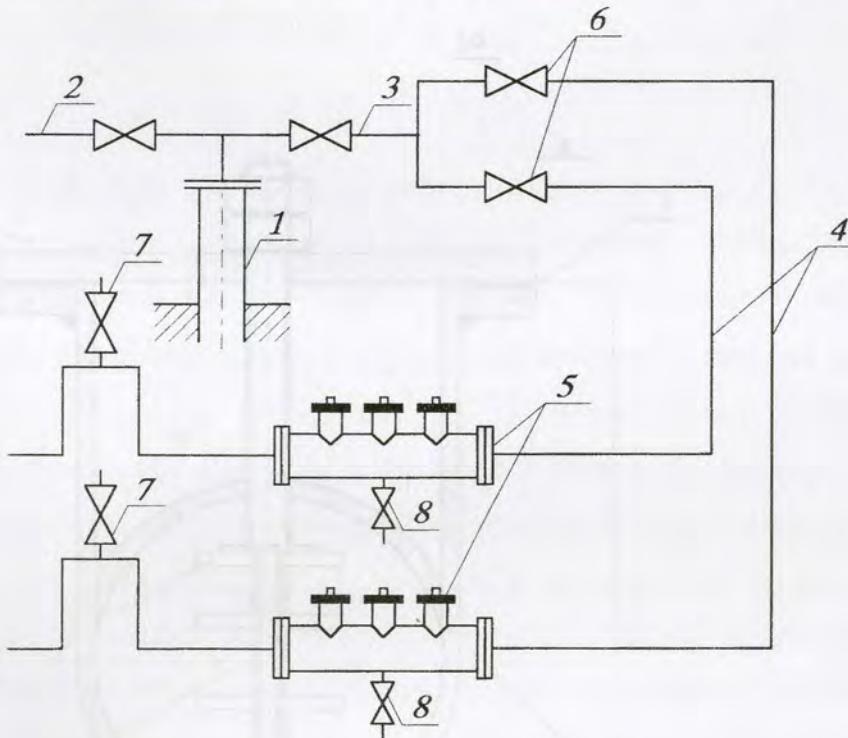
6.2.4.1 Опис мерне инсталације и општи услови испитивања

Испитивања су изведена помоћу индикаторске експлоатационе методе, која је за ову прилику прилагођена специфичним условима испитивања. Код ове методе узорци метала, који служе као индикатори корозионе активности средине са којом су у контакту, монтирају се на посебне носаче који се постављају на одређеним местима у инсталацији /41/.

У овом случају узорци су постављени непосредно поред геотермалне бушотине Дебрц. Коришћени су метални узорци од истих материјала као и за лабораторијска испитивања, тј. од челик \check{C} 4574, две врсте сивог ливеног гвожђа (перлит и ферит) и челика \check{C} .1213. Кроз мерну инсталацију је континуално протицала геотермална вода, а испитивања су изведена са две брзине струјања воде и то 0,5 m/s и 2 m/s.

На слици 6.17 приказана је шема мерне инсталације. Цев из геотермалне бушотине (1) пречника \varnothing 609 mm, има два прикључка за цевоводе DN 150. Са једаним од њих (2) геотермална вода се транспортује у постојећу подстаницу са

измењивачем топлоте одакле се разводи до грејних тела за загревање радних просторија. Други прикључак (3), који је био ван функције, искоришћен је за испитивања тако што је на њега је прикључена мерна инсталација. Она се састоји од два цевовода (4) унутрашњег пречника $\phi 80 \text{ mm}$, мерних сонди (5) и вентила (6,7 и 8). Узорци у облику плочица (сса $20 \times 30 \times 3 \text{ mm}$) од испитиваног материјала: челик Č 4574, две врсте сивог ливеног гвожђа (перлит и ферит) и челик Č.1213, смештају се у мерне сонде. Свака мерна сонда има по три носача металних узорака, а на сваком од њих смештено по по четири узорка, тако да је укупно било 24 узорка. Непосредно иза мерних сонди део цевовода је савијен у облику слова U, како би мерне сонде и испитивани узорци били потопљени све време испитивања. На цевоводима су постављени вентили за: регулисање брзине протицања геотермалне воде (6), одзрачивање (7) и пражњење (8).

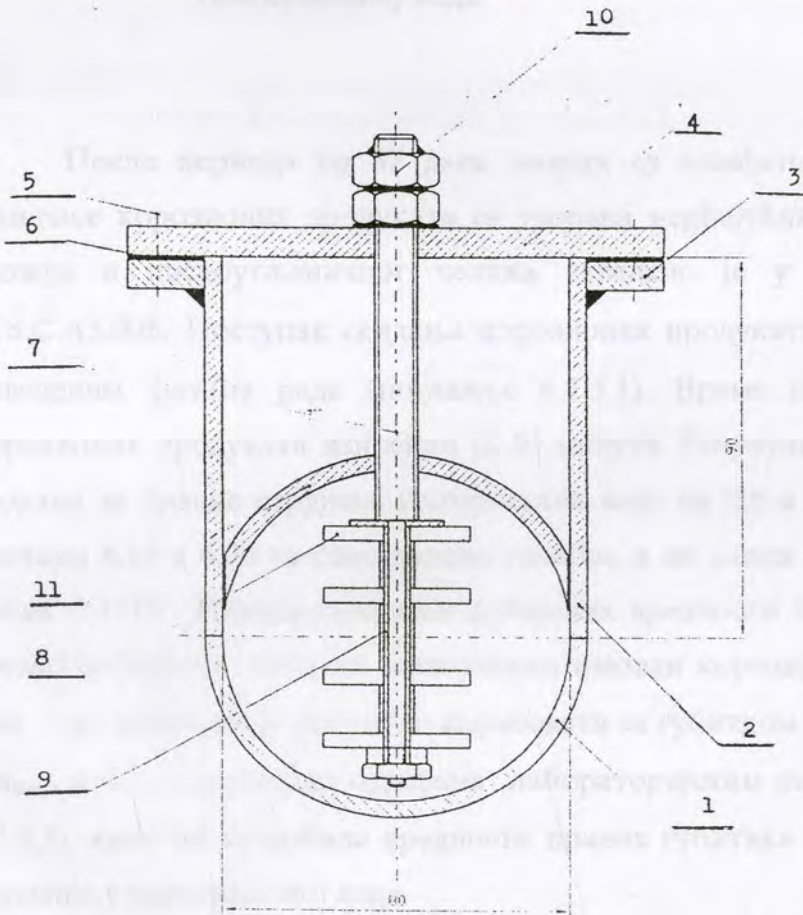


Легенда:

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------|
| 1. Геотермална бушотина | 5. Мерне сонде |
| 2. Цевовод DN150 за подстанциу | 6. Регулациони вентил |
| 3. Цевовод за испитну инсталацију | 7. Одзрачни вентил |
| 4. Цевовод $\phi 80 \text{ mm}$ | 8. Испустни вентил |

Слика 6.17 Шема мерне инсталације

Мерна сонда, чији је попречни пресек приказан на слици 6.18, израђена је тако што су на цев $\varnothing 80 \text{ mm}$ (1) вертикално заварена три комада цевних исечака истог пречника (2) са прирубницама (3), који су са горње стране затворене поклопцима (поз.4). Прирубница и поклопац су спојени вијцима (5), а између је постављена гума (6) због заптивавања. У мерну сонду је убачено навојно вретено (7), на чији су доњи део постављени метални узорци (8). Навојно вретено и метални узорци међусобно су изоловани тефлоном (9), тако да не постоји могућност електричног контакта. На горњем делу вретена, који се налази изнад поклопца, постављена су два вијка (10), који служе за подешавање положаја вретена. Цевни исечак (11) је обликован тако да може потпуно да затвори цев са горње стране што омогућава континуалано струјање воде кроз цев /53/.

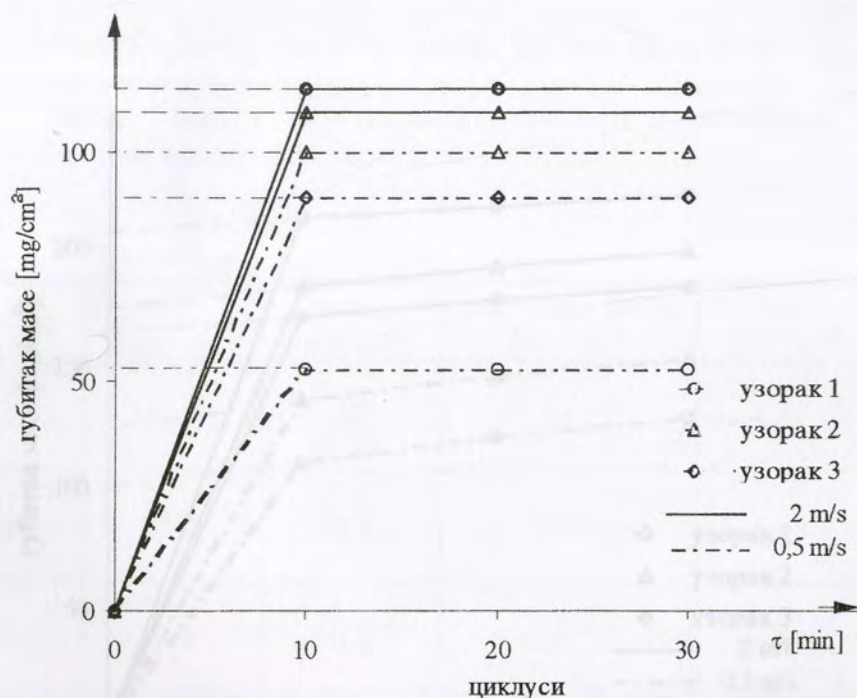


Слика 6.18 Поречни пресек мерне сонде са узорцима

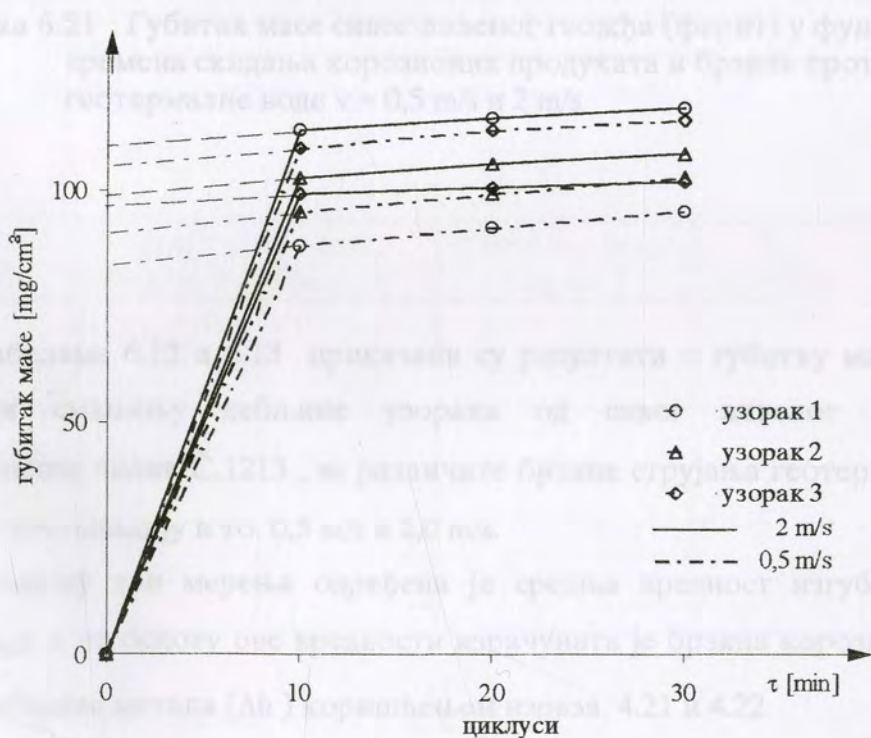
Пре испитивања сви узорци су припремљени на исти начин као и за лабораторијска испитивања (поглавље 6.2.3.1), тј. мокро су брушени силицијум-карбидним папиром финоће 150, 320 и 600, а затим полирани воденом суспензијом Al_2O_3 гранулације $1\mu m$. После полирања узорци су одмашћени етанолом у ултразвучном купатилу, а после сушења измерена им је маса на аналитичкој ваги и утврђен изглед површина помоћу металографског микроскопа. Узорци су постављени на доњи део вретена по одговарајућем распореду.

6.2.4.2 Резултати испитивања корозионе отпорности у геотермалној води

После периода од 57 дана узорци су извађени из геотермалне воде. Скидање корозионих продуката са узорака нерђајућих челика, сивог ливеног гвожђа и нискоугљеничног челика изведено је у складу са стандардом JUS.C.A5.005. Поступак скидања корозионих продуката изведен је у складу са наведеним фазама рада (поглавље 6.2.3.1). Време једног циклуса скидања корозионих продуката износило је 10 минута. Резултати мерења губитка масе узорака за брзине струјања геотермалне воде од 0,5 и 2,0 m/s приказани су на сликама 6.19 и 6.20 за сиво ливено гвожђе, а на слици 6.21 за нискоугљенични челик Š.1213. Екстраполацијом добијених вредности на ординатну осу (нулто време) добијен је губитак масе узорка изазван корозијом у геотермалној води Δm_0 . Ову вредност је потребно кориговати са губитком масе контролног узорка Δm_{kon} , која је претходно одређена лабораторијским испитивањима (поглавље 6.2.3.2), како би се добила вредности правих губитака масе узорка Δm услед корозије у геотермалној води.

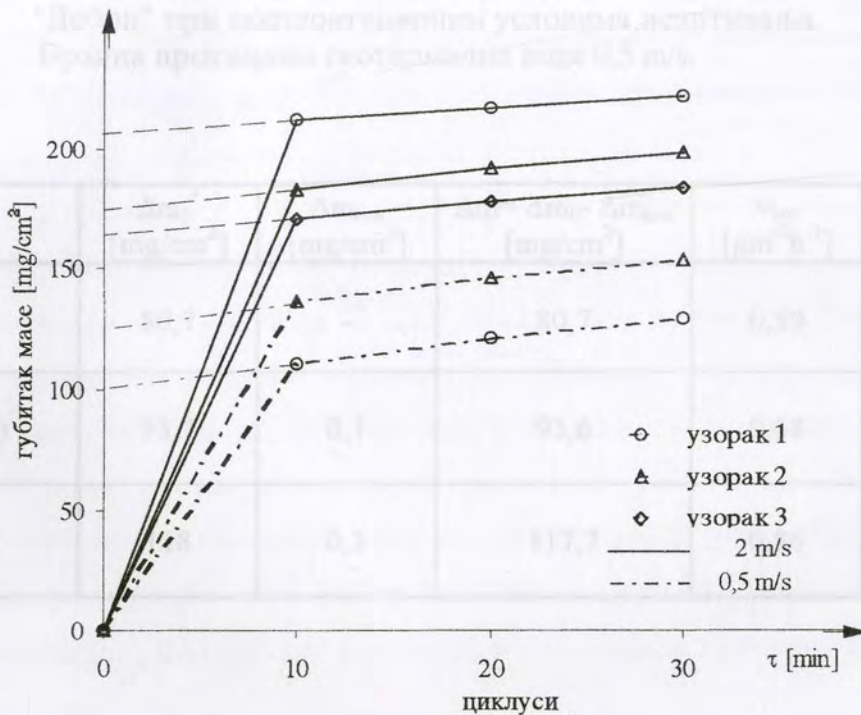


Слика 6.19 Губитак масе нискоугљеничног челика S.1213 у функцији времена уклањања корозионих продуката и брзине протицања воде $v = 0,5 \text{ m/s}$ и 2 m/s



Слика 6.20 Губитак масе сивог ливеног гвожђа (перлит) у функцији времена уклањања корозионих продуката и брзине протицања воде $v = 0,5 \text{ m/s}$ и 2 m/s

Табела 6.12. Резултати мерења губитка масе узорка од нискоугљеничног челика и сивог ливеног гвожђа, брзине корозије и смањења дебљине материјала у геотермалној води "Долина" три експериментална услова на испитивању. Брзина протока геотермалне воде 0,5 m/s.



Табела 6.13. Резултати мерења губитка масе узорка од нискоугљеничног челика и сивог ливеног гвожђа, брзине корозије и

Слика 6.21 Губитак масе сивог ливеног гвожђа (ферит) у функцији времена скидања корозионих продуката и брзине протицања геотермалне воде $v = 0,5 \text{ m/s}$ и 2 m/s

У Табелама 6.12 и 6.13 приказани су резултати о губитку масе, брзини корозије и смањењу дебљине узорка од сивог ливеног гвожђа и нискоугљенични челик $\check{C}.1213$, за различите брзине струјања геотермалне воде кроз мерну инсталацију и то $0,5 \text{ m/s}$ и $2,0 \text{ m/s}$.

На основу три мерења одређена је средња вредност изгубљене масе узорка (Δm_0), а на основу ове вредности израчуната је брзина корозије (v_{kor}) и смањење дебљине метала (Δh) коришћењем израза 4.21 и 4.22

Табела 6.12 Резултати мерења губитка масе узорака од нискоугљеничног челика и сивог ливеног гвожђа, брзина корозије и смањење дебљине материјала у геотермалној води "Дебрц" при експлоатационим условима испитивања.
Брзина протицања геотермалне воде 0,5 m/s.

Материјал	Δm_0^* [mg/cm ²]	Δm_{kon} [mg/cm ²]	$\Delta m = \Delta m_0 - \Delta m_{kon}$ [mg/cm ²]	v_{kor} [gm ⁻² h ⁻¹]	Δh^{**} [mm/год]
Č.1213	80,7	-	80,7	0,59	0,66
SL (перлит)	93,7	0,1	93,6	0,68	0,76
SL (ферит)	118	0,3	117,7	0,86	0,96

Табела 6.13 Резултати мерења губитка масе узорака од нискоугљеничног челика и сивог ливеног гвожђа, брзина корозије и смањење дебљине материјала у геотермалној води "Дебрц" при експлоатационим условима испитивања.
Брзина протицања геотермалне воде 2 m/s

Материјал	Δm_0^* [mg/cm ²]	Δm_{kon} [mg/cm ²]	$\Delta m = \Delta m_0 - \Delta m_{kon}$ [mg/cm ²]	v_{kor} [gm ⁻² h ⁻¹]	Δh^{**} [mm/год]
Č.1213	111	-	111	0,81	0,9
SL (перлит)	101,3	0,1	101,2	0,74	0,9
SL (ферит)	180,3	0,3	180	1,32	1,6

* Средња вредност губитка масе за три узорка

** $\rho = 7,86$ [gcm⁻³] за Č.1213 и $\rho = 7,20$ [gcm⁻³] за SL

На основу резултата из табела 6.12 и 6.13 може се констатовати да са порастом брзине протицања геотермалне воде кроз мерну инсталацију расте и брзина корозије материјала. За \check{C} 1213 смањење дебљине материјала Δh износи 0,66 односно 0,9 [mm/god] када брзина протицања геотермалне воде износи 0,5 односно 2 m/s. За сивог ливено гвожђе(перлит) Δh износи 0,76 односно 0,9 [mm/god], а за сиво ливено гвожђе (ферит) 0,96 односно 1,6 [mm/god] када је брзина протицања геотермалне воде 0,5 односно 2 m/s. На основу ових резултата може се закључити да \check{C} 1213 и сиво ливено гвожђе (перлит) нису погодни за примену у геотермалном систему "Дебрц" с обзиром да је код њих брзина корозије од 0,66 до 0,9 [mm/god] у зависности од брзине протицања геотермалне воде, па на основу критеријума из табеле 4.2 /48/ спадају у категорију материјала погодних само за краткотрајну употребу. Код сивог ливеног гвожђа (ферит) ситуација је још неповољнија јер Δh износи 0,96 односно 1,6 [mm/god] тако да овај материјал по наведеном критеријуму из табеле 4.2 не задовољава ¹⁾.

Код нерђајућег челика констатовано је врло мало смањење масе узорка после извршеног поступка за уклањање корозионих продуката. У табелама 6.14 и 6.15 дата је средња вредности губитка масе узорка од нерђајућег челика по јединици површине, брзина корозије и смањење дебљине узорка у зависности од брзине протицања геотермалне воде кроз испитну инсталацију. На основу добијених резултата, приказаних у табелама 6.14 и 6.15, може се констатовати да је брзина корозије нерђајућег челика \check{C} 4572 у геотермалној води "Дебрц" врло мала, тако да овај материјал у потпуности задовољава у погледу отпорности воде

¹⁾ На основу истраживања која су обављена у Radian's Materials Sciences Laboratory, Texas, U.S.A. /33/ констатовано је да брзина равномерне корозије угљеничног челика у геотермалној води која по својим својствима спада у воду средњег нивоа минерализације, слабо је алкална, има температуру 40 - 90°C и нема додатног садржаја кисеоника из ваздуха, износи 0,1-0,5 mm/god. и често је праћена јаким питингом. Међутим, утврђено је да повећан садржај кисеоника у геотермалној води услед аерације при условима турбулентног струјања повећава брзину равномерне корозије за 4 до 15 пута и обично изазива јак питинг. Код грејних система на Исланду цеви од угљеничног челика су углавном успешно коришћене, међутим само код система где је константно додаван садржај од 10 ppm (1 ppm = 1 [mg/l]) натријум сулфата у циљу уклањања кисеоника из геотермалне воде.

према корозији. Поређењем резултата за две брзине протицања геотермалне уочава се да је брзина корозије мања када је брзина протицања већа што није у складу са резултатима добијеним за материјале Č 1213 и SL. Међутим измерене разлике губитка масе узорака су врло мале и налазе се на граници осетљивости аналитичке ваге, па се овакав резултат може објаснити грешком у мерењу. Имајући ово у виду може се констатовати да брзина протицања геотермалне воде кроз мерну инсталацију нема значајнији утицај на брзину корозије челика Č 4572.

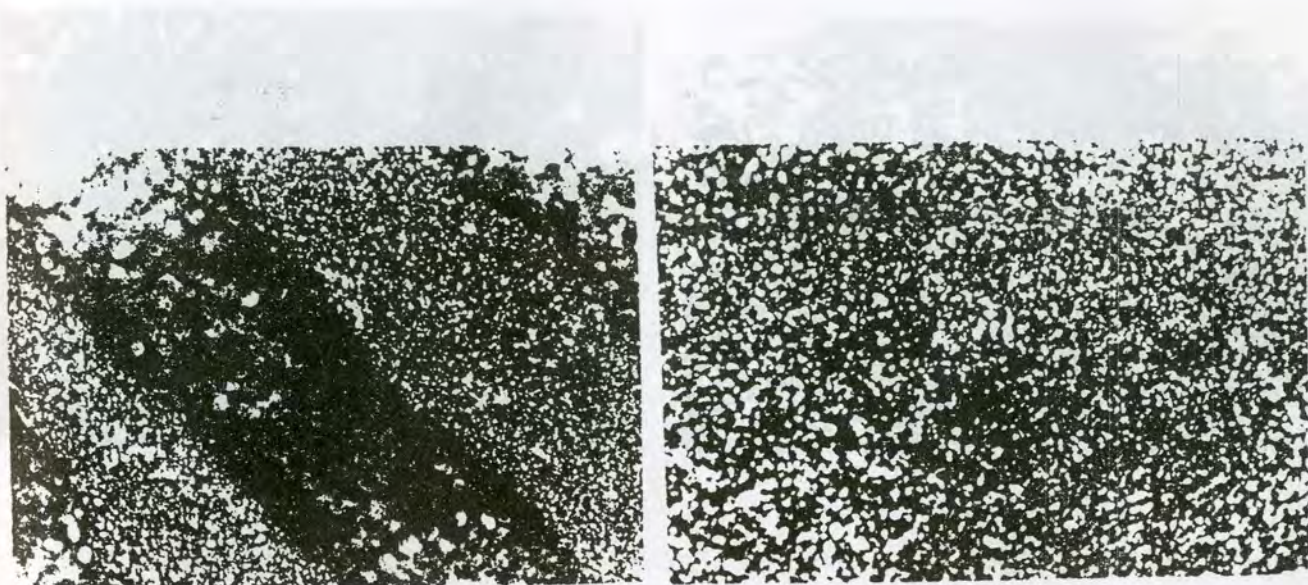
Табела 6.14 Губитак масе, брзина корозије и смањење дебљине узорка од нерђајућег челика Č 4572. Брзина протицања геотермалне воде 0,5 m/s

Врста челика	Δm_0 [mg/cm ²]	v_{kor} [mg m ⁻² h ⁻¹]	Δh [μm/god]
Č 4572	0,076	0,059	0,06

Табела 6.15 Губитак масе, брзина корозије и смањење дебљине узорка од нерђајућег челика Č 4572. Брзина протицања геотермалне воде 2 m/s

Врста челика	Δm_0 [mg/cm ²]	v_{kor} [mg m ⁻² h ⁻¹]	Δh [μm/god]
Č 4572	0,066	0,048	0,053

На сликама 6.22 до 6.27 приказан је карактеристичан изглед површина металних узорака после уклањања корозионих продуката. Фотографије су израђене помоћу металографског микроскопа.



a)

b)

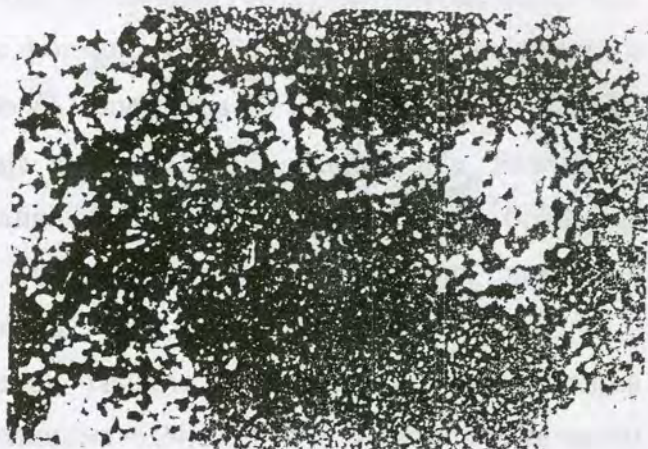
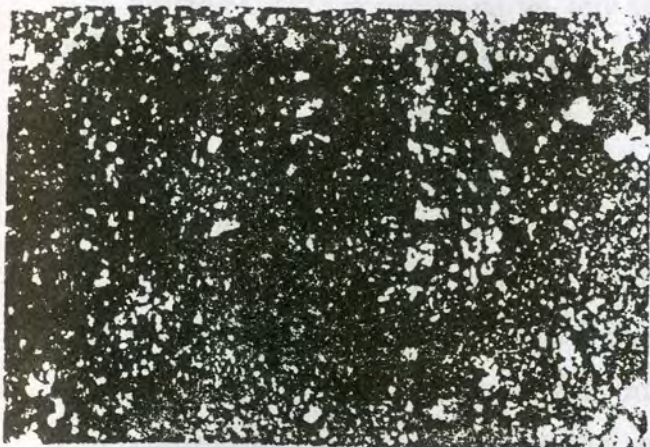
Слика 6.22 Изглед површине узорка од нискоугљеничног челика Š.1213 после испитивања, увећано 100 пута: а) $v=0,5$ m/s, б) $v = 2$ m/s



a)

b)

Слика 6.23 Попречни пресек узорка нискоугљеничног челика Š.1213 после испитивања у геотермалној води, увећано 100 пута: а) $v = 0,5$ m/s, б) 2 m/s.



Слика 6.24 Изглед површине сивог ливеног гвожђа (перлит) после испитивања, увећано 100 пута

Слика 6.25 Изглед површине сивог ливеног гвожђа (ферит) после испитивања, увећано 100 пута



Слика 6.26 Попречни пресек сивог ливеног гвожђа (ферит) после испитивања, $v=2\text{m/s}$, увећано 100 пута



Слика 6.27 Изглед површине нерђајућег челика Č 4572 после испитивања, $v=2\text{m/s}$, увећано 200 пута

На сликама 6.22 а) и 6.23 а) се запажа да је корозија нискоугљеничног челика $\check{C}.1213$ неравномерна при брзини протицања геотермалне воде од 0,5 m/s. У смеру протицања геотермалне воде формирају се бразде чија дубина износи и до 100 μm . На сликама 6.22b и 6.23b се запажа да је при брзини протицања геотермалне воде од 2 m/s корозија челика $\check{C}.1213$ равномерна. Разлике у корозионом оштећењу узорака челика $\check{C}.1213$ при различитим брзинама протицања воде вероватно треба приписати разлици њихових локалних структура насталих у процесу израде цеви.

Код узорака од сивог ливеног гвожђа се уочавају неравномерна корозиона оштећења, приказано на сликама 6.24, 6.25 и 6.26, при различитим брзинама протицања геотермалне воде.

Детаљним проучавањем површина узорака од нерђајућег челика $\check{C} 4572$ уз помоћ металографског микроскопа констатована су корозиона оштећења у форми рупица, слика 6.27. У табели 6.16, приказани су резултати одређивања густине рупица (c_p), као и њихове средње (h_s) и максималне дубине (h_{max}).

Табела 6.16. Густина рупица, средња и максимална дубина код нерђајућег челика $\check{C} 4572$. Брзина протицања воде 2 m/s.

Врста челика	c_p (pit/cm ²)	h_s (μm)	h_{max} (μm)
$\check{C} 4572$	11,4	3,7	10

Код овог типа челика није констатовано значајније повећања броја и дубине корозионих оштећења (рупица) када је брзина протицања геотермалне воде кроз инсталацију повећана са 0,5 на 2 m/s.

6.2.4.3 Закључци о корозионом понашању конструкционих материјала у геотермалној води "Дебрц" на основу лабораторијских и експлоатационих испитивања

На основу испитивања крозионог понашања конструкционих материјала: Č 1213 , сивог ливеног гвожђа (узорци од перлита и ферита) и нерђајућег челика Č 4572 у лабораторијским и експлоатационим условима у геотермалној в ди "Дебрц" може се констатовати следеће:

- Брзина корозије сивог ливеног гвожђа и нискоугљеничног челика Č.1213 значајно се повећава са повећањем брзине протицања геотермалне воде
- Код нерђајућег челика Č4572 није уочена значајнија промена брзине корозије у зависности од брзине протицања геотермалне воде кроз мерну инсталацију.
- При лабораторијским условима испитивања и када вода мирује брзина корозије односно смањење дебљине узорка од сивог ливеног гвожђа Δh је мало и износи око 0,03 mm/god. У експлоатационим условима испитивања и при брзини протицања геотермалне воде кроз мерну инсталацију од 0,5 m/s Δh је износило 0,96 mm/god, односно порасло је за око 30 пута, док је при брзини геотермалне воде од 2 m/s Δh порасло за око 50 пута у односу на брзину корозије при лабораторијским условима испитивања. Слична је ситуација и са нискоугљеничним челиком Č.1213 код кога је констатована већа брзина смањења дебљине узорка за 40 односно за око 56 пута у односу на лабораторијске услове испитивања.
- Добијени резултати наводе на закључак да се реална слика о корзионом понашању металних материјала у геотермалним грејним системима може добити само у условима дуготрајног протицања воде, тј. у експлоатационим условима. Континуалним протицањем геотермалне воде преко металних површина стално се доводе у додир нове количине корозионих агенаса у првом реду кисеоника, водоник-сулфида и угљен-диоксида.
- У експерименталном раду при поступку скидању корозионих продуката помоћу раствора ЈУС С.А5.005, утврђено је да корозиони продукти имају црну боју и карактеристичан мириса трулог јајета, што указује на присуство водоник-сулфида.

- На интензитет корозије у експлоатационим условима рада може да утиче и одвајање делова наталоженог слоја корозионих продуката од металних површина због чега тај део материјала остаје незаштићен и изложен је дејству корозионих агенаса.
- С обзиром на испољену склоност сивог ливеног гвожђа и нискоугљеничног челика \check{C} .1213 према корозији у геотермалној води није препоручљиво да се од ових материјала израђују елементи грејног система који су у директном контакту са геотермалном водом. Брзина корозије сивог ливеног гвожђа (ферит) у геотермалној води при брзини протицања воде од 2 m/s износи $1,32 \text{ gm}^{-2}\text{h}^{-1}$ што значи да би се дебљина елемената израђених од овог материјала смањила за $1,6 \text{ mm}$ на годину, односно да би за неколико година експлоатације дошло до њихове перфорације. Ови метали могу се користити једино у секундарном кругу грејног система са измењивачем топлоте, где се као носилац топлоте користи хемијски припремљена вода.
- Нерђајући челици су се показали корозионо отпорним према геотермалној води у свим условима испитивања. Узорак челика \check{C} 4580 показао је задовољавајућу корозиону отпорност. Највећу отпорност и практично потпуну корозиону стабилност испољио је челик \check{C} 4574. На овом челику није уочене корозоне рупице, већ само локално растварање неметалних укључака на површини.
- С обзиром на велику корозиону отпорност челик \check{C} 4574 се препоручује за израду елемената примарног кола и самог измењивача топлоте у грејном систему са испитаном геотермалном водом.

6.3 Експериментално одређивање отпора провођењу топлоте услед запрљања у геотермалним грејним системима

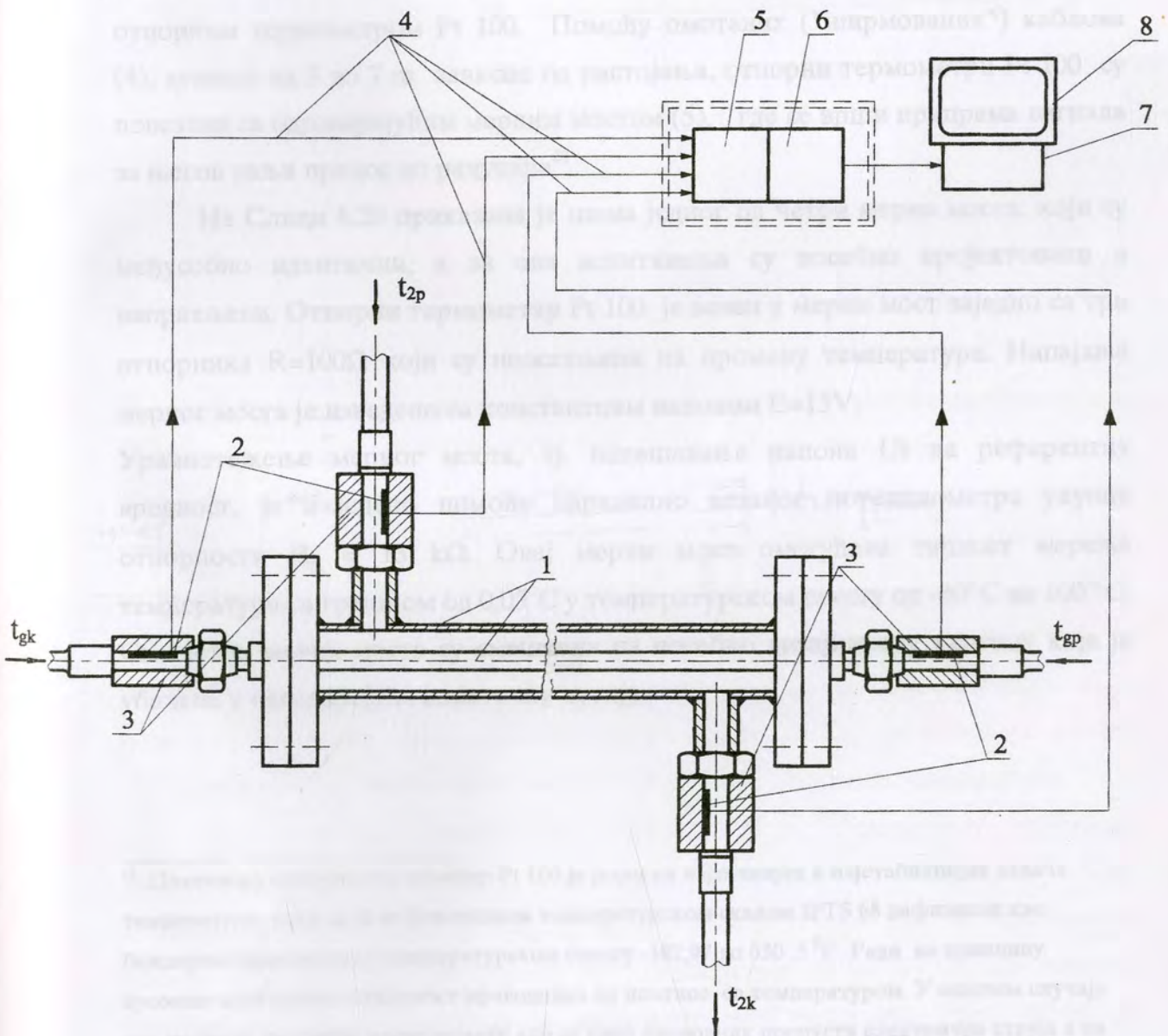
Испитивање запрљања, односно промене отпора провођењу топлоте услед запрљања у геотермалним грејним системима изведено је помоћу одговарајуће мерне инсталације. Она се састојала од измењивача топлоте систем цев-у-цев и система за мерење и аквизицију температура у дужем временском периоду. Испитивања су обављена у експлоатационим условима са геотермалном водом из бушотине у Дебрцу. Извршене су две серије испитивања при различитим радним условима а свако испитивање је трајало око 90 дана. На основу резултата испитивања утврђена је промена коефицијента пролаза топлоте и укупног отпора провођењу топлоте у функцији времена.

6.3.1 Опис мерне инсталације

На слици 6.28 дат је шематски приказ мерне инсталације на којој су вршена испитивања. Кроз измењивач топлоте типа цев-у-цев са супротносмерним током флуида (1) протицали су топла геотермална вода (кроз унутрашњу цев) и хладна вода из локалног водовода (кроз ануларни простор). Ради утврђивања топлотних перформанси измењивача мерене су температуре геотермалне и водоводске воде на улазу (t_{gp} и t_{2p}) и излазу (t_{gk} и t_{2k}) из измењивача топлоте, као и протоци воде кроз унутрашњу цев (V_g) и ануларни простор (V_2).

Температуре су мерене помоћу система за мерење и аквизицију чији су основни елементи: 4 платинска отпорна термометра Pt 100 (2) смештена у цевне прикључке (3), затим каблови (4) помоћу којих су отпорни термометри повезани са 4 мерна моста (5), прикључни модул ED 1770-AP (6), модул за аквизицију и управљање ED2000 (7) и РС рачунар (8). Цео систем за аквизицију и мерење је подржан са оригиналним софтвером.

Измењивач топлоте (1) је израђен од спољашње цеви DN 50 ($\phi 60,3/54,5 \text{ mm}$) и од унутрашње цеви пречника $\phi 18/14 \text{ mm}$. Материјал обе цеви је Č 1214 . Активна дужина измењивача топлоте, тј. дужина на којој се врши размена топлоте између топлијег и хладније воде је 2,85 m. Помоћу цевних прикључака (3) измењивач топлоте је повезан са цевоводом за геотермалну воду, односно са локалним водоводом.



Слика 6.28 Шематски приказ мерне инсталације

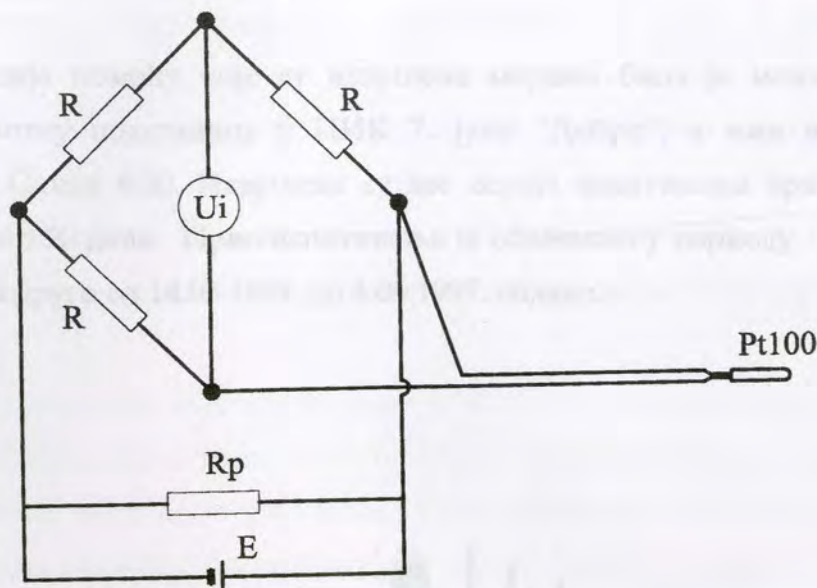
У цевне прикључке су постављени отпорни термометри тип Pt 100¹⁾ (2), димензија $\phi 3 \times 30$ mm, тако што су убачени у жљеб одговарајућих димензија са спољне стране цевног прикључка, фиксирани термопастом и обавијени термоизолационим материјалом, произвођач Armaflex AF, дебљине 10 mm. На овај начин је постигнуто да температура коју мери отпорни термометар одговара температури воде у цевима. На крајеве цевних прикључака су уграђене навојне спојнице ("холендери") тако да је омогућена лака монтажа и демонтажа комплетног цевног прикључка заједно са отпорним термометром Pt 100. Помоћу омотаних ("ширмованих") каблова (4), дужине од 3 до 7 m зависно од растојања, отпорни термометри Pt 100 су повезани са одговарајућим мерним мостом (5), где се врши припрема сигнала за његов даљи пренос до рачунара²⁾.

На Слици 6.29 приказана је шема једног од четири мерна моста, који су међусобно идентични, а за ова испитивања су посебно пројектовани и направљени. Отпорни термометар Pt 100 је везан у мерни мост заједно са три отпорника $R=100\Omega$ који су неосетљиви на промену температуре. Напајања мерног моста је изведено са константним напоном $E=15V$.

Уравнотежење мерног моста, тј. подешавање напона U_i на референтну вредност, је изведено помоћу паралелно везаног потенциометра укупне отпорности $R_p = 13 \text{ k}\Omega$. Овај мерни мост омогућава тачност мерења температура са грешком од $0,05^\circ\text{C}$ у температурском опсегу од -80°C до 100°C . Сва четири мерна моста су смештена на посебно дизајнирану картицу која је убачена у одговарајуће пластичну кутију.

¹⁾ Платински отпорни термометар Pt 100 је један од најтачнијих и најстабилнијих давача температуре, тако да је међународном температурском скалом IPTS 68 дефинисан као баждарни термометар у температурском опсегу $-182,97$ до $630,5^\circ\text{C}$. Ради на принципу промене електричне отпорност проводника од платине са температуром. У општем случају ову промену је могуће регистровати ако се кроз проводник пропусти електрична струја а на крајевима проводника мери напон.

²⁾ Уобичајени начин за мерење температура помоћу електроотпорних термометара типа Pt 100 је помоћу Винтстоновог моста.



Слика 6.29 Шема мерног моста

У истој кутији у којој се налази картица са мерним мостовима смештен је прикључни модул ED 1770-AP (6), произвођач "Electronic Design" из Београда. Овај модул преноси сигнал од мерних мостова до модула за управљање и аквизицију ED 2000 (7), произвођач "Electronic Design"/54/, који се уграђује директно у слот РС рачунара (8). Повезивање модула ED 1770 и ED2000 је остварено са ширмованим каблом.

Функција модула ED 2000 је да врши претварање аналогног сигнала, који долази из мерног моста, у дигитални тако да РС рачунар уз помоћ одговарајућег софтвера може да врши аквизицију и мерење температура.

Пре почетка испитивања извршено је баждарење отпорних термометара Pt 100 у склопу целог система за мерење и аквизицију. Сви отпорни термометри су избаждарени појединачно тако што су урањани у посуду са водом која је грејана од температуре 0 до 50 °C. За мерење температуре воде коришћен је лабораторијски баждарни термометар са живом чија је тачност читавања 0,1 °C.

Протоци радних флуида кроз унутрашњу цев (V_g) и ануларни простор (V_2) су мерени волуметријски.

6.3.2 Општи услови испитивања

Инсталација помоћу које су извршена мерења била је монтирана у постојећу топлотну подстанциу у ПИК 7. јули "Дебрц", а њен изглед је приказан је на Слици 6.30. Извршене су две серије испитивања при чему је свака трајала око 90 дана. Прво испитивање је обављено у периоду 10.9.1996 до 11.12. 1996., а друго од 14.03.1997. до 4.06.1997. године.



Слика 6.30 Изглед мерне инсталације

Цео систем за аквизицију и праћење температура је био подешен тако да прати промену 4 карактеристичне температуре на улазу и излазу из измењивача топлоте (t_{gp} , t_{gk} , t_{2p} и t_{2k}) у континуитету и региструје њихове вредности на сваких 5 минута. На овај начин је добијено преко 20 000 резултата мерења за сваку серију испитивања. Ови резултати су регистровани у базу података РС рачунара, а затим снимани на дискете чиме је омогућена њихова даља обрада и анализа помоћу рачунара и одговарајућих софтверских програма.

Брзина протицања хладне водоводске воде је за обе серије испитивања имала приближно исту вредност и износила је $v_2 = 0,55 - 0,6$ m/s. Брзина протицања топле геотермалне воде кроз унутрашњу цев је мењана тако да је у првој серији испитивања износила $v_g = 0,56$ m/s, а у другој $v_g = 0,9 - 1$ m/s.

Током испитивања долазило је до повремених поремећаја у снабдевању водом и електричном енергијом, што је утицало на брзину протицања воде кроз мерну инсталацију, али је са регулисањем протока покушавано, колико је то било могуће, да брзина протицања воде буде константна током испитивања. Поред тога, цевовод у топлотној подстаници из кога је узимана геотермална вода за напајање мерне инсталације, био је повезан са постојећим системом грејања у ПИК 7. јули тако да је његово укључивање изазивало промену протока и температуре геотермалне воде за напајање мерне инсталације.

6.3.3 Обрада резултата испитивања

Од укупног броја резултата добијених овим испитивањима за анализу су узети у обзир само они који су задовољили одређене критеријуме.

Први критеријум на основу кога је извршена селекција резултата испитивања је био да измењивач топлоте ради у радном режиму блиском стационарним. Стационарност радног режима се може проценити на основу израза:

$$\Delta_{st} = \frac{\sqrt{(Q_g - Q_{sr})^2 + (Q_2 - Q_{sr})^2}}{Q_{sr}} \quad (6.5)$$

где су:

Δ_{st} - стандардна девијација топлотне снаге

Q_g [W] - топлотна снага измењивача топлоте за топлији флуид (геотермална вода)

$$Q_g = \dot{m}_g c_{pg} (t_{gp} - t_{gk})$$

Q_2 [W] - топлотна снага измењивача топлоте за хладнији флуид (водоводска вода)

$$Q_2 = m_2 c_{p2} (t_{2p} - t_{2k})$$

Q_{sr} [W] - средња топлотна снага измењивача топлоте

$$Q_{sr} = \frac{1}{2} (Q_g + Q_2)$$

\dot{m}_g [kg/s] - масени проток геотермалне воде

$$\dot{m}_g = V_g \rho_g$$

V_g [m³/h] - запремински проток геотермалне воде

ρ_g [m³/kg] - густина геотермалне воде

c_{pg} [J/kgs] - специфични масени топлотни капацитет геотермалне воде

t_{gp} [°C] - температура геотермалне воде на улазу у измењивач топлоте

t_{gk} [°C] - температура геотермалне воде на излазу из измењивача топлоте

\dot{m}_2 [kg/s] - масени проток водоводске воде

$$\dot{m}_2 = V_2 \rho_2$$

V_2 [m³/h] - запремински проток водоводске воде

ρ_2 [kg/m³] - густина водоводске воде

c_{p2} [J/kgs] - специфични масени топлотни капацитет водоводске воде

t_{2p} [°C] - температура водоводске воде на улазу у измењивач топлоте

t_{2k} [°C] - температура водоводске воде на излазу из измењивача топлоте

Коефицијент пролаза топлоте за измењивач у току периода испитивања τ (s) се одређује на основу резултата мерења и помоћу израза:

$$k_{\tau} = \frac{Q}{\Delta t_{\ln} S_{iz}} \quad (6.6)$$

где су:

$Q[W]$ - топлотна снага измењивача

$\Delta t_{\ln} [^{\circ}C]$ - средња логаритамска температурска разлика

$$\Delta t_{\ln} = \frac{(t_{gp} - t_{2k}) - (t_{gk} - t_{2p})}{\ln \frac{(t_{gp} - t_{2k})}{(t_{gk} - t_{2p})}} \quad (6.7)$$

$S_{iz} [m^2]$ - активна површина измењивача

Собзиром да се коефицијент пролаза топлоте одређује на основу измерених вредности температура (t_{gp} , t_{gk} , t_{2p} и t_{2k}) и протока (\dot{m}_g и \dot{m}_2) јасно је да ће у зависности од грешке при мерењу ових величина зависити и вредност коефицијента пролаза топлоте тако да он може да износи:

$$k_{g,max} = \frac{Q_{g,max}}{\Delta t_{\ln,min} S_{iz}} \quad (6.8)$$

$$k_{g,min} = \frac{Q_{g,min}}{\Delta t_{\ln,max} S_{iz}} \quad (6.9)$$

$$k_{2,max} = \frac{Q_{2,max}}{\Delta t_{\ln,min} S_{iz}} \quad (6.10)$$

$$k_{2,min} = \frac{Q_{2,min}}{\Delta t_{\ln,max} S_{iz}} \quad (6.11)$$

где су:

$Q_{g,max}$ [W] - максимална вредност топлотне снаге измењивача са стране геотермалне воде

$$Q_{g,max} = (\dot{m}_g + \Delta\dot{m}_g) c_{pg} (t_{gp} - t_{gk} + 2\Delta t) \quad (6.11)$$

$Q_{g,min}$ [W] - минимална вредност топлотне снаге измењивача са стране геотермалне воде

$$Q_{g,min} = (\dot{m}_g - \Delta\dot{m}_g) c_{pg} (t_{gp} - t_{gk} - 2\Delta t)$$

$Q_{2,max}$ [W] - максимална вредност топлотне снаге измењивача са стране водоводске воде

$$Q_{2,max} = (\dot{m}_2 + \Delta\dot{m}_2) c_{p2} (t_{2p} - t_{2k} + 2\Delta t)$$

$Q_{2,min}$ [W] - минимална вредност топлотне снаге измењивача са стране водоводске воде

$$Q_{2,min} = (\dot{m}_2 - \Delta\dot{m}_2) c_{p2} (t_{2p} - t_{2k} - 2\Delta t)$$

$\Delta\dot{m}_g$ [kg/s] - апсолутна грешка мерења протока геотермалне воде

$\Delta\dot{m}_2$ [kg/s] - апсолутна грешка мерења протока водоводске воде

Δt [°C] - апсолутна грешка мерења температуре

$\Delta t_{ln,min}$ [°C] - минимална вредност средње логаритамске температурске разлике

$$\Delta t_{ln,min} = \frac{(t_{gp} - t_{2k} - 2\Delta t) - (t_{gk} - t_{2p} - 2\Delta t)}{\ln \frac{(t_{gp} - t_{2k} - 2\Delta t)}{(t_{gk} - t_{2p} - 2\Delta t)}} \quad (6.12)$$

$\Delta t_{ln,max}$ [°C] - максимална вредност средње логаритамске температурске разлике

$$\Delta t_{ln,max} = \frac{(t_{gp} - t_{2k} + 2\Delta t) - (t_{gk} - t_{2p} + 2\Delta t)}{\ln \frac{(t_{gp} - t_{2k} + 2\Delta t)}{(t_{gk} - t_{2p} + 2\Delta t)}} \quad (6.13)$$

Вредност коефицијента пролаза топлоте измењивача у току периода испитивања τ може се одредити као средња вредност t_j :

$$k_{\tau} = k_{sr} = \frac{1}{4} (k_{g,\max} + k_{g,\min} + k_{2,\max} + k_{2,\min}) \quad (6.14)$$

док је дисперзија или максимална релативна грешка:

$$\Delta k_{\tau} = \frac{\Delta k_{sr}}{k_{sr}} = \sqrt{\frac{(k_{sr} - k_{g,\max})^2 + (k_{sr} - k_{g,\min})^2 + (k_{sr} - k_{2,\max})^2 + (k_{sr} - k_{2,\min})^2}{3k_{sr}^2}} \quad (6.15)$$

У даљем раду је усвојено да апсолутна грешка при мерењу температура износи $\Delta t = 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, а релативна грешка мерења протока:

$$\frac{\Delta m_g}{m_g} = \frac{\Delta m_2}{m_2} = 3\%$$

На основу вредности коефицијената пролаза топлоте на почетку испитивања k_0 (за почетни временски тренутак, $\tau = 0$) и у току испитивања k (за произвољни тренутак времена) може се одредити промена укупног отпора провођењу топлоте у функцији времена испитивања τ помоћу израза 4.9 који у овом случају гласи:

$$R_{uk} = \frac{1}{k} - \frac{1}{k_0} \quad (6.20)$$

где су:

$R_{uk} [\text{m}^2\text{K/W}]$ - укупни отпор провођењу топлоте услед запрљања површине за размену топлоте

$k_0 [\text{W/m}^2\text{K}]$ - вредност коефицијента пролаза топлоте за незапрљан измењивач, тј. на почетку периода испитивања ($\tau = 0$)

k [W/m²K] - вредност коефицијента пролаза топлоте за измењивач
после времена τ

За приказивање резултата испитивања у аналитичком облику, односно у облику функционалне зависности између две променљиве величине, коришћена је метод најмањих квадрата. Квалитет добијене функционалне зависности $y^c = y(x)$ се процењује помоћу статистичких показатеља:

корелационог односа:

$$\Theta = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^c)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{sr})^2} \right]^{0,5} \quad (6.21)$$

и средњег квадратног одступања:

$$\Delta_{sr} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{(y_i - y_i^c)^2}{y_i} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (6.22)$$

где су:

x_i - измерена вредност независно променљиве при i -том експерименту

y_i - измерена вредност зависно променљиве при i -том експерименту

n - број уређених парова ($x_i; y_i$), односно број експеримената

y_i^c - израчуната вредност зависно променљиве за измерену вредност x_i

y_{sr} - средња вредност зависно променљиве y_i за n експерименталних вредности

$$y_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$$

6.3.4 Приказ резултата испитивања

Испитивања су извршена у две серије мерења. За анализу отпора провођењу топлоте услед запрљања су коришћени следећи критеријуми за одабир резултата мерења:

- $\Delta_{st} < 10\%$;
- $(\Delta k/k) < 30\%$

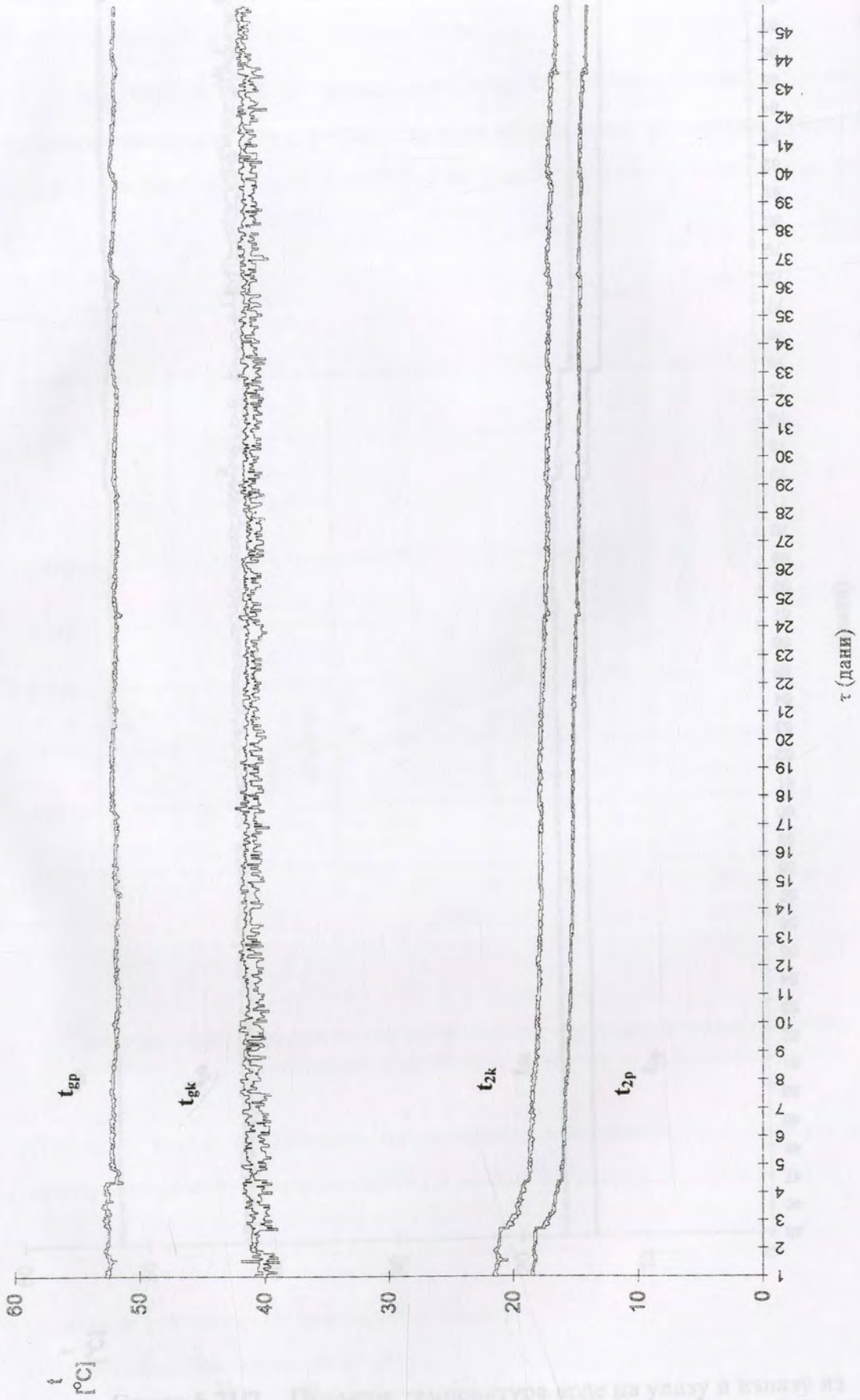
Овако изабрани резултати се могу сматрати меродавним за утврђивање квантитативних зависности изложених у даљем тексту.

У првој серији испитивања брзине протицања воде кроз измењивач топлоте су биле:

- за геотермалну воду 0,56 m/s
- за водоводску воду 1 m/s

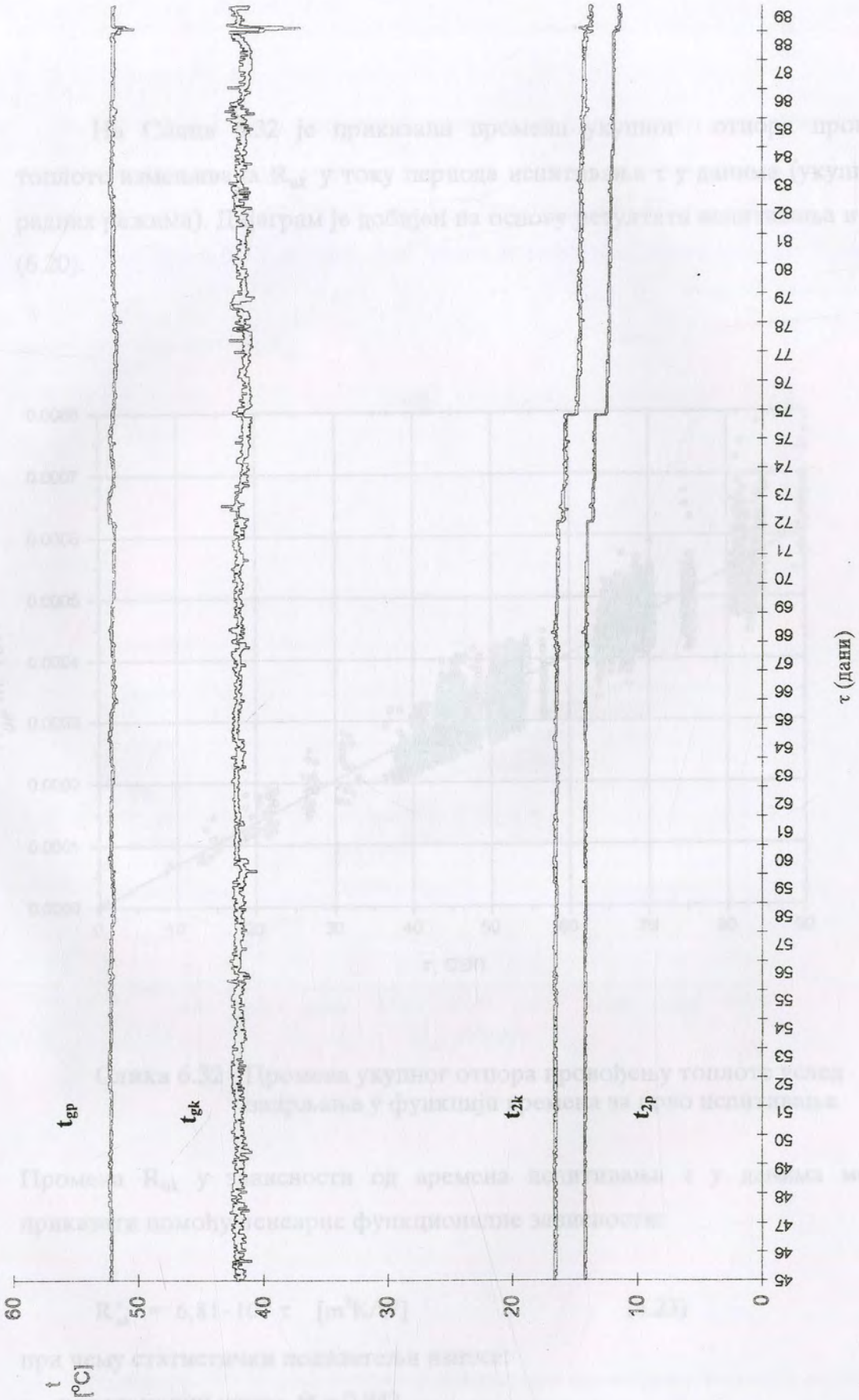
Прво испитивање је трајало око 90 дана, тј. од 10.09. до 11.12.1996.године.

На Слици 6.31 приказана је промена температура геотермалне и расхладне водоводске воде на улазу и излазу из измењивача топлоте у току периода испитивања. Температура геотермалне воде на улазу у измењивач t_{gp} је била практично константна све време испитивања и износила је око 52°C . Незнатне промене у температури и протоку геотермалне воде, које су се јављале током испитивања, последица су повременог укључивања постојећег грејног система у ПИК 7.јули. Температура геотермалне воде на излазу из измењивача t_{gp} је током испитивања лагано расла од 40°C на почетку испитивања, до 42°C на крају испитивања. Температура расхладне водоводске воде на улазу у измењивач t_{2p} је на почетку испитивања износила око 18°C , а на крају око 12°C што је последица пада температуре воде у локалном водоводу услед смањења спољне температуре. Температура водоводске воде на излазу из измењивача t_{2p} се мењала приближно као и температура воде на улазу с тим што је била топлија за око $3,5^{\circ}\text{C}$.



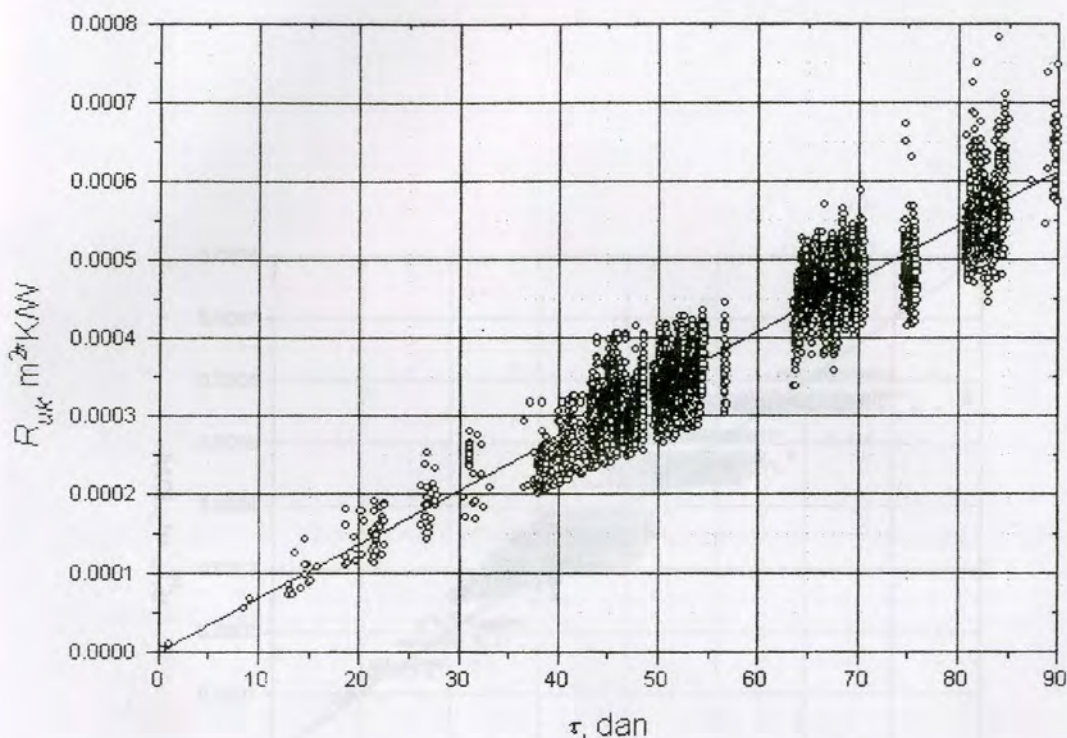
Слика 6.31/1 Промене температура воде на улазу и излазу из измењивача топлоте за прво испитивање

Дрво мерење



Слика 6.31/2 Промене температура воде на улазу и излазу из измењивача топлоте за прво испитивање

На Слици 6.32 је приказана промена укупног отпора провођењу топлоте измењивача R_{uk} у току периода испитивања τ у данима (укупно 5665 радних режима). Дијаграм је добијен на основу резултата испитивања и израза (6.20).



Слика 6.32 Промена укупног отпора провођењу топлоте услед запрљања у функцији времена за прво испитивање

Промена R_{uk} у зависности од времена испитивања τ у данима може се приказати помоћу линеарне функционалне зависности:

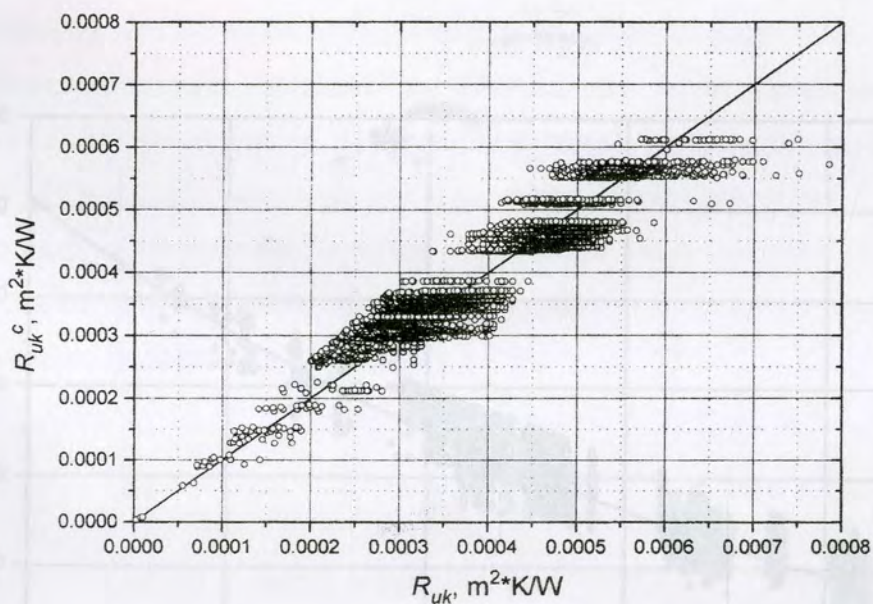
$$R_{uk}^c = 6,81 \cdot 10^{-6} \tau \quad [\text{m}^2\text{K/W}] \quad (6.23)$$

при чему статистички показатељи износе:

- корелациони однос $\Theta = 0,942$
- средње квадратно одступање $\Delta_{sr} = 9,29\%$.

На основу ових вредности може се закључити да наведена линеарна зависност веома добро описује промену укупног отпора провођењу топлоте услед задрљања и да одговара линији 1 приказаној на Слици 4.5.

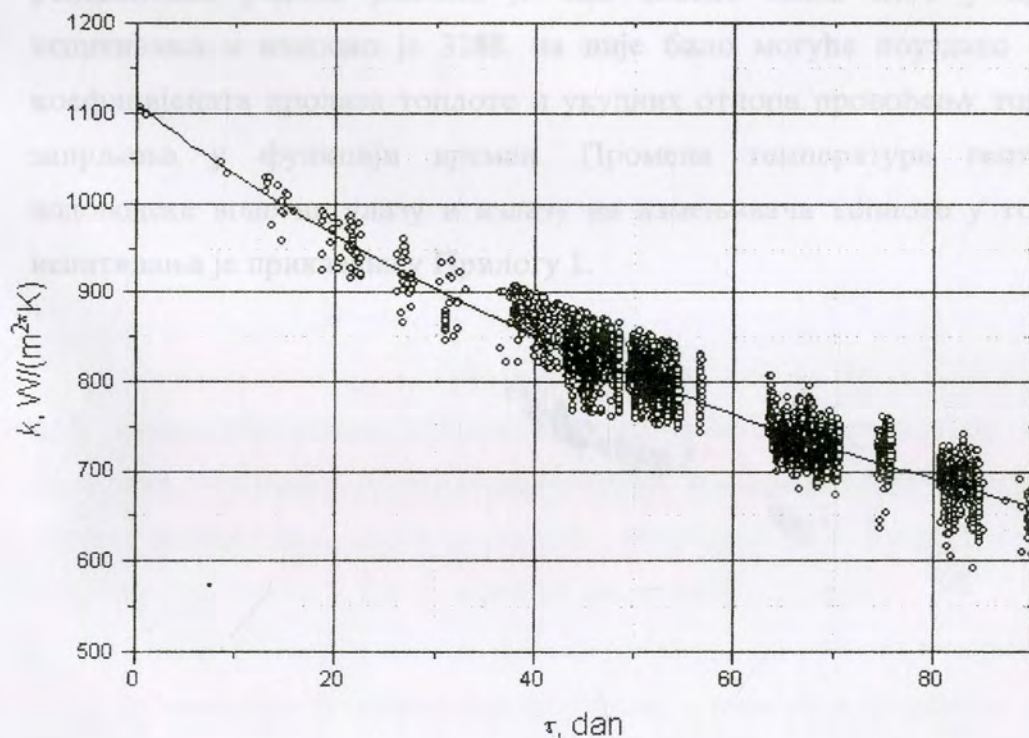
На Слици 6.33 је приказан однос између вредности отпора провођењу топлоте добијеном на основу резултата мерења R_{uk} и на основу усвојене линеарне зависности R_{uk}^c .



Слика 6.33 Корелационо поље отпора провођењу топлоте услед задрљања за прво испитивање

На Слици 6.34 је приказана промена коефицијента пролаза топлоте измењивача у зависности од времена испитивања τ у данима. Почетна вредност коефицијента пролаза топлоте је износила $1100 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$, да би после 90 дана пала на око $650 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$. На основу анализе промене отпора провођењу топлоте услед задрљања добија се следећа зависност:

$$k^c = \frac{1}{\frac{1}{1100} + 6,81 \cdot 10^{-6} \cdot \tau} \quad (6.24)$$



Слика 6.34 Промена коефицијента пролаза топлоте измењивача у зависности од времена испитивања за прво мерење

У другој серији испитивања брзине протицања воде кроз измењивач топлоте су биле:

- за геотермалну воду 0,9-1,0 m/s
- за водоводску воду 1 m/s

Испитивање је трајало око 100 дана, тј. од 14.03. до 4.06.1997.године.

Током овог мерења долазило је до честих прекида и поремећаја у водоводној инсталацији, као и нестанка електричне енергије. Температура геотермалне воде на улазу у измењивач $t_{гр}$ је имала практично константну вредност од око 53°C првих 48 дана испитивања, а затим је нагло опала на око 42°C . До пада температуре је дошло, како је то касније утврђено, због мешања геотермалне са водоводском воде пре њеног уласка у мерну инсталацију. Услед ових недостатака који су се јављали током мерења, број релевантних радних режима је био знатно мањи него у првој серији испитивања и износио је 3188, па није било могуће поуздано одређивање коефицијената пролаза топлоте и укупних отпора провођењу топлоте услед запрљања у функцији времен. Промена температура геотермалне и водоводске воде на улазу и излазу из измењивача топлоте у току периода испитивања је приказана у Прилогу 1.

7. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Резултати теоријских и експерименталних истраживања приказани у дисертацији омогућавају да се у зависности од издашности извора геотермалне воде, њеног састава и температуре, изврши:

1. Анализа могућности искоришћења топлоте геотермалног извора за потребе грејања;
2. Узорковање геотермалне воде и одређивање њених својстава;
3. Избор материјала за израду елемената система (цевоводи, арматура, измењивачи) за коришћење геотермалне енергије;
4. Утврђивање параметара потребних за поступак димензионисања измењивача топлоте.

7.1. Општи закључци у вези коришћења геотермалне енергије

Резимирајући приказану проблематику која се односи на место и улогу коју имају обновљиви извори енергије (ОИЕ) у решавању енергетских проблема, резервама геотермалне енергије код нас и у свету, могућностима за њихово коришћење, као и постојећим системима за коришћење геотермалне енергије (поглавља 1, 2 и 3), може се закључити следеће:

- Предност ОИЕ у односу на конвенционалне енергетске изворе су пре свега у чињеници да су неисцрпни, доступни, а њихово коришћење углавном не загађују околину и не ремети равнотежу у природи;
- Учешће ОИЕ у светском енергетском билансу износи око 2%, ако се из укупних ОИЕ изузму хидроенергија, дрво, биљни и животињски отпад. Основни разлог релативно малог учешћа ОИЕ у светском енергетском билансу је висока цена уређаја за њихово коришћење. На садашњем нивоу технолошког развоја уређаји за коришћење геотермалне енергије су

карактеристични по томе да имају малу топлотну снагу и да могу да задовоље нискотемпературске потребе;

- На основу процена о потенцијалима геотермалне енергије код нас констатовано је да су укупне резерве којима располаже Србија значајне, а да искористиве резерве износе око 220 MW топлотне снаге. Инсталирана снага свих постројења која користе геотермалну енергију износи око 100 MW и то углавном за балнеолошко-рекреативне потребе. У Србији постоји око 80 бушотина са геотермалном водом чији се топлотни потенцијал не користи;
- Температура геотермалних вода са нашег подручја је између 40°C и 80°C, а издашност извора се креће од 10 l/s до 50 l/s. Вода из ових извора је са високим степеном минерализације;
- Имајући у виду карактеристике вода са наших подручја, као и могућности за њихово коришћење (поглавље 3), намеће се закључак да је могућа и оправдана примена геотермалне воде у систему грејања (индиректни систем са додатним конвенционалним извором топлоте за покривање вршних оптерећења). Ова могућност примене је посебно оправдана у случајевима када већ постоји израђена бушотина за експлоатацију геотермалне воде.

7.2. Закључци у вези могућности примене геотермалне воде у систему грејања

У поглављу 5 је извршена анализа система грејања при коришћењу топлотног потенцијала геотермалних вода. Анализа је извршена за температурске режиме који су уобичајени у секундарном кругу грејања у нашој земљи и различите издашности и температуре геотермалног извора. На основу изложеног, закључено је да је индиректни систем грејања боље решење од директног имајући у виду састав вода са подручја наше земље. Поред измењивача топлоте у коме се користи топлота геотермалне воде (измењивач А) потребно је обезбедити и додатни конвенционални извор топлоте са

измењивачем Б за покривање вршних оптерећења. Анализирано је 7 карактеристичних случајева с обзиром на карактеристике геотермалног извора и потребе система грејања: извори велике и мале издашности и ниске, средње и високе температуре. Моделирање је извршено за случај бесконачно велике површине за размену топлоте (теоријски максимално могуће искоришћење топлоте), као за случај коначне површине измењивача А, водећи рачуна о расположивим температурским разликама у систему.

У оквиру анализе су уведени појмови:

- прелазна температура ($t_{s,pr}$) која представља минималну температуру спољашњег ваздуха до које геотермални извор у потпуности задовољава топлотне потребе објекта који се греје;
- искључна температура ($t_{s,is}$) која представља минималну температуру спољашњег ваздуха до које геотермални извор може да задовољи део потреба за топлотном енергијом, а испод које се грејање одвија у потпуности преко додатног извора топлоте.

При раду посматраног грејног система приказаног на слици 5.1 уочена су три карактеристична случаја:

1. Ако је температура спољашњег ваздуха виша од прелазне температуре ($t_s \geq t_{s,pr}$) геотермални извор у потпуности задовољава топлотне потребе грејаног објекта ($Q_A(t_s) \geq Q(t_s)$), при чему се вишак топлотне енергије ($Q_A(t_s) - Q(t_s)$) може додатно искористити за неке друге потрошаче;
2. При температури спољашњег ваздуха у опсегу ($t_{s,is} < t_s < t_{s,pr}$) геотермални извор задовољава део потреба грејаног објекта ($Q_A(t_s) < Q(t_s)$), па је неопходно да разлику у топлотној снази обезбеди додатни извор преко измењивача топлоте Б: ($Q_B(t_s) = Q(t_s) - Q_A(t_s)$);
3. Геотермални извор не може да обезбеди ни део потребне топлотне енергије због ниске температуре геотермалне воде (спољна температура нижа од искључне температуре $t_s \leq t_{s,is}$), па се комплетне потребе објекта покривају само из додатног извора преко измењивача топлоте Б: ($Q_B(t_s) = Q(t_s)$).

На основу овог модела и статистички прикупљених метеоролошких података за посматрано подручје могуће је извршити техно-економску анализу исплативости система за искоришћење геотермалне енергије за систем грејања, при чему се могу проценити уштеде у количини горива у односу на конвенционалне грејне системе и време отплате инвестиционих улагања.

7.3. Закључци изведени на основу експерименталних истраживања

У поглављу 4 је дат преглед поступака за утврђивање састава и својстава геотермалне воде, утицај ових својстава на избор материјала, као и процедура за утврђивање запрљања геотермалних инсталација. На бази ових поступака, а у циљу добијања релевантних података потребних за избор материјала и димензионисање постројења за искоришћење геотермалних вода за грејање објеката, изведена су експериментална истраживања, описана у поглављу 6, за конкретни геотермални извор у ПИК "7. јули" у Дебрцу. Методологија експерименталних истраживања је на овај начин верификована и може се применити за слична испитивања на другим локалитетима.

Испитивања су обухватила:

- Испитивање техничко-технолошких својстава геотермалне воде;
- Испитивање корозионог понашања металних материјала у геотермалној води;
- Испитивање промене отпора провођењу топлоте услед запрљања у геотермалним инсталацијама.

На основу испитивања техничко-технолошких својстава геотермалне воде утврђено је следеће:

- Утврђена је слабо алкална реакција испитиваног узорка воде са средњим нивоом минерализације, што указује на могућност за одвијање процеса електро-хемијске корозије;

- Испитивањем узорка геотермалне воде је утврђено да постоји одређена количина растворених гасова (кисеоник, угљендиоксид, водониксулфид) који су веома јаки корозиони агенси, што указује на могућност корозије конструкционих материјала;
- Садржај хлоридних и сулфатних јона не утиче битно на корозиону активност воде;
- Према вредностима Ланжелијеовог и Ризнеровог индекса утврђено је да испитивани узорак воде испољава слабу тенденцију у погледу таложења каменца карбонатног типа и малу корозиону активност.

За испитивање корозионог понашања изабрани су следећи материјали: угљенични челик Č1213, нерђајући челици Č4572, Č4574 и Č4580 и сиво ливено гвожђе (перлитне и феритне структуре). Испитивања су обављена у лабораторијским условима и на терену. Истраживањем је утврђено следеће:

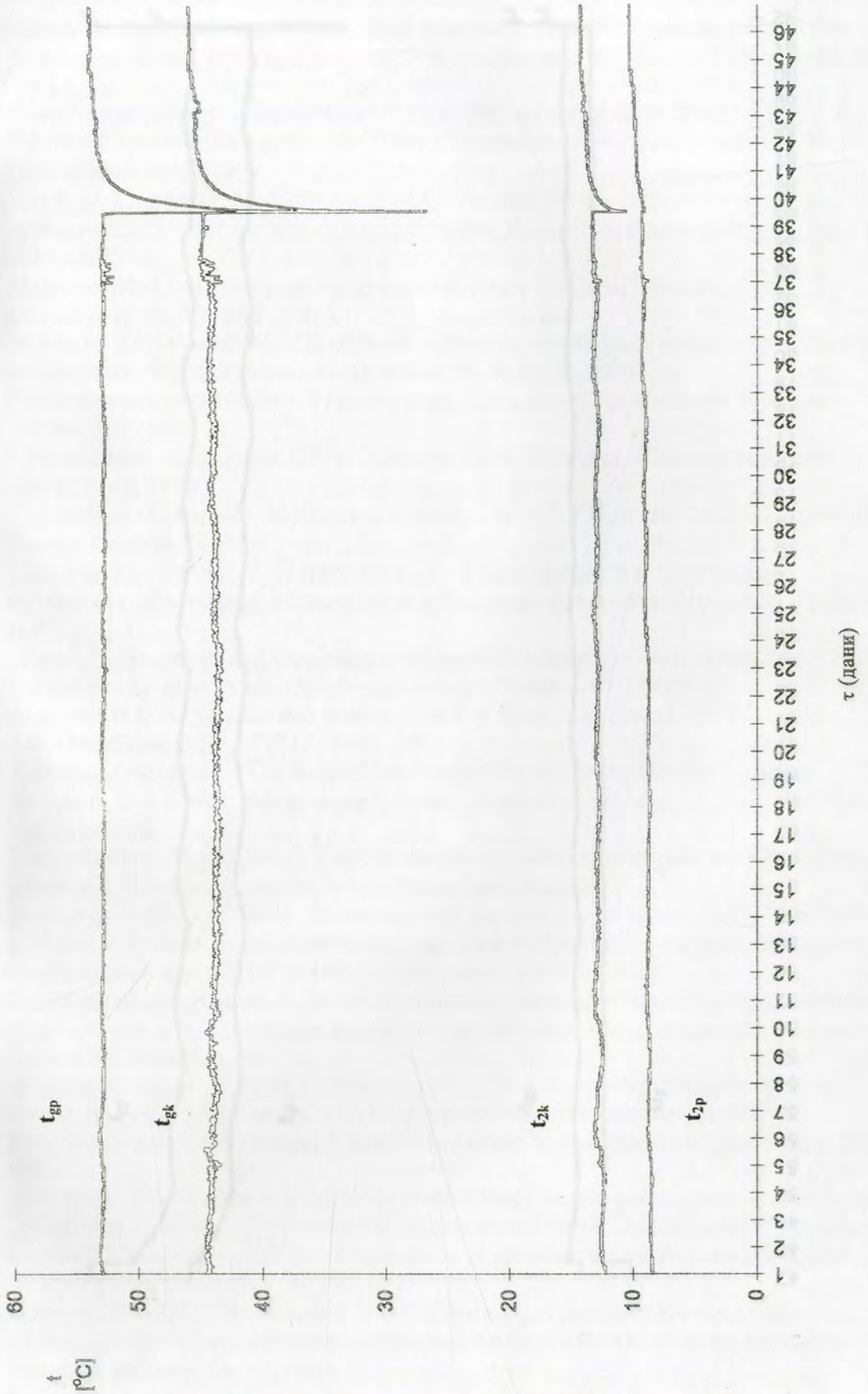
- За узорке од Č1213 и ливеног гвожђа брзина корозије зависи од брзине протицања геотермалне воде, при чему је у стању мировања воде (у лабораторијским и експлоатационим условима) брзина корозије веома мала, а са повећањем брзине (у експлоатационим условима) значајно расте (при брзинама воде од 0,5÷2 m/s повећање је неколико десетина пута);
- За узорке од нерђајућих челика није установљена значајна разлика у брзини корозије за случај мировања воде и за случај њеног протицања;
- С обзиром на изражену корозиону склоност ливеног гвожђа и угљеничног челика, ова два материјала се не препоручују за израду делова постројења који су у додиру са геотермалном водом, али се могу користити за секундарни круг инсталације грејања;
- За израду дела инсталације у додиру са геотермалном водом препоручују се нерђајући челици. Највећу корозиону отпорност, односно практично потпуну корозиону стабилност (утврђено је само локално површинско разлагање неметалних укључака), показао је Č4574.

Испитивање промене отпора провођењу топлоте услед запрљања је изведено на измењивачу топлоте типа цев-у-цев. Извршене су две серије мерења од по 90 дана. На основу резултата испитивања при брзини геотермалне воде од 0,56 m/s и водоводске воде од 1 m/s утврђено је следеће:

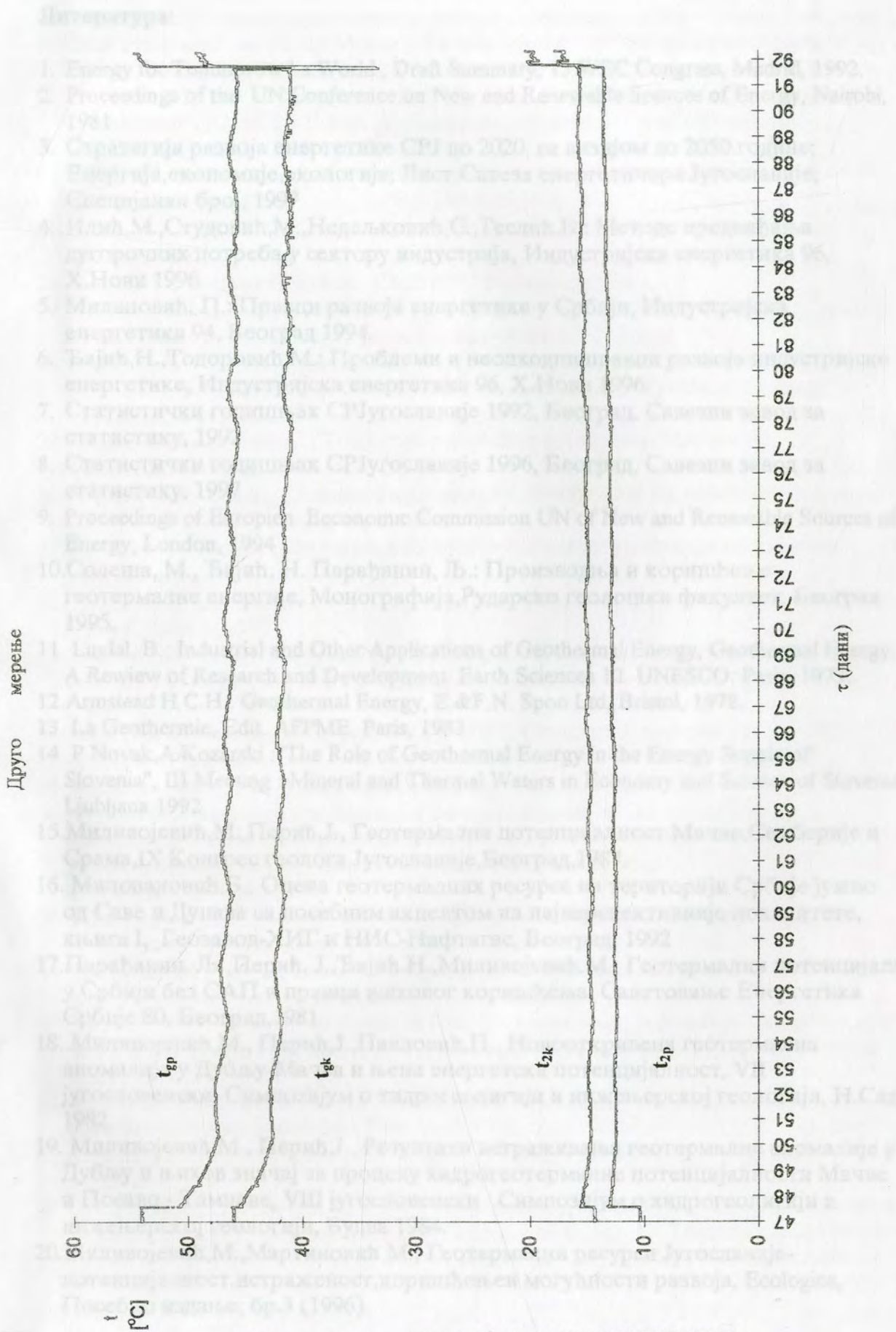
- Отпори провођењу топлоте услед запрљања зависе од времена рада апарата;
- У току времена испитивања вредност коефицијента пролаза топлоте се смањила са почетних око 1100 [W/m²·K] на око 650 [W/m²·K], на крају испитивања,
- За време трајања испитивања од 90 дана утврђена је линеарна зависност укупних отпора провођењу топлоте услед запрљања од времена приказана једначином (6.23) уз веома високе вредности статистичких показатеља квалитета зависности;
- Отпори провођењу топлоте услед запрљања могу изазвати значајно смањење топлотних перформанси измењивача топлоте, па се ови апарати морају пажљиво димензионисати и пратити у раду, ради евентуалног чишћења.



Друго мерење



Промене температура воде на улазу и излазу из измењивача топлоте за друго испитивање



Промене температура воде на улазу и излазу из измењивача топлоте за друго испитивање

Литература:

1. Energy for Tommorrow ' s World , Draft Summary, 15 WEC Congress, Madrid, 1992.
2. Proceedings of the UN Conference on New and Renewable Sources of Energy, Nairobi, 1981
3. Стратегија развоја енергетике СРЈ до 2020, са визијом до 2050.године; Енергија,економије,екологија; Лист Савеза енергетичара Југославије; Специјалан број, 1997
4. Илић,М.,Студовић,М.,Недељковић,С.,Теслић,Б.: Методе предвиђања дугорочних потреба у сектору индустрија, Индустријска енергетика 96, Х.Нови 1996
5. Милановић, П.: Правци развоја енергетике у Србији, Индустријска енергетика 94, Београд 1994.
6. Ђајић,Н.,Тодоровић,М.: Проблеми и неопходни правци развоја индустријске енергетике, Индустријска енергетика 96, Х.Нови 1996.
7. Статистички годишњак СРЈугославије 1992, Београд, Савезни завод за статистику, 1992
8. Статистички годишњак СРЈугославије 1996, Београд, Савезни завод за статистику, 1997
9. Proceedings of Europien Economic Commission UN of New and Renewable Sources of Energy, London, 1994
10. Солеша, М., Ђајић, Н. Парађанин, Љ.: Производња и коришћење геотермалне енергије, Монографија,Рударско геолошки факултет, Београд 1995.
11. Lindal, B.: Industrial and Other Applications of Geothermal Energy, Geothermal Energy, A Rewiew of Research and Development. Earth Sciences 12. UNESCO: Paris, 1973.
12. Armstead H.C.H.: Geothermal Energy, E.&F.N. Spon Ltd, Bristol, 1978.
13. La Geothermie, Edit. AFPME, Paris, 1983
14. P.Novak, A.Kozarski : "The Role of Geothermal Energy in the Energy Supply of Slovenia", III Meeting : Mineral and Thermal Waters in Economy and Science of Slovenia, Ljubljana 1992.
15. Миливојевић,М.,Перић,Ј., Геотермална потенцијалност Мачве,Семберије и Срема,IX Конгрес геолога Југославије,Београд,1987.
16. Миловановић,Б.; Оцена геотермалних ресурса на територији Србије јужно од Саве и Дунава са посебним акцентом на најперспективније локалитете, књига I, Геозавод-ХИГ и НИС-Нафтагас, Београд, 1992
- 17.Парађанин. Љ.,Перић. Ј.,Ђајић.Н.,Миливојевић.М.; Геотермални потенцијали у Србији без САП и правци њиховог коришћења, Саветовање Енергетика Србије 80, Београд,1981
18. Миливојевић,М., Перић,Ј.,Павловић,П., Новооткривена геотермална аномалија у Дубљу-Мачва и њена енергетска потенцијалност, VII југословенски Симпозијум о хидрогеологији и инжењерској геологији, Н.Сад, 1982.
19. Миливојевић,М., Перић,Ј., Резултати истраживања геотермалне аномалије у Дубљу и њихов значај за процену хидрогеотермалне потенцијалности Мачве и Посаво - Тамнаве, VIII југословенски Симпозијум о хидрогеологији и инжењерској геологији, Будва 1984.
- 20.Миливојевић,М.,Мартинковић М.; Геотермални ресурси Југославије- потенцијалност,истраженост,коришћењеи могућности развоја, Ecologica, Посебно издање, бр.3 (1996).

22. Popovski, K.: "Simple Installations for Heating Greenhouses in Mild Climate Conditions", ISHS Symposium on Simple Methods for Heating and Ventilating Greenhouses in Mild Climate Conditions, Djebra-Tozeur (Tunisia), 1988.
23. Duda, M.: "Certain Experiences in the Utilization of Low Potential Heat for Plastic Greenhouses"; FAO/CNRE First Workshop on Industrial Thermal Effluents for Greenhouse Heating, Dublin (Ireland), 1986.
24. Вујић, С.; Расхладни уређаји, Машински факултет Београд, IV издање, Београд 1972.
25. Шамшиловић, С.; Топлотне пумпе у примени, Виша политехничка школа, Београд 1987.
26. Билић, Ф.; Топлотне пумпе, СМЕИТС Београд, 1979.
27. Маркоски, М., О могућностима уштеде енергије при раду расхладних уређаја и топлотних пумпи, Индустриска енергетика 96, Х.Нови 1996
28. Popovski, K.: "Annual Heat Loading Factor", Direct Application of Geothermal Energy, Text- Book for International Course on Direct Application of Geothermal Energy, pp 27.3-27.10, Skopje, 1990.
29. Јаћимовић, Б., Генић, С.; Топлотне операције и апарати, Машински факултет, Београд, 1992.
30. Prabhudesa, K., Das, K.; Chemical Engineering For Professional Engineers Examinations, McGraw-Hill Book Co., New York, 1984.
31. Интернационални стандарди: ISO 5667/1-3, Општи стандарди за узимање узорака воде.
32. Kindle, C.H., Geothermal Fluid Sampling Techniques, "Direct Application of Geothermal Energy", Skopje, 1990
33. Ellis, P.F., Conover, M.F.: Materials Selection Guidelines for Geothermal Energy Utilisation Systems 1981 and the Addendum 1983. Radian Corporation, Austin, Texas, U.S.A.
34. Интернационални стандарди: ISO 5667/11, Стандарди за узимање узорака геотермалне воде
35. Rodier, J., Analysis of Waters, John Wiley and Sons, New York, 1975.
36. Yildirim N., "Corrosion and Scaling of Low - Temperature Geothermal Fluid", International Course on Geothermal District Heating Schemes, Skopje 1997.
37. Robert & Roberta H.L.H.: Combining Indexes for Cooling Water Evaluation, C.E., USA, 1991
38. Акилизин, А.П., Зуков, А.П.; Кислороднаја корозија оборудованија хемических производств, Химија, Москва, 1985.
39. Кулијски, М.А.; Справочник по својствима, методама анализа и очистке води, Наукова Думка, Киев, 1980.
40. Thackeray, P.A., The Cost of fouling in Heat Exchange Plant, in *Fouling - Science or Art*, ed. A. M. Pritchard, Proceedings of a Congerence at the University of Surrey, Guildford, U.K., March 27-28, 1979, p 1.
41. Standards of Tubular Exchanger Manufacturers Association, Tubular Exchanger Manufacturers Association Inc., New York, 1978.
42. Kundsén J.G. "Fouling in Heat Exchangers", Hemisphere Publishing Corporation, 1984 3.17.6-2
43. Chan, S. H., and Ghassemi, K. F., Analytical Modeling of Calcium Carbonate Deposition for Laminar Falling Films and Turbulent Flow in Annuli: Part I - Formulation and Single-Species Model, *ASME Journal of Heat Transfer*, vol. 113, pp.735-740, August 1991.

44. Chan, S. H., and Ghassemi, K. F., Analytical Modeling of Calcium Carbonate Deposition for Laminar Falling Films and Turbulent Flow in Annuli: Part II - Multispecies Model, *ASME Journal of Heat Transfer*, vol. 113, pp.741-746, August 1991.
45. Chan, S. H., Rau, H., DeBellis, C., and Neusen, K. F., Silica Fouling of Heat Transfer Equipment - Experiments and Model, *ASME Journal of Heat Transfer*, vol. 110, pp.841-849, November 1988.
46. Somerscales, E. F. C., and Kassemi, M., Fouling due to Corrosion Product Formed on a Transfer Surface, *ASME Journal of Heat Transfer*, vol. 109, pp.267-271, February 1987.
47. ASTM D 4778-88 "Standard Test Method for Determination of Corrosion and Fouling Tendency of Cooling Water Under Transfer Conditions", Annual Book of ASTM Standards 1989
48. Moor, R.E., "Selecting Materials to Resist Corrosive Conditions", Chem.Eng. Albany 86(Julu 30th)
49. Младеновић С.,: "Корозија Материјала" , Технолошко-металуршки факултет-Београд, 1990
50. NACE (1974) Standard TM -01-69 Laboratory Corrosion Testing of Metals for the Process Industries (National Association of Corrosion Engineers)
51. Рударско-геолошки факултет, Група за хидрологију, Београд,: "Извештај о резултатима геотермалних истраживања на опитном полигону "Дебрц" , Београд,1991.
52. ЈУС. А5.005; "Поступци за уклањање продуката корозије са узорака за испитивање корозије" , СЗС, Београд, 1989.
53. Милановић, П., "Побољшани вентил са повратном клапном" , Патент П-1729/84
54. "ED 2000 Систем за аквизицију података" , Electronic Design, Београд 1990, Каталог произвођача - Упутство за руковање

Прилог 2.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Утицај састава и температуре воде на избор топлотне шеме и материјала опреме за коришћење геотермалне енергије

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

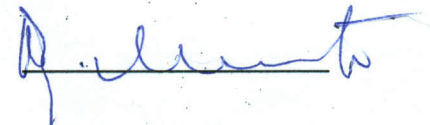
Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (*Creative Commons*) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис

У Београду, 31.01.2014



Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Милановић Предраг Д.

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Утицај састава и температуре воде на избор топлотне шеме и материјала опреме за коришћење геотермалне енергије

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис

У Београду, 31.01.2014

