

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство
Ниво студија: Мастер академске студије
Модул: Енергетика и процесна техника
Предмет: Термоенергетски уређаји и постројења
Број индекса: 441/2018

Драгана В. Мировић

Прорачун прегрејача паре

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Небојша Лукић -ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____
Оцена: _____

Задатак: У оквиру овог мастер рада потребно је да кандидат представи основе парних котлова, уз посебан осврт на прегрејаче паре и на њихов прорачун, као и да укаже значај и утицај овог дела котловског постројења на све перформансе парног котла. Након теоријских разматрања, кандидат треба да прикаже прорачун прегрејача паре.

Препоручена литература:

- [1] Богнер, М., Исаиловић, М. (2015). Термотехничка енергетска постројења, ЕТА, Београд.
- [2] Бојић, М. (2011). Термодинамика, Машински факултет, Крагујевац.
- [3] Ђорђевић, Б. (2015). Термодинамика, Технолошко-металуршки факултет, Београд

Ментор:

Проф. др Небојша Лукић

Крагујевац, 2021.

Резиме

У оквиру овог мастер рада представљене су основе парних котлова, уз посебан осврт на прегрејаче паре и на њихов прорачун, и указан је значај и утицај овог дела котловског постројења на све перформансе парног котла. Након теоријских разматрања, приказан је прорачун прегрејача паре.

Кључне речи:

парни котло, прегрејач паре, прорачун, термодинамика, температура

Summary

Within this paper, the basics of steam boilers are presented, with special reference to steam superheaters and their calculation, and the importance and impact of this part of the boiler plant on all steam boiler performance is indicated. After theoretical considerations, the calculation of the steam superheater is presented.

Key words:

steam boiler, steam superheater, calculation, thermodynamics, temperature

Списак табела

Табела 1. Подаци прегрејача паре 2

Табела 2. Прираштај коефицијента вишка ваздуха за номинални и максимални рада

Табела 3. Подаци међупрегрејача паре

Табела 4. Подаци прегрејача паре 1

Табела 5. Прегрејач паре 2

Табела 5. Стварна количина влажних продуката сагоревања

Табела 7. Међупрегрејач паре

Табела 8. Прегрејач паре 1

Списак слика

Слика 1. Претварање енергије и парни котао

Слика 2. Развој парних котлова према основним параметрима од 1900. до 1970.године

Слика 3. Развој парних котлова према основним параметрима од 1900. до 1970. године

Слика 4. Карнотов кружни процес у дијаграму $T - s$ и $p - v$

Слика 5. Clausius– Rankin-ов процес

Слика 6. Clausius – Rankinov процес са променама стања медија у генератору паре и парној турбини

Слика 7. Парни котао са равном механичком решетком

Слика 8. Спољни изглед калориметра (лево) и калориметарска бомба (десно)

Слика 9. Приказ пресека водогрејних цеви са наслагама котловског камена

Слика 10. Шематски приказ уређаја за омекшавање котловске воде поступком загревања

Слика 11. Шематски приказ уређаја за омекшавање котловске воде хемијским поступком помоћу комбинације креча и соде

Слика 12. Струјање воде: а - струјање воде при њеном загревању у суду, б - струјање воде при њеном загревању у цеви, в - струјање воде при њеном загревању у нагнутој цеви, г - струјање воде при њеном загревању у нагнутих цевима

Слика 13. Шематски приказ уређаја за мерење природне промаје код парног котла помоћу депримометра:

Слика 14. Шематски приказ уређаја за остваривање вештачке промаје у херметички затвореном пепеонику под притиском

Слика 15. а) Шематски приказ уређаја за остваривање вештачке промаје са директним сисањем, б) Шематски приказ рада инсталације вештачке промаје са индиректним сисањем на стабилним котловима, в) Шематски приказ рада инсталације вештачке промаје са индиректним сисањем на локомотивским котловима, г) Шематски приказ рада инсталације вештачке промаје са комбинованим сисањем

Слика 16. Добијање водене паре

Слика 17. Змијаста прегрејач

Слика 18. Деформација у функцији времена за разне напрезања

Слика 19. Степен оштећења у функцији напрезања

Слика 20. Типично место уградње прегрејача у парним котловима

Слика 21. Прегрејач паре 2

Слика 22. Међупрегрејач паре

Слика 23. Прегрејач паре 1

Слика 24. Дијаграм температурне разлике за прегрејач паре 2

Слика 25. Дијаграм температурне разлике за међупрегрејач

Слика 26. Дијаграм температурне разлике за прегрејач 1

Списак ознака

- A [%] - минералне примесе,
- a [m] - ширина димног канала,
- a' [m] - ширина коморе образоване двома суседним завесама,
- A_F [m²] – попречни пресек канала,
- A_p [m²] - површина цевног регистра,
- b [m] - дубина димног канала,
- b' [m] - дубина коморе образоване двома суседним завесама,
- B_g [kg/s] – гасификована количина горива,
- B_N - [kg/s] – потребна количина горива за нормалан рад котла,
- c' [m] - висина коморе образоване двома суседним завесама,
- C_d – корекциони фактор за одређивање коефицијента задрљаности при сагоревању чврстих горива,
- c_p [J/kgK] – масена специфична топлота прегрејане паре при константном притиску
- $c_{p,dT}$ [J/kgK] – средња вредност специфичне топлоте прегрејане паре у датом временском интервалу
- D [kg/s] - капацитет парних котлова,
- D_1 [kg/s] – номинална продукција котла
- D_{MP} [kg/s] - проток паре кроз међупрегрејач
- D_{max} [kg/s] - максимални трајни капацитет парног котла,
- $D_{max30'}$ [kg/s] - максимални капацитет парног котла у 30 минута;
- D_{min} [kg/s] - технички минимални капацитет парног котла,
- D_N [kg/s] - нормални капацитет парног котла,
- d_s [mm] - спољашњи пречник цеви,
- d_u [mm] - унутрашњи пречник цеви,
- f_g [m²] - средњи попречни пресек за пролаз продуката сагоревања,
- h [kJ/kg] – вредност енталпије прегрејане паре

- H_d [kJ/kg] – доња топлотна моћ
- h_F [kJ/kg] – енталпија димних гасова,
- H_g [kJ/kg] – горња топлотна моћ,
- h_{MP} [kJ/kg] – енталпија димних гасова на излазу из међупрегрејача,
- h_{PP} [kJ/kg] – енталпија димних гасова на излазу из прегрејача паре,
- h_s [kJ/kg] – енталпија паре на излазу из прегрејача,
- h_x [kJ/kg] – енталпија паре на излазу из испаривача,
- k [W/m²K] – збирни коефицијент преноса топлоте,
- L_m [m] – средња дужина змије,
- m – број завеса,
- m_p [kg] – маса суво засићене паре,
- m_s [kg] – маса смеше, тј. влажне засићене паре,
- m_v [kg] – маса воде, односно течности од које је добијена пара,
- p [Pa] – притисак у парном котлу,
- p_{CO_2} [Pa] – парцијални притисак CO₂ у продуктима сагоревања,
- p_d [Pa] – допуштени, концесијски притисак,
- p_{H_2O} [Pa] – парцијални притисак H₂O у продуктима сагоревања,
- p_i [Pa] – излазни притисак из прегрејача паре,
- p_{MP} [Pa] – притисак у међупрегрејачу паре,
- p_o [Pa] – стање прегрејане паре на улазу у прегрејач
- p_r [Pa] – радни, погонски или номинални притисак,
- p_s [Pa] – притисак у прегрејачу паре
- Q_{MP} [kW] – количина топлоте размењна у међупрегрејачу,
- Q_{PP} [kW] – количина топлоте размењена у прегрејачу паре,
- q_p [kW] – топлота прегревања
- Q_s [kW] – укупна размењена количина топлоте
- Q_S^N [kW] – количина топлоте за номинални режим рада,

- R – топлотни отпор кроз зид цеви и топлотни отпор услед задрљаности,
- r [kJ/kg] – специфична топлота испаравања воде при нормалним условима,
- R_0 – почетни коефицијент задрљаности цеви у коридорном поретку при сагоревању чврстог горива,
- s – вредност ентропије прегрејане паре
- s'' – промена ентропије суво-засићене паре,
- s_1 [m] - корак по ширини,
- t_{gSR} [°C] – средња температура продуката сагоревања
- t_{MP}^N [°C] - температура продуката сагоревања на излазу из међупрегрејача
- t_{MP}^{ul} [°C] - температура паре на улазу у међупрегрејач
- t_{PP1}^{Iz} [°C] - температура паре на излазу из прегрејача паре 1
- t_{PP2}^{Iz} [°C] - температура паре на излазу из прегрејача паре 2
- t_{PP1}^N [°C] - температура продуката сагоревања на излазу из прегрејача паре 1
- t_{PP2}^N [°C] - температура продуката сагоревања на излазу из прегрејача паре 2
- t_{PP1}^{ul} [°C] - температура паре на улазу у прегрејач паре 1
- t_{PP2}^{ul} [°C] - температура паре на улазу у прегрејач паре 2
- t_{pr} [°C] - температура прегрејане паре,
- tr [h] – досадашњи број радних часова змијаче
- t_s [°C] - температура на излазу из прегрејача,
- t_{SRln} [°C] – средња логаритамска температура измењивача топлоте
- t_x [°C] – температура на улазу у међупрегрејач,
- u [%] – масени удео влаге у гориву,
- u' – вредност унутрашње енергије воде у стању кључања,
- u'' - вредност унутрашње енергије воде у стању суво-засићене паре,
- V_{RW} [m³/kg] – количина влажних продуката сагоревања,
- v_p [m³/kg] – специфична запремина паре,
- W [%] – масени удео влаге,
- x [kg паре / kg смеше] – степен сувоће водене паре,
- z - број змија у завеси

- ΔR – поправни коефицијент за прљаности,
- Δt_m [°C] – разлика температура медија (продукти сагоревања –пара) на излазу из прегрејача паре,
- Δt_v [°C] – разлика температура медија (продукти сагоревања –пара) на улазу у прегрејач паре,
- λ [W/m²K] - коефицијент преноса топлоте,
- λ_1 [W/m²K] –коефицијент прелаза топлоте с продуката сагоревања на зид,
- λ_2 [W/m²K] –коефицијент прелаза топлоте с зида на водену пару,
- λ_{1K} [W/m²K] –коефицијент прелаза топлоте конвекцијом,
- λ_{1Z} [W/m²K] –коефицијент прелаза топлоте зрачењем,
- $\lambda_{CO_2}, \lambda_{H_2O}$ [W/m²K] – коефицијенти прелаза топлоте услед зрачења троатомних гасова
- λ_{PP}^{IZL} –коефицијент вишка ваздуха на излазу из прегрејача паре,
- η_{gr} [%] – степен искоришћења парног котла,
- η_N^Z [%] – степен изолованости,
- η_{tC} [%] – степен искоришћења према Карноовом процесу,
- η_{tR} [%] - степен искоришћења парног *Clausius – Rankin-овог* процеса за сувозасићену пару.

Садржај

УВОД	1
1 ОПШТЕ О КОТЛОВСКИМ ПОСТРОЈЕЊИМА	3
1.1 Котловска постројења.....	3
1.2 Циљ и задаци котловског постројења.....	7
1.3 Подела котловских постројења (парних котлова)	10
1.4 Делови котловског постројења (парног котла)	11
1.5 Принцип рада парног котла	14
1.6 Горива и припрема воде	16
1.6.1 Подела горива.....	16
1.6.2 Својства горива и елементарни састав горива	18
1.6.3 Топлотна моћ горива	19
1.6.4 Израчунавање топлотне моћи из хемијског састава горива	20
1.6.5 Сагоревање горива	21
1.6.6 Припрема воде.....	22
1.6.7 Пречишћавање воде за напајање котлова.....	23
1.6.8 Циркулација воде код парног котла.....	26
1.6.9 Промаја код парног котла	27
2 ПРЕГРЕЈАЧИ ВОДЕНЕ ПАРЕ	29
2.1 Водена пара – величине стања влажне и прегрејане водене паре.....	29
2.2 Карактеристике прегрејача водене паре	32
2.2.1 Појам прегрејача водене паре	32
2.2.2 Врсте прегрејача паре и њихове функције	33
3 ПРОРАЧУН ПРЕГРЕЈАЧА ПАРЕ ПАРНОГ КОТЛА	37
3.1 Количина топлоте размењене у прегрејачу паре	37
3.2 Температура продуката сагоревања на улазу и излазу из прегрејача паре	38
3.2.1 Температура продуката сагоревања на излазу из прегрејача паре 2	38
3.2.2 Температура продуката сагоревања на излазу из међупрегрејача.....	41
3.2.3 Температура продуката сагоревања на излазу из прегрејача паре 1	43
3.2.4 Температура паре на улазу у прегрејач паре 2.....	45
3.2.5 Температура паре на улазу у међупрегрејач	45
3.2.6 Температура на улазу из прегрејача паре 1	46
3.3 Прорачун прегрејача паре 2	46

3.4 Прорачун међупрегрејача паре.....	53
3.5 Прорачун прегрејача паре 1	59
ЗАКЉУЧАК	65
ЛИТЕРАТУРА.....	67
ПРИЛОЗИ	68

УВОД

Електрична енергија као облик енергије представља незаобилазну основу материјалних и друштвених делатности, али и животног стандарда сваког човека. Њена употреба у свету расте с обзиром на степен и брзину друштвено-економског раста и развоја. Данас се око 80% електричне енергије у индустријски развијеним земљама добија из термоенергетских постројења. Осим производње електричне енергије, ова постројења производе и топлотну енергију. Упркос великим еколошким проблемима, због емисије гасова стаклене баште и настојањима да се фосилна горива и термоелектране што мање користе и граде, њихова улога све више расте без обзира на нове изворе и начине производње електричне енергије, будући да постоје делови света који нису довољно развијени да производе електричну енергију из обновљивих извора енергије.

Термоелектране су постројења у којима се хемијска енергија фосилних горива конвертује у електричну енергију. Једна термоелектрана може да се састоји из више производних блокова, а основна постројења једног производног блока су: котло, турбина, генератор и трансформатор. У котловском постројењу најчешће се припрема и сагорева угљ. Тако енергија угља прелази у топлоту која се предаје води и доводи до њеног испаравања. Пара одговарајућег притиска и температуре се доводи у турбинско постројење, односно у турбину (турбина високог, средњег и ниског притиска), где се кинетичка енергија паре конвертује у механички рад. То доводи до окретања ротора турбине, а тиме и ротора генератора. Окретањем ротора генератора у његовим намотајима статора се, према принципу магнетне индукције, индукује електрична енергија. Она се уз помоћ трансформатора, чија је основна функција подизање напона електричне енергије на виши напонски ниво, предаје на високонапонску мрежу.

Са конструктивног гледишта најчешћи основни елементи парног котла су: котловско ложиште, котло у ужем смислу, прегрејачи паре и накнадне грејне површине. Ложиште треба да омогући ослобађање хемијски везане енергије горива која се сагоревањем горива претвара у топлоту. Сви остали наведени елементи котла су размењивачи топлоте.

Могућности савремених котловских материјала се не могу у потпуности искористити у постројењу које ради са влажном паром. Уградњом прегрејача паре температура (па и енталпија) паре се подиже без истовременог пораста притиска.

Предност циклуса са прегрејаном паром је и у томе што се избегава сувише влажна пара у излазним елементима експандира у турбини високог притиска до неког међупритиска, и потом се уводи у посебан сноп цеви накнадног прегрејача где се накнадно прегрева на константном притиску обично до почетне температуре прегревања. После тога пара експандира до притиска кондензације у турбини ниског притиска.

Задатак прегрејача паре је прегревање паре ради омогућења ефикаснијег рада турбина. Поред овог основног задатка прегрејача у њему се пара пре прегревања, најчешће, и суши. У погледу предаје топлоте прегрејачи могу бити чисто конвективни, конвективно озрачени и чисто озрачени. Какав начин предаје топлоте прегрејачу ће имати доминирајући утицај зависи од количине топлоте потребне за прегревање тј. од параметара паре.

Код старијих котлова са ниским параметрима паре био је довољан чисто конвективни прегрејач паре смештен у струји гасова иза испаривача. Док је код савремених котлова високих параметара паре количина топлоте потребна за прегревање велика, прегрејач се дели у више пакета и неки од њих примају топлоту зрачењем.

У овом раду су представљене основе парних котлова, уз посебан осврт на прегрејаче паре и на њихов прорачун. Након теоријских разматрања, приказан је прорачун прегрејача паре.

Циљ рада је указати на значај и утицај прегрејача паре на све перформансе парног котла.

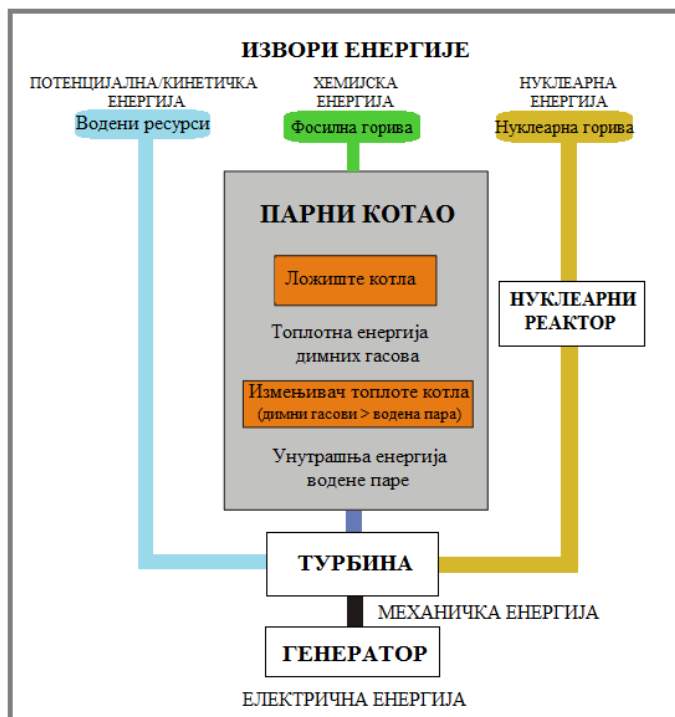
1 ОПШТЕ О КОТЛОВСКИМ ПОСТРОЈЕЊИМА

1.1 Котловска постројења

Основни задатак котловског постројења је трансформација хемијске енергије горива у топлотну енергију радног флуида, а у правилу му је главни део парни котао – проточни систем за трансформацију енергије. У подручју изградње енергетских, топлотних и процесних система проблеми градње парних котлова чине засебно подручје.

Основна намена парног котла је производња водене паре притиска већег од атмосферског која се може користити за добијање механичког рада, за грејање и за индустријске процесе или за комбиновану производњу механичког рада и топлоте. На слици 1. је приказано место парног котла у конверзији енергије. Парни котао је део комплексног енергетског, процесног или топлотног система у којем се хемијска енергија горива претвара у енергију водене паре. Врсте енергија које се јављају у парним котловима приликом конверзије енергије су:

- 1) Хемијска енергија горива чија количина зависи од хемијског састава горива,
- 2) Топлотна енергија димних гасова који настају процесом сагоревања,
- 3) Енергија водене паре тражених карактеристика (притисак, температура),
- 4) Топлотна енергија воде ако се ради о топоводним котловима. [1]



Слика 1. Претварање енергије и парни котао [1]

Недостатак и недовршен развој теоријских основа примењених у градњи парних котлова на подручју струјања флуида, измене топлоте, чврстине специјалних материјала, познавања сагоревања горива, и употреба проверених величина и података за градњу парних котлова уместо проверених теоријских основа довео је до градње различитих типова парних котлова, различитих деловања и својстава паре (параметара паре). Брз развој парних котлова има за последицу многа решења која нису до краја испитана. [2]

Споменуто стање у градњи парних котлова последица је чињеница: [2]

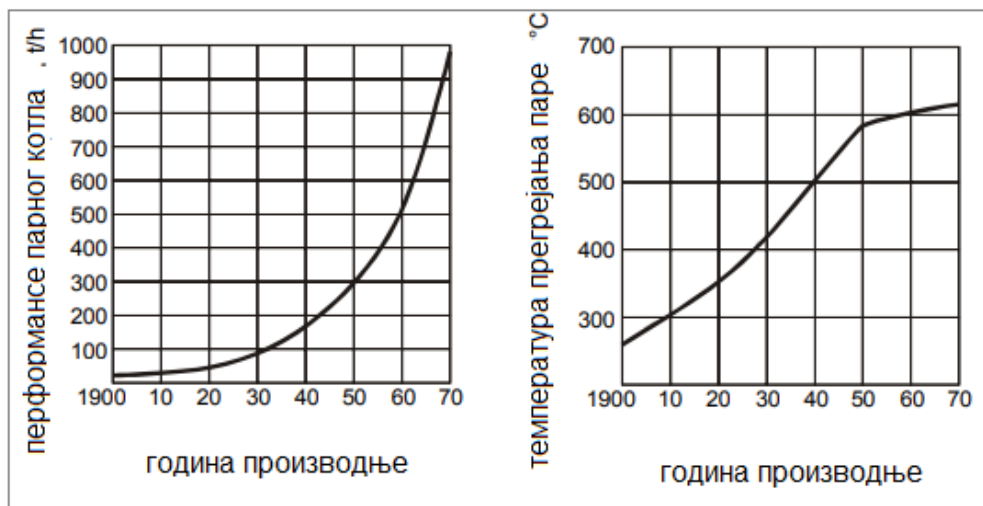
- 1) користе се различите врсте горива (чврста, течна и гасовита), различитих хемијских састава, што ствара тешкоће у примени јединствених типова парних котлова;
- 2) истраживања комплексних услова и процеса сагоревања разних врста горива различитих састава још нису завршена;
- 3) питања оптимизације услова струјања флуида и измене топлоте, и постављања оптималног прорачуна величине огревних површина треба теоријски и рачунски решити, и систематизирати за поједине врсте парних котлова;
- 4) због сагоревања све лошијих горива јављају се нови, тежи услови регулације и аутоматизације;
- 5) због повишења радних притисака и температура прегревања паре употребљавају се квалитетније врсте конструкцијских челика (прелази се од феритних челика на аустенитне челике), а потребно је спровести погонска испитивања топлотних и механичких својстава материјала током десет па и више година да би се поуздано утврдиле допуштене границе деформација и напрезања материјала за израду цеви, комора, бубња и других делова парних котлова;
- 6) питања корозије, трошења и оштећења као и питања о нечишћењу огревних површина на страни воде и паре, као и на страни димних гасова, постају све сложенија због све виших радних притисака и температура и све шире примене горива са великим процентом сумпора и минералних материја;
- 7) нова решења у развоју термоенергетских постројења, повезивање процеса водена пара-плин и употреба ложишта парног котла под притиском, стварају низ нових питања изгарања, струјања флуида и пролаза топлоте.

Новија подручја у развоју енергетских постројења, (нпр. коришћење нуклеарне енергије), условљавају друге карактеристике градње парних котлова и отварају низ нових проблема. Развој градње парних котлова, због повећања потребних количина електричне енергије и тежње за што економичнијим енергетским постројењем, условљава градњу јединица великим капацитетом са истовременим повећањем параметара произведене водене паре (притисак, температура).

Основни параметри парних котлова, које могу дати увид у њихов развој, а који се покушавају нормирати, односно уклопити у одређене границе јесу: [3]

- D [kg/s] - капацитет парних котлова,
- p [Pa] - притисак у парном котлу,
- t_{pr} [°C] - температура прегрејане паре,
- η_{gp} [%] – степен искоришћења парног котла.

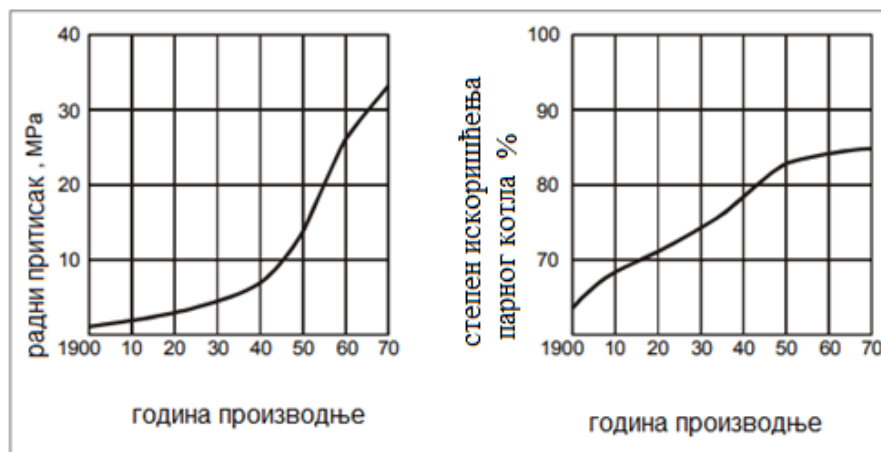
Развој парних котлова у последњих 60 година приказан је параметрима на слици 2 и 3. Треба напоменути да тај развој још није довршен.



Слика 2. Развој парних котлова према основним параметрима од 1900. до 1970.године [3]

За процену развоја парних котлова и вредности енергетских постројења могу послужити и следећи примери: [3]

- 1) За енергетско постројење капацитета 50 MW било је потребно у 1900. изградити 85 парних котлова капацитета по 2,1 kg/s, са укупним капацитетом ~ 180 kg/s паре параметара: притисак = у парном котлу 1,2 МПа, и температура прегрејања паре 275 °C. Утрошак топлотне енергије износио је 23,4 MJ/kWh (5600kcal/kWh).
- 2) За исто такво енергетско постројење капацитета 50 MW могао се 1960. изградити један парни котао од 47 kg/s паре, са притиском паре ~ 19 МПа и температуре прегрејања 565 °C. Утрошак топлотне енергије износио је за такво постројење 10,2 MJ/kWh (2440 kcal/kWh).
- 3) У години 1900. искључиво се употребљавало гориво (угаљ) високе топлотне вредности и са само 4-5% баластних материја (пепео и вода). Корисност тадашњег парног котла са тако вредним горивом износила је $\eta_{gr} \approx 75\%$. У годинама иза 1960. у парним котловима употребљавало се гориво (угаљ) и са више од 50% баластних материја с корисности η_{gr} и до 90%.



Слика 3. Развој парних котлова према основним параметрима од 1900. до 1970. године [1]

Постоје четири етапе развоја парних котлова са конвенционалним горивом и 5. етапа са нуклеарним горивом (парни котао прелази у овој етапи у измењивач топлоте). [3]

- I. етапа: почетак градње парних котлова у време око 1900: ручно ложење на непокретним решеткама; парни котлови са великим садржајем воде; за потребе већих капацитета граде се низови или батерије парних котлова; параметри котлова износе: притисак паре $\sim 1,5$ МПа, температура прегрејања паре до 250°C .
- II. етапа: гориво изгара у слоју на механичким решеткама, тј. решеткама са погоном за покретање. Основни представници ове етапе јесу парни котлови са секцијама (секционални) и стрмоцевни парни котлови; параметри износе: притисак паре до ~ 4 МПа и температура прегрејања паре до 450°C ; време градње од 1900. до 1925.
- III. етапа: у развоју парних котлова осим сагоревања у слоју уведено је и сагоревање горива у простору односно сагоревање помоћу угља самлевоеног у млиновима. Због потпуно нових услова сагоревања угљене прашине, ложиште је добило одређени облик и нижа волуменска оптерећења него при сагоревању угља у слоју. Параметри паре износе: притисак паре до 12,5 МПа и температура прегрејања до 525°C ; време градње од 1925. до 1950. године.
- IV. етапа: то је перформанса великих парних котлова у блок-систему, тј. парни котао и турбина чине једну погонску јединицу; притисци се пењу и преко критичне тачке, тј. и преко 22,1 МПа, а температура прегрејања паре и преко 525°C ; време градње од 1950. надаље.
- V. етапа: употребљавају се потпуно нови извори топлотне енергије. Као гориво служе одређени елементи атомске масе преко 230: тхориј (Th-232); уран (U-233, U-235, U-238); трансурански елементи; плутонијум (Pu-239) итд.; фисијом (цепањем) атома таквих елемената стварају се уз регулирано вођење процеса огромне количине топлотне енергије. Парни котао у овом случају, тј. у нуклеарним електранама постаје само измењивач топлоте на који се посредно преноси топлота добијена у реактору. Нуклеарни реактор са системом измењивача долази на место класичног облика парних котлова и чини примарни круг нуклеарне електране, док остали део нуклеарних термо постројења као турбина, цевоводи и остало, остаје у основи непромењен. [3]

Због широког подручја које обухвата градња парног котла настоји се систематизовати и нормализовати основне параметре парних котлова. Основна стандардизација обухвата прописе о притиску, капацитету и температури прегрејања парних котлова.

Притисци у парном котлу су: [4]

- 1) p_d , [Pa] - допуштени, концесијски притисак; то је највиши притисак при којем је допуштено да парни котао ради. На тај притисак делује сигурносни вентил, односно сигурносни вентил се аутоматски отвара кад је допуштени притисак прекорачен. Он је основа за прорачун чврстине зидова цеви, комора, бубња, итд.;
- 2) p_r , [Pa] - радни, погонски или номинални притисак; најчешће је то притисак 5% испод допуштеног притиска па се при мањим осцилацијама притиска не отвара сигурносни вентил. Величина радног притиска је основа за прорачун цевовода изван парних котлова у склопу термоенергетског постројења;
- 3) p_i , [Pa] - излазни притисак из прегрејача паре; то је стварни притисак који се мери на излазу из парних котлова. Тај је притисак погонски или радни умањен за величину пада притиска због трења у систему прегрејача паре и спојног цевовода у склопу парних котлова. Излазни притисак је најчешће 10 до 15% мањи од допуштеног притиска;

Температура прегрејања паре (t_{pr}) данас износи 540 °C а изузетно је утврђена са 675 °C. Ограничена је чврстином и саставом материјала за градњу прегрејача паре. Температуре прегрејања мере се на излазу из прегрејача и односе се, према прописима, на максимални трајни капацитет парних котлова. Ако нису утврђени специјални услови, температура прегрејања паре мора бити остварена и при нормалном капацитету парних котлова.

Капацитет парних котлова одређен је следећим величинама: [4]

- 1) D_N , [kg/s] - нормални капацитет; служи као основа и меродаван је за пројектовање целог постројења;
- 2) D_{max} , [kg/s] - максимални трајни капацитет; служи произвођачу парних котлова за прорачун величина огревних површина и осталих елемената појединих делова котла;
- 3) D_{max30} , [kg/s] - максимални капацитет у 30 минута;
- 4) D_{min} , [kg/s] - технички минимални капацитет.

Код већих јединица парних котлова употребљава се као карактеристична величина максимални тренутни капацитет, који је за око 10% већи од максималног трајног капацитета али је допуштено трајање таквог капацитета само 30 минута.

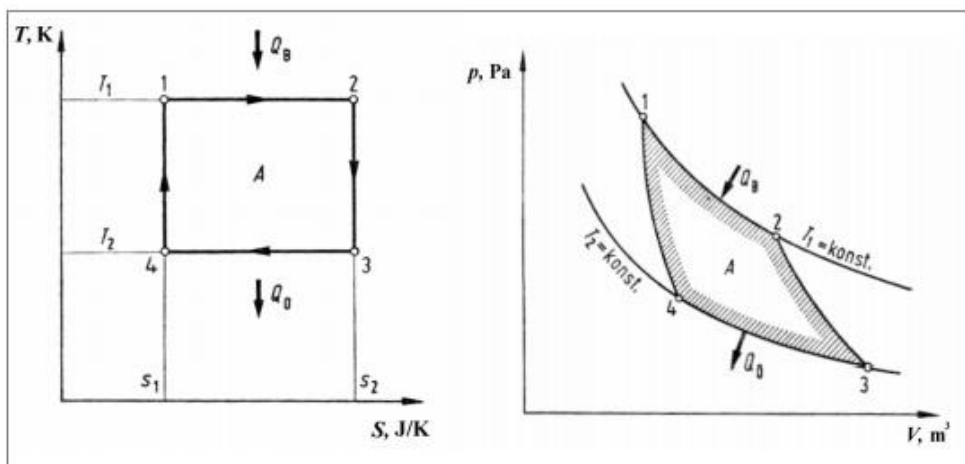
1.2 Циљ и задаци котловског постројења

У котловском постројењу се настоји постићи што већа ефикасност при претварању енергије. Процес добијања рада може се најбоље приказати у топлотним кружним процесима. Топлотни кружни процес је низ промена стања радног медија. Одвија се у

деловима термоенергетског постројења: генератору паре – турбини – кондензатору. Промене стања медија односно претварања енергије одвијају се у теоријским условима према Карноовом процесу између две повратне изотерме и две изентропске промене стања према слици 4.

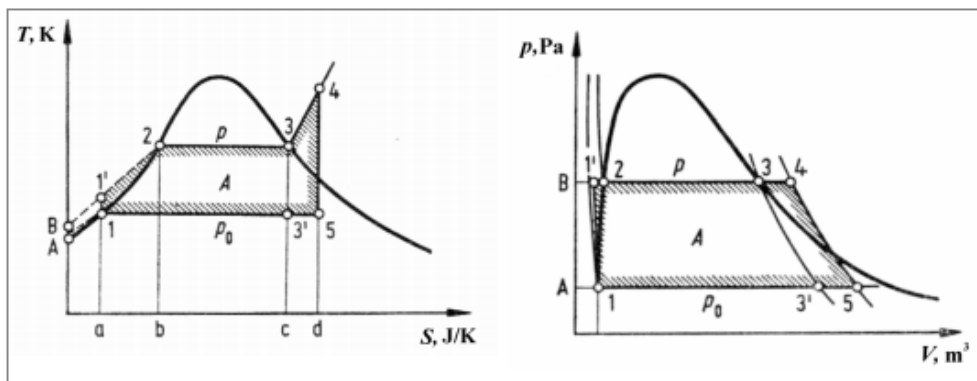
Степен искоришћења је према том процесу: [5]

$$\eta_{\text{TC}} = \frac{Q_B - Q_0}{Q_B} \cdot 100 = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\% \quad (1)$$



Слика 4. Карноов кружни процес у дијаграму Т – s и p – v [5]

Приказом Карноовог кружног процеса утврђује се оптимална топлотна корисност односно минимални утршак топлоте у односу према добијеном раду W. Стварна топлотна корисност кружног процеса претварања топлотне енергије у рад је знатно мања од Карноовог процеса (слика 5.).

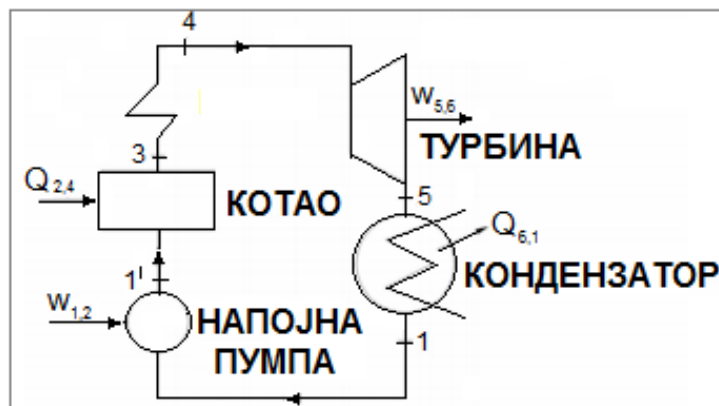


Слика 5. Clausius– Rankin-ов процес [5]

Карноов кружни процес технички је немогуће остварити због: [5]

- 1) техничке несавршености делова постројења односно својстава и перформанси парних котлова, турбине итд.
- 2) одређених физичких карактеристика медија са којима се процес одвија.

Теоријски процес у термоенергетским постројењима је Clausius – Rankinov процес према ком се одвијају промене стања медија прилагођене условима рада појединих делова постројења (парни котло, парна турбина) и прилагођена својствима радних медија. Clausius – Rankinov процес одвија се између две повратне изотерме и две изентропске промене стања. Према слици 6. одвија се Clausius – Rankinov процес са следећим променама стања медија у генератору паре и парној турбини. [5]



Слика 6. Clausius – Rankinov процес са променама стања медија у генератору паре и парној турбини [5]

Промене стања медија у генератору паре и парној турбини: [5]

- 1) Промена стања 1 – 2 – довођење топлоте за загревање воде;
- 2) Промена стања 2 – 3 – довођење топлоте испарења;
- 3) Промена стања 3 – 4 – довођење топлоте прегрејања;
- 4) Промена стања 3 – 3' – адијабатска експанзија засићене паре;
- 5) Промена стања 4 – 5 – адијабатска експанзија прегрејане паре;
- 6) Промена стања 3' – 1 – одвођење топлоте кондензације при засићеној пари;
- 7) Промена стања 5 – 1 – одвођење топлоте кондензације при прегрејаној пари.

Степен искоришћења парног Clausius – Rankin-овог процеса за сувозасићену пару је:

$$\eta_{\text{tR}} = \frac{A_{1233'1}}{A_{123\text{ca}1}} \cdot 100\% , \quad (2)$$

а за прегрејану пару: [5]

$$\eta_{\text{tR}} = \frac{A_{123451}}{A_{2234\text{da}1}} \cdot 100\% \quad (3)$$

$$\eta_{\text{tR}} = \eta_{\text{tC}} \quad (4)$$

Начини на које се технички може повећати степен искорошћења η_{t} су: [5]

- 1) подизање радног притиска и температуре прегрејања свеже паре у парном котлу и снижење притиска излазне паре на турбини (кондензацијски притисак),
- 2) увођење међупрегрејане паре у парном котлу,
- 3) регенеративно предгрејање напојне воде.

Наведене мере непосредно утичу на утврђивање основних карактеристика парног котла и процес претварања енергије у термоенергетским постројењима директно одређује карактеристике парног котла.

1.3 Подела котловских постројења (парних котлова)

У развоју парних котлова и стројева енергетских постројења постигнут је велики напредак нарочито последњих 50 година. У теоријским решењима, конструктивном извођењу и усвајању нових материјала, примењивани су виши притисци произведене паре и више температуре прегрејања паре. Основне карактеристике развоја парних котлова усмерене су на употребу горива мале топлотне вредности (отпадни угаљ у рудницима) као и на остала отпадна горива. У топлотним прорачунима и у пројектно-конструкцијским решењима развој парних котлова је усмерен на смањење пасивног дела парних котлова (зид, изолација, челична конструкција итд.), и на релативно повећање активног дела парних котлова (огревне површине). Чиниоци који условљавају различитост у градњи, односно у одређивању типова и перформанси парних котлова, јесу: [2]

- 1) капацитет парних котлова,
- 2) температура прегрејања паре,
- 3) просторни смештајни захтеви,
- 4) захтеви хигијенско-техничких прописа (чишћење димних гасова),
- 5) захтеви регулације и аутоматике парних котлова,
- 6) захтеви заштите околине итд.

Подела парних котлова на одређене типове може се спровести са обзиром на: [2]

- 1) намену парних котлова - на стабилне и бродске парне котлове,
- 2) проток или циркулацију воде и паре (проточни циклус) у парним котловима,
- 3) перформансе ложишта, тј. начин сагоревања горива.

Бродски парни котлови морају задовољити велик број специфичних погонских услова који их чине различитим од стабилних парних котлова. Са обзиром на циклус струјања вода-пара, односно циркулација воде и паре генератори се могу поделити на три основне групе:

- 1) Парни котлови са природним протоцима или циркулацијом воде - водна и парна фаза одвајају се у испаривачу, у спојним цевоводима и у бубњу парних котлова.
- 2) Парни котлови са принудним протоком (помоћу циркулационе пумпе уграђене између бубња и испаривача) - овај тип парног котла познат је под именом *La Mont*.
- 3) Парни котлови без бубња са принудним протицањем воде и паре у испаривачким огревним површинама - у ову скупину котлова укључени су *Benson, Sulzer, Ramzin* и још неки типови.

Ложишта парних котлова са обзиром на врсту горива, односно на начин сагоревања горива, могу се поделити на следеће основне типове: [2]

- 1) ложишта за сагоревање чврстих горива са разним врстама непомичних решетки или мањих решетки на механички погон;
- 2) ложишта за сагоревање чврстог горива у слоју са механичком решетком са расподелом ваздуха за сагоревање по појединим деловима решетки (зонама решетки) или са решетком са регулисаним доводом ваздуха по појединим редовима решетки;
- 3) ложишта за сагоревање разних врста отпадака (индустријски или градски отпаци) са разним врстама решетки (овај тип ложишта развио се у последње време у индустријским и градским центрима због сагоревања врло великих количина разних отпадака);
- 4) ложишта за сагоревање чврстих горива у простору, односно ложишта за сагоревање угљене прашине (млинско ложење);
- 5) ложишта за сагоревање течних горива са великим бројем типова горионика;
- 6) ложишта за сагоревање гасовитих горива са различитим типовима горионика;
- 7) ложишта за истовремено сагоревање више врста горива са одвојеним горионцима за сваку врсту горива и комбинованим горионцима за више врста горива (плинско-уљни горионици);
- 8) ложишта за коришћење отпадне топлоте, нпр. коришћење топлоте гасова из високих пећи, конвертера итд.

Наведена подела на одређене типове парних котлова није једина и није коначна, јер и многи други чиниоци условљавају разне перформансе парних котлова.

1.4 Делови котловског постројења (парног котла)

Парни котлови састоје се по правилу од следећих основних група делова и опреме: [2]

- 1) ложишта као простори за сагоревање горива са потребном опремом за претварање хемијске енергије горива у топлотну енергију димних гасова;
- 2) систем измењивача топлоте, односно огревне површине парног котла на којима се топлотна енергија димних гасова преноси на воду и водену пару; ови су измењивачи топлоте: грејачи воде, испаривачи воде, прегрејачи паре и грејачи ваздуха;
- 3) помоћни уређаји у парном котлу: арматура парних котлова (фина и груба), носива челична конструкција, зид и изолација
- 4) постројење или уређаји изван парног котла: постројење или уређаји за довод горива до парног котла, постројење или уређаји за припрему воде, постројење или уређај и за напајање водом, постројење или уређаји за довод ваздуха, постројење или уређаји за одвод и чишћење димних гасова, постројење или уређаји за одвод пепела и шљаке, постројење или уређаји инструментације, регулације и аутоматике.

У ложишту се хемијска енергија горива претвара у топлотну енергију димних гасова. Величина и облик ложишта и остале карактеристике зависе у највећој мери од употребљеног горива, од величине јединице, од довода горива и ваздуха за сагоревање итд. Основни задатак ложишта је осигурање правилног и потпуног сагоревања горива у

оптимальним условима, тј. са минималним вишком ваздуха. Процес сагоревања горива се мора завршити у ложишту. Димни гасови преносе своју топлотну енергију струјањем на огревним површинама измењивача топлоте. Топлотна енергија димних гасова предаје се у уобичајеним перформансама према следећем редоследу; цевни систем огревних површина испаривача воде, прегрејача паре, грејача или предиспаривача воде и огревне површине грејача ваздуха.

Редослед смештаја огревних површина може бити и другачији, а зависи од топлотног прорачуна јединице. Димни гасови струје димним каналима у склопу парног котла и излазе помоћу природне или принудне промаје у слободну атмосферу. Код данашњих јединица ваздух се доводи на решетку или у горионике помоћу вентилатора свежег ваздуха (примарна промаја), а димни гасови се одводе из јединице помоћу вентилатора димних гасова (секундарна промаја). Код савремених парних котлова са течним горивом често се изводе ложишта са надпритиском тако да вентилатор за довод свежег ваздуха служи уједно и као вентилатор за одвод димних гасова у атмосферу. Код мањих јединица могућ је рад и без вентилатора, тј. са природном промајом помоћу димњака одређене висине.

У део парног котла који је под притиском доводи се напојна вода под притиском много вишим од атмосферског. У њему се загрева, предиспаривача и испаривача вода и прегрејава водена пара на тражену температуру. Према томе све огревне површине измењивача топлоте у склопу парног котла: грејачи воде, предиспаривачи, испаривачи и прегрејачи паре, као и спојни цевоводи, коморе и бубањ парних котлова.

Основни део парног котла је огревна површина испаривача воде. То је површина која је са једне стране у додиру са димним гасовима а са друге стране са водом и мешавином воде и водене паре. Испаривачи су цеви повезане са коморама и бубњем тако да се одвија нормални проток воде и паре. Код парних котлова са природним протоком бубањ и цевни систем испаривача и грејача воде морају бити испуњени водом 50 до 70% висине, а изнад тог дела бубња налази се парни простор. Код парних котлова са присилним протоком вода и пара често се директно одвајају у цевном систему испаривача без бубња. Ова врста јединица има малу количину воде а брзе промене у оптерећењу постижу се добром регулацијом довода горива, односно сагоревања. Најнижи и највиши водостај у генератору паре морају бити јасно одређени. Тиме се спречава директан додир димних гасова високе температуре са огревним површинама испаривача које нису са друге стране хлађене мешавином воде и водене паре. [2]

Прегрејач паре је склоп огревних површина измењивача топлоте у којем се прегрејава водена пара из засићеног стања до одређене температуре прегрејања. У прегрејачу се, осим тога, суши пара која на улазу у прегрејач садржи одређени проценат водених честица (од 1 до 5%). Огревне површине прегрејача паре изводе се у облику снопова челичних бешавних цеви, а према потреби и од легираног челика смештених било у ложишту било у водовима димних гасова. Код савремених великих јединица високог прегрејања паре огревне површине прегрејача подељене су на више делова. Топлота се конвективним пролазом и зрачењем преноси од димних гасова на водену пару која струји цевима прегрејача.

Грејач, односно предиспаривач воде је склоп огревних површина измењивача топлоте у којем се вода загрева или делимично предиспарује. За ниже погонске притиске (4-5 МПа) огревне површине грејача воде изведене су често и од ребрастих ливених цеви. За високе притиске и новије перформансе изведене су од челичних бешавних цеви савијених у облику цевних змија. Температура загревања воде у грејачима креће се од 25-50°C испод температуре засићене паре. Често се у грејачу вода загрева и до температуре испаравања, а може се и предиспарити до 25%. [2]

Огревним површинама измењивача топлоте загрева се ваздух за сагоревање на одређену температуру. Огревне површине грејача ваздуха могу се извести као лимени плочасти грејачи, цевни грејачи, ливено-ребрасте цеви и као специјалне перформансе итд. Ваздух који се загрева преносом топлоте од димних гасова, суши се и загрева гориво и стварају се повољни услови сагоревања (повишење температуре процеса сагоревања) у ложишту парних котлова.

У ову групу опреме укључени су сви помоћни делови потребни за потпуну изградњу јединице и нормалан рад. Груба арматура обухвата помоћне уређаје ложишта, контролна врата, вентиле, отворе за надгледање, разне ливене делове итд. Фина арматура обухвата битне делове за сигурност погона и рада јединице (манометри, термометри, вентили итд.)

Носива челична конструкција парног котла осигурава изградњу комплетне јединице у јединствену целину и повезује поједине делове парног котла. Носива конструкција јединице преузима оптерећење које настаје уградњом свих делова у парни котао (ложиште са својим уређајима, огревне површине измењивача топлоте као што су испаривач воде, прегрејач паре, грејач воде, арматура и остали делови). У новије време има разних перформанси јединица парних котлова код којих огревне површине или проточне цеви уједно служе и као носива конструкција. Код парних котлова са великим садржајем воде као носива конструкција служи тело парног котла.

Зид и изолација парних котлова спречавају продор спољног ваздуха у ложиште и канале јединице и допуштају минималне топлотне губитке. Ватростални и изолациони материјал бира се на основу топлотних и механичких напрезања која се јављају због температурних стања у појединим подручјима парног котла. Постоје две врсте парног котла (када је у питању изолација или зид парног котла): нормална (тешка) и лака (изолација). Нормална врста је зид који се састоји од ватросталних (шамотних) опека нормалних и фазонских облика и ватросталних (шамотних) сводова. Између слоја ватросталне опеке и спољног зида често се налази изолациони међуслој. Иза таквих цевних стена у блоку (мембранске стене) смештен је слој изолационог материјала (стаклена или минерална вуна); са спољне стране је парни котао као целина покривен лименом оплатом.

Постројење за припрему напојне воде се састоји као целина од термичке (топлотне) и хемијске припреме воде. У хемијској припреми воде одстране се штетне материје као што су соли, механичка нечистоћа итд. Услови којима напојна вода мора одговарати одређени су у парном котлу температуром прегрејања, радним притиском, топлотним оптерећењем огревних површина и др.

Уређаји за напајање парних котлова се састоје од напојних пумпи, које се данас редовно производе као електропумпе и турбопумпе; у склоп тог дела помоћних уређаја улазе

напојни цевоводи, сигурносна и погонска арматура и вешења цевовода. Напајање се регулише у склопу регулације парног котла. Сигурно снабдевање парног котла напојном водом је најбитнији услов сигурности погона и зато постоје врло строги прописи о изградњи и величини напојних пумпи (TRD – Technische Regeln für Dampfkessel). [2]

Постројење за транспорт и припрему горива се састоји од низа транспортних уређаја зависно од врсте горива (чврсто, течно или гасовито гориво), као и о конкретним смештајним условима парних котлова, његових помоћних уређаја и котловског постројења у целини. Постројења за транспорт и припрему горива чине у котловским постројењима, а нарочито код чврстих горива, сложено и велико постројење.

Уређаји за чишћење димних гасова, односно чистачи (филтери) димних гасова могу бити изведени на основи механичког одвајања честица пепела, тј. деловањем центрифугалне силе на честице пепела у димним гасовима, или као електрофилтери на основу деловања електростатичког електрицитета. Садашње врсте таквих уређаја деле се на четири групе: [1]

- 1) механички-суви филтери,
- 2) механички влажни филтери,
- 3) електросуви филтери,
- 4) електровлажни филтери.

Употреба појединих филтера примењује се према захтевима којима се постављају квалитети чишћења димних гасова од пепела.

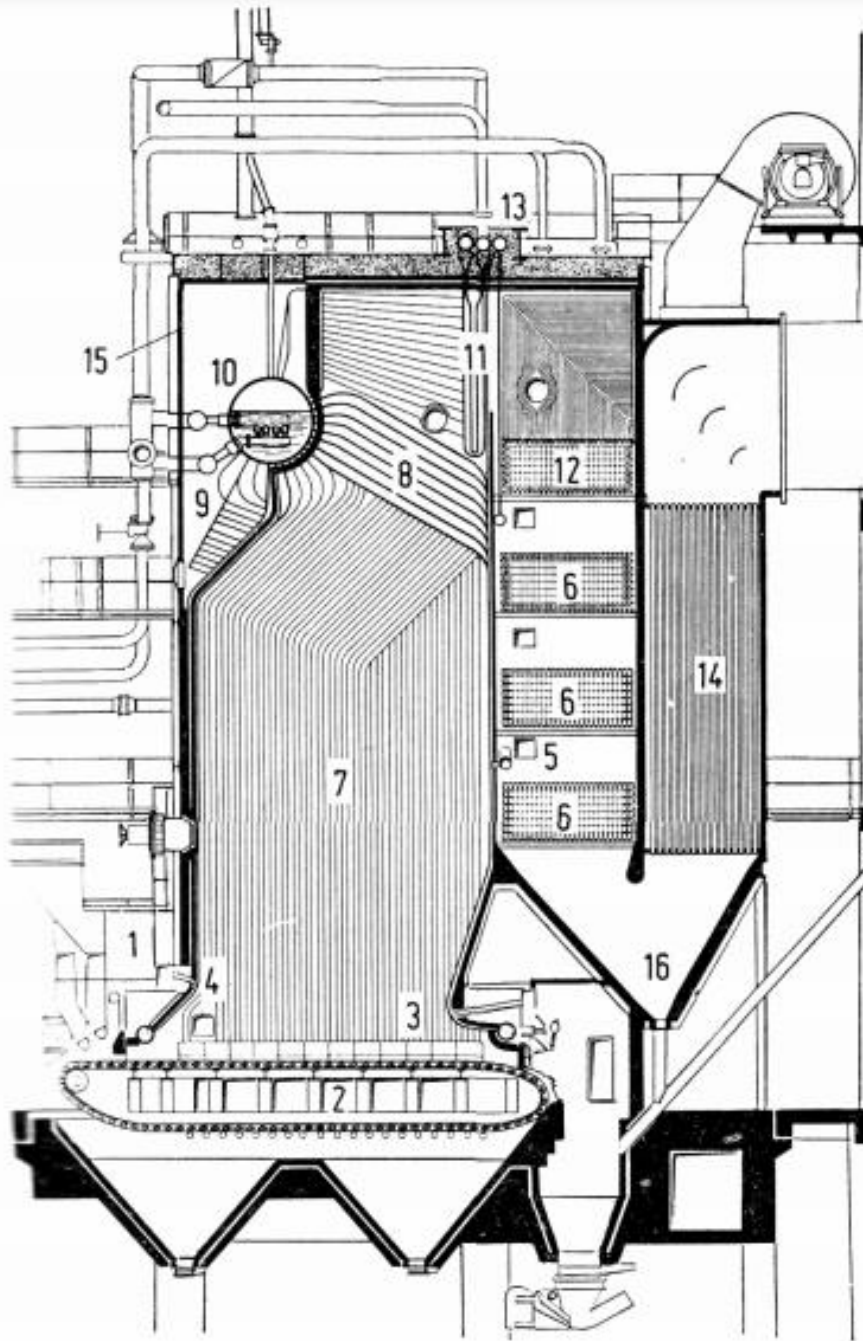
Уређајима за одвод шљаке и пепела се одстрањују и одводе шљака, пепео и остале баластне материје из ложишта парних котлова. Могу се поделити као механички, хидраулички и пнеуматски уређаји.

За исправан рад и погон парних котлова уграђује се опрема и уређаји за инструментацију, управљање, регулацију и аутоматику. Основни задатак те опреме је следећи: [1]

- 1) ускладити доведену енергију у облику горива са потребном топлотном енергијом коју производи парни котао;
- 2) ускладити односе горива и ваздуха да процес сагоревања у ложишту парних котлова буде најповољнији;
- 3) одржавати притисак у ложишту сталним у свим погонским условима;
- 4) одржавати температуру прегрејања паре сталном;
- 5) одржати сигурно снабдевање напојном водом.

1.5 Принцип рада парног котла

Генератор паре приказан на слици 7. изведен је са ложиштем за сагоревање горива у слоју.



Слика 7. Парни котао са равном механичком решетком [1]

Угаљ се налази у бункеру (1); у ложишту је уграђена механичка равна решетка (2) са доводом ваздуха. У ложишту је уграђена и огревна површина испаривача (7), где се топлота мења зрачењем. Други део огревне површине испаривача изведен је у облику снопа цеви (8), где се топлота мења делимично зрачењем а делимично конвекцијом. Огревне површине прегрејача паре изведене су у два дела у облику цевног водоравног (12) и усправног (11) снопа цеви (цевне змије). Између оба дела уграђен је регулатор прегрејања паре (13). Грејач воде изведен је од 3 снопа водоравно положених цевних змија

(6). Иза грејача воде у току струјања димних гасова смештен је цевни грејач ваздуха (14). Димни гасови излазе након трећег вода из генератора паре у атмосферу односно у чистач димних гасова. Ложиште је изведено са предњим (4) и задњим сводом (3) за осигурање правовременог паљења горива и правилног одвијања процеса сагоревања.

Напојна вода улази у грејач воде (6) генератора паре преко коморе (5). Из грејача воде (6) загрејана вода улази преко водова у бубањ (10) који служи за одвајање воде и водене паре (природни проток). Из бубња на најнижем месту спушта се вода силазним цевима (9) у коморе смештене у ложишту, а узлазним цевима, које чине површину испаривача (7), мешавина воде и водене паре диже се у бубањ, где се одвајају фазе воде и водене паре. У сакупљачу и одвајачу пепела (16) делимично се одваја пепео (веће честице) из димних гасова. Челична конструкција и галерије генератора паре (15) изведене су од нормалних челичних профила. [1]

1.6 Горива и припрема воде

Горивом се назива свака материја која кад се запали брзо сагорева развијајући топлоту, дакле свака она материја која у себи има елементе са којима ће кисеоник из ваздуха ступити у хемијску реакцију и образовати хемијско једињење путем брже оксидације пропраћене стварањем топлоте. Да би се те материје пимењивале у индустрији као горива: [6]

- 1) морају постојати у великим количинама,
- 2) морају бити јефтине,
- 3) морају бити погодне за ложење у ложиштима,
- 4) морају својом чврстином омогућавати транспортовање на велике даљине,
- 5) морају бити способне за магационисање (да дужим стајањем на ваздуху не мењају свој облик и састав и да не подлежу самозапаљењу).

Поред тога, корисно је, ако се лако пале, и то већ на температуре од 300 °C до 400 °C, и да су производи његовог сагоревања нешкодљиви по људе, животиње и постројења. Ове услове задовољавају следеће материје: дрво, слама жита, кукурузна саша, угаљ, природни гас итд. Међутим, материје које сагоревају нагло (тренутно), тј. експлозивно (бризантно), не спадају у горива јер сагоревају сувише брзо, поред тога су скупе и опасне због експлозије (праскави гас). Исто тако не спадају у горива ни материје код којих је оксидација врло спора, на пример рђање гвожђа.

1.6.1 Подела горива

Горива делимо према њиховом агрегатном стању на чврста, течна и гасовита. Према начину њиховог постанка и добијања делимо их на природна и вештачка. Индустријско гориво налази се у природи у три агрегатна стања: чврстом, течном и гасовитом.

Природна горива - Горива биљног и животњског порекла, створена природним процесима која се налазе непосредно у природи, називају се природна.

Вештачка горива - Ова горива добијају се из природних горива помоћу механичких и хемијских процеса, односно добијају се из природних горива када се из њих искористе најкориснији потребни састојци.

Оплемењивање горива - представља у ствари вештачко припремање горива добијених од лошијих, понекад неупотребљивих, природних горива. На пример, добијање брикета из угљене прашине од ситног неупотребљивог угља. Притом је целокупним процесом обухваћено сушење, чишћење, дробљење, пресовања и формирање одређеног облика горива, с тим да се том приликом не мења хемијски састав горива употребљеног у процесу оплемењивања. [6]

Сува дестилација - је процес добијања вештачког облика горива, при коме се врши темељно разлагање првобитне материје да се на крају као резултат не добије, с једне стране, гориво које садржи скоро чист угљеник (дрвени угаљ, кокс итд.), а, с друге стране, гасовити потпуни и непотпуни производи сагоревања (тер и др.). [6]

Гасификација - је процес при коме се чврсто гориво потпуно претвара у гасовито (генераторски гас).

Дестилација - је начин добијања из течног горива разних врста вештачких горива (дестилати фракционе дестилације нафте).

Природна горива

Природна чврста горива - ова горива се деле претежно на примарна и секундарна. [6]

Примарна чврста горива су производи биљног света и при њиховом сагоревању производи се топлота која се може искористити. Овде долазе све дрвенасте биљке (листопадно, четинарско дрвеће, жбунасте биљке и др.), влакнасте биљке (слама, сено, трава и др.), разни отпатци који се јављају при преради ових и других биљака у привреди и разним индустријским постројењима (коре дрвета, љуске сунцокретних семенки и др.), ова врста горива се стално обнавља и тиме ствара неисцрпне врсте горива. [6]

Секундарна природна чврста горива постала су од примарних природних чврстих горива процесом угљенисања, који је трајао дуги низ година, чак векова, и који још и данас траје. У ову врсту горива спадају тресет, мрки угаљ (лигнит), камени угаљ и натрацит. Ова горива се ваде из земље и зато се још називају фосилним минералним горивима. Ова врста горива представља огромну, али исцрпљиву резерву горива. [6]

Природна течна горива - овде спада земно уље (нафта). [6]

Природна гасовита горива - у ову врсту горива долазе природни земни гас, трули гас, барски гас итд.

Вештачка горива

Вештачка чврста горива - ова горива добијају се из природних лошијих и понекад неупотребљивих горива процесима оплемењивања и суве дестилације. Први процес састоји се у сушењу, чишћењу, дробљењу, пресовању (брикет) или млевењу (угљена прашина); притом се не мења хемијски састав горива узетог на прераду. У ову групу улазе

брикет (добитен пресовањем тресета лигнита, мрког и каменог угља, полу кокса и њихових коксова), берцит, карбурит и, најзад, угљена прашина (фино млевени прах од разних врста угља). Пресовањем добитени брикет може да има завршни облик у виду цигле или пелета. Брикет у виду цигле омогућава лако слагање, али се пре употребе ломити, док брикет у виду пелета онемогућава лако слагање, али се пре употребе не мора ломити, већ се директно убацује у ложишни простор. [6]

Вештачка течна горива - ова су производ дестилације земног уља (нафте), која обухвата: чишћење, фракциону дестилацију и рефинацију нафте, при чему се добија сирови бензин (петролеум), моторно гасно уље, мазут и разна биљна уља и течне смоле добитене из чврстих горива. [6]

Вештачка гасовита горива - она се добитијају сувом дестилацијом природних чврстих горива (угља), при чему се добија светлећи гас, или газифакцијом, која обухвата потпуно претварање природног чврстог горива у гасовито (генераторски гас-ваздушни, водени, плави и мешани гас и гасови металуршких пећи).

1.6.2 Својства горива и елементарни састав горива

Гориво се у лабораторијама подвргава разним испитивањима којима се утврђује његов хемијски састав, настанак, топлотна моћ, брзина сагоревања, дужина пламена и сл.

Познавајући елементарни састав неког горива могуће је доста предвидети његова својства, топлотну моћ као и проценити оправданост његове примене као горива. Постоји уопштена једнакост за све врсте горива, уколико познајемо процентуални удео сваког елемента који у њему учествује: [6]

$$C (\%) + H (\%) + O (\%) + N (\%) + S (\%) + A (\%) + W (\%) = 100\% \quad (5)$$

где су:

C, H, O, N, S – симболи хемијских елемената,

A - минералне примесе,

W - влага.

Угљеник представља најважнију компоненту горива јер га процентуално има највише у њему и што се његовим сагоревањем ослобађа значајна количина топлоте. Водоник се обично у гориву јавља везан са другим елементима или у мешавини са њима. Ако је слободан онда се сједињује са кисеоником и образује воду. Кисеоник није гориви елемент, али потпомаже и омогућава сагоревање. Количина кисеоника у гориву смањује потребну количину кисеоника из ваздуха. Азот се у гориву налази у склопу сложених органских хемијских једињења. У гасовитим горивима има га много више него у чврстим и течним. Сумпор се у гориву може јавити у сагоривом и несагоривом облику. Присуство сумпора у гориву је непожељно. Оксиди сумпора у додиру са водом образују сумпорасту, односно сумпорну киселину, која делује корозивно на постројење и загађује животну средину. Минералне примесе у гориву отежавају сагоревање, смањују топлотну моћ горива,

повећавају трошкове транспорта и постројења и смањују његов радни век. Влага је непожељни састојак горива јер отежава сагоревање. Укупна влага која се јавља у гориву представља збир: грубе, хигроскопне и хемијски везане влаге. Груба (слободна) влага је последица квашења горива водом из спољашње средине. Лако се одстрањује из чврстог горива правилним складиштењем на сувом и промајном месту. Количина грубе влаге зависи од параметара влажног ваздуха: влажности, температуре и притиска; гранулације горива, начина складиштења и сл. Хигроскопна (везана) влага се налази у порама чврстог горива и капиларним адхезионим силама је везана за суву основу. Одстрањује се загревањем горива до 105 ± 30 °C. Хемијски везана влага налази се у гориву у облику хидроксилних група и може се одстранити само загревањем до јако високих температура (анхидрисање) или пак променом хемијске структуре самог горива. [6]

1.6.3 Топлотна моћ горива

Топлотна моћ горива је она количина топлоте које се ослобађа при потпуном сагоревању јединичне масе горива од кога је топлота добијена. Топлотна моћ горива се изражава у kJ/kg за чврста горива и течна горива или у kJ/nm³ за гасовита горива. Вода у продуктима сагоревања потиче од укупне влаге која постоји у гориву и воде настале сагоревањем водоника из горива (сваки масени удео водоника, везује осам делова кисеоника, стварајући 9 масених делова воде. [6]

С обзиром на топлотни ниво продуката сагоревања насталих приликом одређивања топлотне моћи разликујемо: [6]

- Горња топлотна моћ (H_g) представља количину топлоте која се ослобађа потпуним сагоревањем 1kg или 1nm³ горива, уз услов да се вода у продуктима сагоревања налази у течном стању. При овоме треба да буду задовољена следећа 2 услова: [6]

- 1) продукти сагоревања горива доведени су на температуру коју је гориво имало на улазу у процес сагоревања (200 °C);

- 2) угљеник и сумпор из горива сагорели су у CO₂ тј. SO₂, док до сагоревања азота није дошло.

- Доња топлотна моћ (H_d) представља количину топлоте која се ослобађа потпуним сагоревањем 1kg или 1nm³ горива, уз услов да се вода у продуктима сагоревања налази у парном стању. [6]

За практичне сврхе је меродавна доња топлотна моћ горива, јер при сагоревању горива у индустријским ложиштима продукти сагоревања одлазе у атмосферу са температуром вишом од 1000 °C, а са њима и вода у парном стању. [6]

- Израчунавање топлотне моћи из елементарног састава горива

Топлотна моћ се може одређивати експериментално сагоревањем припремљеног узорка или рачунски, на основу познатих података елементарне или хемијске анализе састава горива. За срачунавање горње топлотне моћи се углавном користе обрасци Друштва немачких инжењера (VDI-образац). Тако, на пример, у образац за чврста горива ушли су

они хемијски елементи који при оксидацији ослобађају топлоту (угљеник, водоник, сумпор): [6]

$$H_g = 340 \cdot C + 1420,5 \cdot (H - \frac{O}{8}) + 105 \cdot S \quad \frac{[kJ]}{[kg]} \quad (6)$$

Израчунате вредности су увек мање од експерименталних, а некад је та разлика већа и од 10%. У дрвету, које је органска супстанца сложене структуре, угљеник, водоник и кисеоник се налазе у оквиру угљоводоничних једињења. Водоник чије је присуство утврђено елементарном анализом, поред тога што улази у састав увек присутне влаге, улази у хидроксилне (ОН) групе. Такође, део кисеоника везан је са угљеником, односно азотом, а део је и у слободном стању. Учешће сумпора у дрвету је незнатно, тако да је његов утицај занемарен Имајући у виду наведене констатације, коригован је VDI образац (6) тако да се за срачунавање горње топлотне моћи за дрво предлаже израчунавање преко обрасца (7): [6]

$$H_g = 340 \cdot C + 1420,5 \cdot (H - \frac{O}{16}) \quad \frac{[kJ]}{[kg]} \quad (7)$$

Познавајући горњу топлотну моћ дрвета за доњу топлотну моћ би се користио образац:

$$H_d = H_g - r \cdot u \quad (8)$$

где су:

r – специфична топлота испаравања воде при нормалним условима [2500 kJ/kg].

u – масено учешће влаге у гориву.

1.6.4 Израчунавање топлотне моћи из хемијског састава горива

Уколико познајемо процентуално учешће хемијских једињења која сачињавају дрво, као што су: целулоза, лигнин и екстрактиви онда би се за израчунавање горње топлотне моћи могао користити образац:

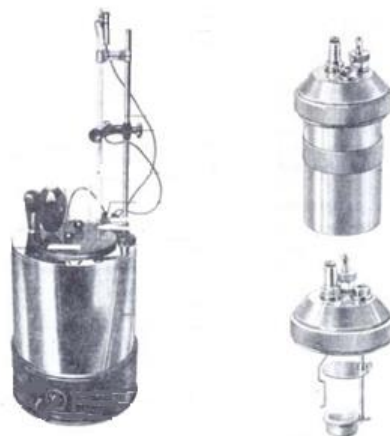
$$H_g = H_{gc} \cdot \frac{P_c}{100} + H_{gl} \cdot \frac{P_l}{100} + H_{ge} \cdot \frac{P_e}{100} \quad \frac{[kJ]}{[kg]} \quad (9)$$

где су: H_{gc} , H_{gl} , H_{ge} - просечне вредности горњих топлотних моћи: целулозе и њој сличних једињења (хемицелулозе и сл.), лигнина и екстарктива респективно. [6]

- Одређивање топлотне моћи уз помоћ калориметра

За егзактно одређивање горње топлотне моћи користе се експерименталне методе. При овом експерименталном одређивању се за чврста и течна горива користи калориметарска бомба, а за гасовита горива проточни калориметар. У првом случају се процес сагоревања одвија при сталној запремини, а у другом при сталном притиску. Припрема горива и поступци мерења прописани су српским стандардима (СРПС). Експериментална метода одређивања топлотне моћи чврстих горива (нпр. дрвног отпатка) заснива се на потпуном сагоревању одмерене количине горива при повишеном притиску. Количина топлоте

настала сагоревањем предаје се околном медију – води. Мерећи масу воде и њен пораст температуре и знајући специфични масени топлотни капацитет воде, може се, уз одговарајуће корекције за топлотне губитке, одредити настала количина топлоте. Дељењем ове количине топлоте, са количином горива од које је настала, добија се топлотна моћ. Спољни изглед калориметра са калориметарском бомбом приказан је на слици 8. [6]



Слика 8. Спољни изглед калориметра (лево) и калориметарска бомба (десно) [6]

1.6.5 Сагоревање горива

Под појмом сагоревања горива подразумева се брзо хемијско везивање горива, односно сагорљивих састојака у гориву (угљеника, водоника, итд.) са кисеоником из ваздуха, или, кратко речено, бурна оксидација горива, при чему се из горива ослобађа хемијски везана топлота. Дакле, један врло сложени физичко-хемијски процес, при коме се из горива ослобађа хемијски везана топлота, коју можемо замислити као резултат целокупног поступка везивања кисеоника са појединим сагорљивим састојцима горива. Сагоревањем горива добијамо продукте сагоревања (разне гасове) уз ослобађање топлоте и појаву светлости (пламен). Гориво у ложисту котла може да сагорева потпуно или непотпуно, што зависи од много фактора, као од расположиве количине ваздуха, односно кисеоника, врсте и типа конструкционе концепције самог ложишта и др. [6]

Под потпуним сагоревањем горива подразумевамо сагоревање његових основних горљивих елемената- угљеника (C) и водоника (H) у присуству довољне количине ваздуха (кисеоника O), којом се приликом добијају продукти потпуне оксидације ових елемената, тј. угљен-диоксид (CO_2) и водена пара (H_2O). [6]

Непотпуно сагоревање горива наступа у случају недовољне количине ваздуха, тј. кисеоника у току сагоревања, у том се случају у продуктима сагоревања јављају производи непотпуне оксидације угљеника тј. угљен-монооксида (CO), и разни други не сагориви састојци, односно једињења (угљоводоници), као на пример метан (CH_4) итд. [6]

Температуром паљења неког горива подразумевамо ону температуру до које треба загрејати гориво у присуству ваздух (кисеоника) да се оно само од себе упали и тиме

почне да сагорева; у том случају пламен страног топлотног извора, којим смо упалили гориво, постаје непотребан, јер се процес сагоревања сам од себе даље развија. [6]

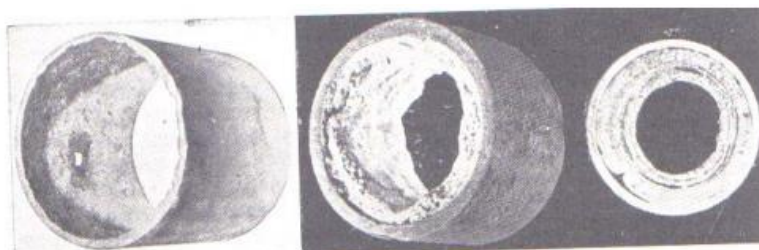
Да бисмо процес сагоревања горива проучили, потребно је да имамо податке хемијске анализе горива из којих сазнајемо састав горива. Но пошто је сагоревање горива уствари бурна оксидација, односно хемијско везивање горива са кисеоником из ваздуха, то морамо знати и састав атмосферског ваздуха, из кога узимамо кисеоник потребан за сагоревање. [6]

Сагоревање чврстог горива у ложишту обухвата неколико збивања, од којих је прво сусење горива, тј. издвајање грубе хигроскопне влаге горива, при његовом загревању до 100°C , затим дестилација угљоводоника загревањем горива до око 500°C . На овој температуре по дестилацији преострало гориво почиње да се пали и сагорева на тај начин сто се најпре угљеник (C) из горива спаја, односно сагорева, са кисеоником из ваздуха у угљен-моноксид (CO), који ће потом у ложишном простору сагорети у угљен-диоксид (CO_2), уколико у ложишту буде довољно вишка ваздуха, односно кисеоника, као и довољна температуре. По завршеној дестилацији угљоводоника на решетки ложишта остају усијани кокс (Cfix) и пепео (A). Кад је почело сагоревање, угљоводоници се распадају и пале на усијаном коксу истовремено са коксом сагоревају, тако да се при потпуном сагоревању у ложишном простору образују продукти сагоревања: водена пара (H_2O) и угљен-диоксид (CO_2). У продуктима сагоревања постоји још и азот (N_2) из ваздуха, који не сагорева. [6]

1.6.6 Припрема воде

Примесе које се јављају у води за напајање парног котла могу да буду углавном: [2]

- 1) механичке, са величином зрнца $0,1\ (\mu)$ (муљ глина и др.),
- 2) колоидне, са величином зрнца $0,1$ до $0,001(\mu)$ (масни састојци, уље и др.), који се могу задржати на филтру (пречистачу) од хартије,
- 3) растворљиве примесе, са величином зрнца испод $0,001\ (\mu)$ (разни гасови, разна хемијска једињења-карбонати и бикарбонати калцијума, магнезијума и натријума). Растворљиве примесе на вишим температурама образују такозвани котловски камен или котловац (слика. 2.)



Слика 9. Приказ пресека цеви са наслагама котловског камена [2]

Котловски камен може да изазове прегревање (деформисање, па чак и експлозију парног котла) котловског лима на тај начин што као лош спроводник топлоте спречава

преношење топлоте на воду у котлу преко котловског лима, који се споља загрева од врелих гасова услед сагоревања. Уколико су слојеви (наслаге) котловског камена дебљи, утолико је преношење топлоте слабије и циркулација у котлу воде неправилнија, а са тим у вези и потрошња горива већа. Затим, уколико је таложење котловског камена на површинама котловског лима неравномерније, утолико је напрезање самог лима неравномерније. Како усијани лим парног котла не може да издржи постигнути парни притисак, то се јако деформише, испупчи или прсне. Тврдоћа воде изражава се у степенима тврдоће. Тако нпр. један немачки степен тврдоће, који је код нас у примени, има вода чији један литар садржи 10mg калцијум-оксида (негашеног креча, CaO), или еквивалентну количину магнезијум-оксида (MgO) која износи 7,2mg. Обележава се са 1од. Поред немачког степена тврдоће постоји и француски, енглески и амерички. Укупна тврдоћа се може представити као збир карбонатне (несталне) и некарбонатне (трајне) тврдоће.

Несталну тврдоћу чине јони Ca^{2+} и Mg^{2+} који се налазе везани са бикарбонатима, а трајну – некарбонатну чине: сулфати, хлориди, силикати, и друге соли калцијума и магнезијума. При температурама до 200 °C и притисцима до 5 бара, карбонати који су присутни у води неће се интензивно издвајати и таложити. Међутим, када се вода изложи наглом загревању и порасту притиска, што је присутно код рада котловског постројења, нарушава се равнотежа (угљен-диоксид-карбонати-бикарбонати) и долази до распада бикарбоната и стварања карбоната. Ово се може приказати једначинама:



Издвајање карбонатног каменца почиње већ на 550 °C, а граница интензивног издвајања је око 650 °C. Некарбонатни каменац се издваја на знатно вишим температурама (преко 2000 °C), и такође представља опасност код котлова који раде на овим повишеним температурама. Да би се избегло стварање ове врсте котловског каменца, често се у циљу надокнаде губитака воде из котла, додаје термички обрађена вода, тврдоће испод 0,050 d и са минималном количином растворених гасова. [2]

1.6.7 Пречишћавање воде за напајање котлова

Поступак за удаљавање механичких примеса

Механичке примесе могу да буду органског или минералног порекла. Према својим специфичним тежинама у односу на специфичну тежину воде, механичке примесе могу да буду: пливајуће, лебдеће и тонеће. С тога се удаљују из воде: пропуштањем кроз сита, таложењем или филтрирањем. Који поступак ће се применити зависи од крупноће примеса и од њиховог поменутог понашања у води. За одстрањвање финих примеса користе се различити филтери направљени од дрвене вуне, шљунка, песка, кокса и сл. [2]

Поступак за удаљавање колодних примеса

Колоидне примесе су, поред других, силицијум-оксид (SiO_2), масти, уља. Силицијумоксид се одстрањује уз помоћ сулфата амонијака. Масти и уља се одстрањују асорпционим или електричним поступком. Асорпциони поступак подразумева додавање пахуљасте материје која ствара фину мрежу која при тоњењу повлачи ситне честице и таложи их на дну. Одатле се нечистоће одстрањују филтрирањем. Применом другог поступка се електричном струјом од финих честица масноће образују капи, које се из воде одстрањују филтрирањем. [2]

Поступак за удаљавање растворљивих примеса

Растворљиве примесе, као што смо видели, углавном су хемијска једињења: карбонати, бикарбонати, сулфати и хлориди калцијума, магнезијума и натријума. Ови хемијски састојци врло су штетни, јер карбонати нагризају корловске поврсине (кородирају), док бикарбонати образују котловски камен, који се у читавим слојевима нахвата на металним површинама. [2]

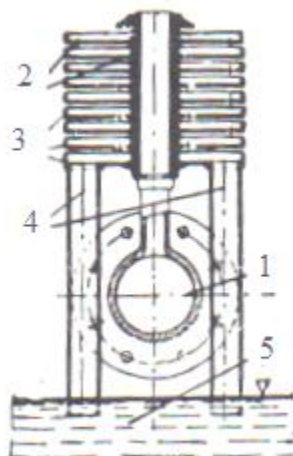
Поступак загревања воде – Загревањем воде преко 75°C до тачке кључања у нарочитим дегазаторима постиже се присилно одстрањење ваздуха и угљен-диоксида из воде, који су главни проузроковачи корозије металних површина.

Поступак дестилације воде – Овај поступак се састоји у томе сто се вода загрева до кључања, при чему се она испарава у нарочито конструисаним уређајима (такозваним испаравачима) да би се затим подвргла хлађењу и кондензовању. Дестилацијом се добија потпуно чиста вода, без соли котловског камена.

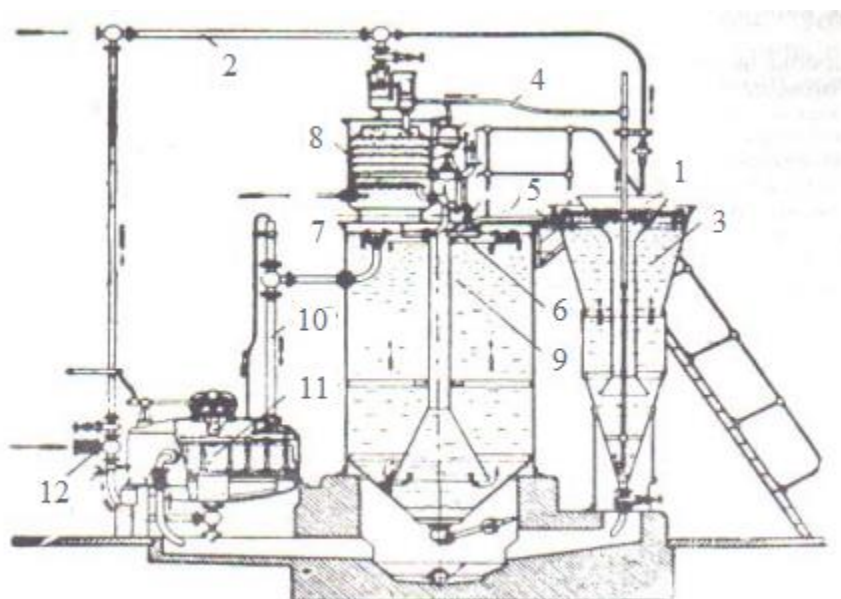
Поступак хемијског омекшавања воде – Овим поступком хемијског омекшавања воде постиже се одстрањење укупне тврдоће напајане воде, тј., хемијских једињења: бикарбоната, карбоната, сулфата и хлорида калцијума и магнезијума, из воде за напајање парног котла, осим тога неутралише се слободни угљен-диоксид у сировој води коју омекшавамо.

Поступак таложења- обухвата издвајање карбоната калцијума и магнезијума из воде употребом хемијских једињења, као што су кречно млеко ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), сода (Na_2CO_3) и љута сода (NaOH).

Поступак размене - за омекшавања воде за напајање парног котла нашао је широку примену, а састоји се у томе што се вода пропусти кроз специјални филтер (пречистач). Овај филтер се састоји из материје пермутит, која је уствари вештачки створена (синтетичка) материја и одликује се јако порозном структуром и великом унутрасњом активном површином. [2]



Слика 10. Шематски приказ уређаја за омекшавање котловске воде поступком загревања: 1-доводна цев за воду, 2-отвори за отицање воде, 3-ребра за таложење котловског камена, 4-цев за одвод воде, 5-водени простор парног котла. [2]



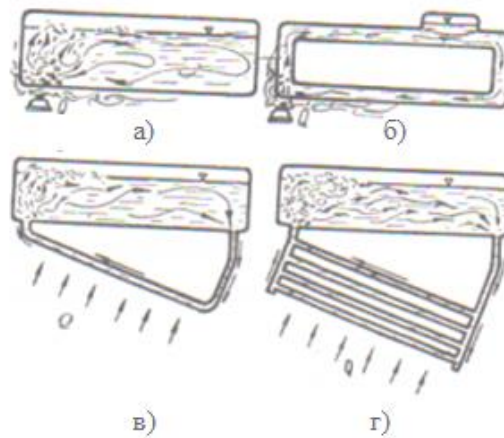
Слика 11. Шематски приказ уређаја за омекшавање котловске воде хемијским поступком помоћу комбинације креча и соде: 1 – суд за кречно млеко, 2- цев за довод воде, 3 – суд за воду, 4 – цев за довод растворене воде, 5- цев за спровођење воде, 6- суд за мешање растворљиве соде са водом, 7- цев за довод растворљиве воде, 8 – суд за растварање соде, 9 – суд за воду, 10- цев за спровођење воде, 11 – брзи филтер, 12 – цев за спровођење воде у парни котао [2]

У припреми воде за напајање котла као код подстаница централног грејања често се користе јонски размењивачи. Ипак ово решење, поред својих бројних предности, изискује значајна улагања и велике експлоатационе трошкове. С тога се јонски размењивачи обично не користе за потпуно уклањање тврдоће воде, већ за омекшавање до нивоа од 6 до 80 d. То се постиже употребом система са ручним или аутоматским обилазним водом, тако

што се иза омекшивача меша потпуно омекшана вода, која је пропуштена кроз уређај, са водом која није третирана. Велика мана оваквог решења је та што се регенерација може аутоматизовати, али је допуњавање сољу увек ручно и захтева редовно ангажовање радне снаге. Годишњи трошкови за набавку соли могу бити знатни, што свакако смањује употребљивост ове веома поуздане методе. Омекшавање воде може се спровести магнетима тако што се они поставе око цеви, у цев, или се у цевовод уграде уређаји са магнетима у сопственом кућишту. Ово последње решење је и најбоље, јер се показало да се једино на тај начин вода може изложити довољно јаком магнетном пољу које може да произведе жељене ефекте омекшавања. Молекули воде почињу да вибрирају под утицајем Лоренцове силе коју ствара магнетно поље у уређају. Ове вибрације доводе до одвајања микрочестица које су биле везане за молекуле воде. Тако ослобођене микрочестице сада привлаче честице калцијума и тиме их спречавају да се издвајају и таложе на храпавим и загрејаним површинама. Употребом магнетног поступка се не смањује тврдоћа воде већ се смањује афинитет карбоната ка издвајању у облику наслага на зидовима цеви и котловског агрегата. Магнетни третман повољно утиче и на карбонатну и на некарбонатну тврдоћу, па је с тога погодан и код котловских постројења и код инсталација даљинског грејања. [2]

1.6.8 Циркулација воде код парног котла

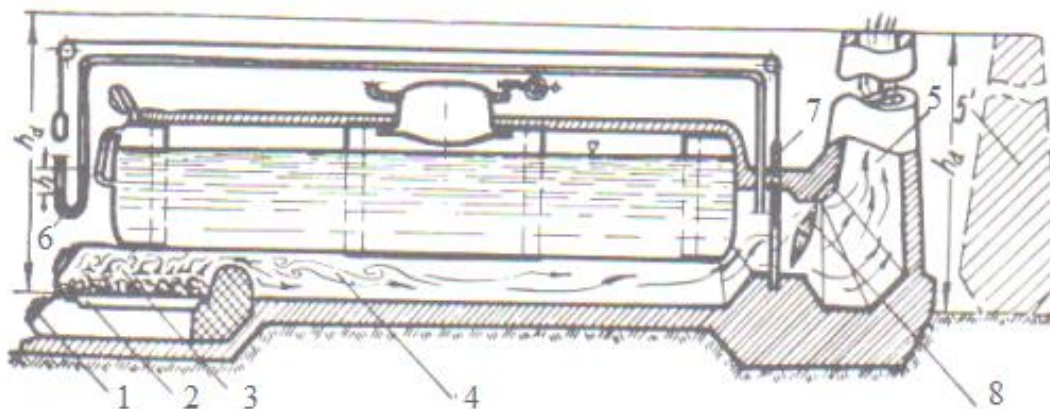
Топлота којом се котло загрева претвара воду у водену пару; на тај начин постоје у самом котлу, односно његовој води, на појединим местима подручја испуњена водом, а на појединим местима подручја испуњена смесом воде и водене паре. Услед тога постоје разлике у специфичним тежинама флуида ових подручја, чиме се изазива циркулација (кретање) воде и паре у котловском простору. При том специфички лакше масе мешавине воде и водене паре врше кретање (од дна котла на месту његовог загревања) према горе, док теже масе чисте воде струје надоле (слика 12.). [2]



Слика 12. Струјање воде: а - струјање воде при њеном загревању у суду, б - струјање воде при њеном загревању у цеви, в - струјање воде при њеном загревању у нагнутој цеви, г - струјање воде при њеном загревању у нагнутим цевима. [2]

1.6.9 Промаја код парног котла

Пошто је потпуно сагоревање неког чврстог горива на решетки парног котла потребна велика количина ваздуха (L), то је потребно обезбедити пролаз ове количине ваздуха кроз процепе на решетки и кроз слој горива на њој ради уласка у ложишни простор, у ком циљу се мора остварити разлика притиска ваздуха у пепеонику (p_p) и притиска у лозисту, ложишном простору (p_l). Разлика притисака ($p_p - p_l$) омогућава долазак свежег ваздуха у ложишни простор, односно она омогућава кретање ваздуха довољном брзином да довољно ваздуха буде у сваком моменту за потпуно сагоревање горива у ложишту. [2]



Слика 13. Шематски приказ уређаја за мерење природне промаје код парног котла помоћу депримометра: 1-врата на пепеонику, 2-штап решетке, 3-ложишни простор, 4-димни канал, 5- димњак, 6-депримометар, 7-засун, 8-приклопац. [2]

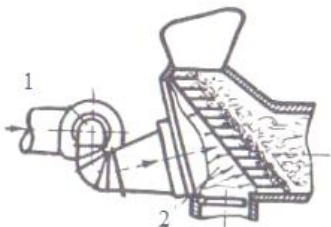
Природна промаја

При сагоревању горива у ложишном простору, димњак је стално испуњен врелим продуктима сагоревања, чија је температура твгс обично $180-300\text{ }^{\circ}\text{C}$; ови гасови, као топлији, увек су разређенији и отуда лакши од спољног, хладног и гушћег ваздуха, чија је температура (t_v) приближно $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (просечна годишња вредност за наше крајеве). Према томе, тежина стуба продукта сагоревања у димњаку увек је мања од тежине стуба спољашњег ваздуха, чија је висина једнака висини димњака (h_d). тада разлика тежина продукта сагоревања и спољњег ваздуха ствара промају, те се на тај начин врели продукти сагоревања пењу, као лакши, горе, остављајући за собом у димњаку све већу разређеност (депресију); због те разлике притиска спољашњи хладан ваздух улази извесном брзином струјања кроз пепеоник и процепе решетке, као кроз сам слој горива у ложишни простор. Из предњег се закључује да ће промаја бити боља, јача, што је димњак виши и што су продукти сагоревања у димњаку загрејанији, тј. веће температуре. [2]

Вештачка промаја

Вештачка промаја може се добити углавном удувавањем ваздуха под притиском испод решетке ложишта, у ком се случају ради о такозваној доњој промаји. Ако се, пак, врели

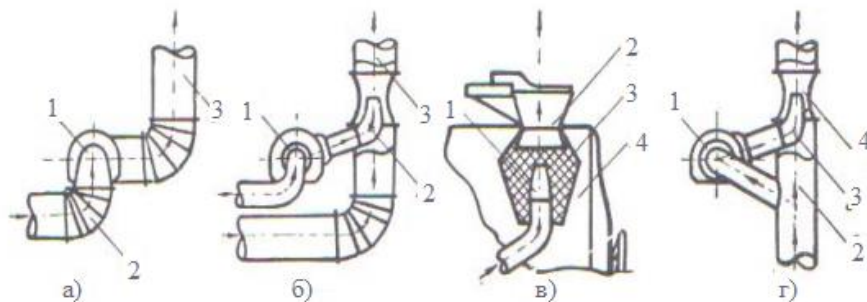
гасови од сагоревања директно, индиректно или комбиновано убацују под дејством снажних вентилатора или ејектора, тиме се ствара вештачка депресија у ложишном простору и омогућује улазак свежег спољашњег ваздуха, тада се ради о вештачкој промаји помоћу сисања. [2]



Слика 14. Шематски приказ уређаја за остваривање вештачке промаје у херметички затвореном пепеонику под притиском: 1-вентилатор, 2-решетка ложишта. [2]

Промаја помоћу сисања

Промаја помоћу сисања добија се дејством снажних вентилатора, који директно, индиректно или комбиновано (директно и индиректно заједно) усисавају вреле гасове од сагоревања из излазног канала котла (слика. 70), или, пак, из димног канала; усисане гасове вентилатор потискује у такозвани дифузор (кратка метална цев дузине 1.0-1.5 метара), која својим постепеним ширењем пресека омогућује претварање брзине врелих гасова у притисак. [2]



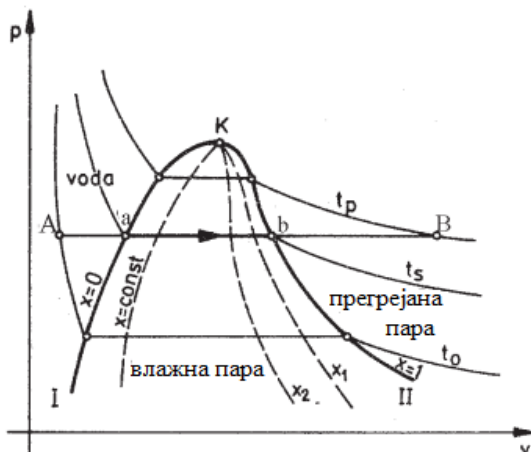
Слика 15. а) Шематски приказ уређаја за остваривање вештачке промаје са директним сисањем: 1-вентилатор, 2-димни канал, 3-димњак; б) Шематски приказ рада инсталације вештачке промаје са индиректним сисањем на стабилним котловима: 1-вентилатор, 2-конус, 3-дифузор; в) Шематски приказ рада инсталације вештачке промаје са индиректним сисањем на локомотивским котловима: 1-конусни део ињектора, 2-дифузор, 3-димњача, 4-искорхватач; г) Шематски приказ рада инсталације вештачке промаје са комбинованим сисањем: 1- вентилатор, 2-димни канал, 3-конусни део ињектора, 4-дифузор. [2]

2 ПРЕГРЕЈАЧИ ВОДЕНЕ ПАРЕ

2.1 Водена пара – величине стања влажне и прегрејане водене паре

Пара је реалан гас близу стања кондензације, који знатно одступа од идеалног гаса. Од свих пара најзначајију улогу у термотехници има водена пара. Водена пара се користи као радно тело у парним моторима и као грејни флуид у многим топлотним уређајима. Посебно је значајно што нема штетно дејство на живе организме и животну околину. Како поседује релативно добре термодинамичке особине водена пара је од свих других пара нашла највећу практичну примену. Водена пара се добија испаравањем воде при сталном притиску у специјалним затвореним судовима, тзв. парним котловима. [7]

Начин добијања водене паре може принципијелно да се прикаже у p - v - дијаграму на слици 16. Нека је $p = \text{const}$ радни притисак у котлу у којем се загрева вода, од почетне температуре t_0 (тачка А) до температуре кључања t_c при датом притиску, тзв. температура засићења (тачка а на доњој граничној кривој К-I). Температура засићења зависи од природе супстанце и расте с повишењем притиска. Притисак који одговара температури засићења назива се притисак засићења p_s . Пара која се налази у равнотежи са својом течносту назива се засићена пара. Премда се радном телу непрекидно доводи топлота процес испаравања, који је почео у тачки а при температури t_s , одвија се при сталном притиску p_s и сталној температури t_s све до тачке б на горњој граничној кривој К-II. Количина топлоте која је потребна да се изврши промена фазе дате супстанце назива се латентна топлота испаравања. Између граничних кривих систем је двофазни, тј. постоји смеша кључале течности (воде) и суве (водене) паре, тзв. влажне паре. У тачки б по завршетку испаравања, пара више не садржи течност тако да се назива сувозасићена пара. Даљим довођењем топлоте, почев од тачке б, долази до прегрејавања водене паре све до неке, тзв. температуре прегрејавања t_p (тачка В), која је одређена количином топлоте доведене воденој пари на делу б-В линије процеса прегрејавања. [7]



Слика 16. Добијање водене паре [7]

У двофазном систему, тј. области влажне засићене паре, стање влажне паре је дефинисано притиском (или температуром) и саставом смеше. Састав смеше је одређен тзв. степеном сувоће x : [7]

$$x = \frac{m_p}{m_s} = \frac{m_p}{m_p + m_v} \quad \frac{[\text{kg pare}]}{[\text{kg smeše}]} \quad (12)$$

где је:

m_p – маса суво засићене паре,

$m_s = m_p + m_v$ – маса смеше, тј. влажне засићене паре, а

m_v – маса воде, односно течности од које је добијена пара.

На доњој граничној кривој постоји само течна фаза ($m_p = 0$, $x = 0$), на горњој граничној кривој постоји само суво-засићена пара ($m_v = 0$, $x = 1$), а у двофазној области обе фазе ($0 < x < 1$). [7]

Из (12) следи да се у 1 kg влажне паре налази x kg суво-засићене паре и $(1-x)$ kg воде која кључа. Величина $(1 - x)$ се често назива степен влажности водене паре. По договору се величине стања воде која кључа (на доњој граничној кривој) означавају са ”прим”, а суво-засићене паре (на горњој граничној кривој) са ”секунд”. Притисак и температура се током процеса испаравања не мењају тако да се не означавају индексима ”прим” и ”секунд”. [7]

Да би се одредила потребна количина топлоте за загревање воде од t_0 до t_s , затим топлота за испаравање воде-латентна топлота испаравања, као и количина топлоте потребна за прегрејавање паре од t_0 до t_p , неопходно је да се одреде промене величина стања Δu , Δh и Δs водене паре. Величине стања кључале воде, суво-засићене паре и прегережане паре у зависности од притиска или температуре, дате су у таблицама за водену пару. У практичним термодинамичким прорачунима се узима да је почетно стање воде дефинисано температуром $t_0 = 0^\circ\text{C}$. По договору су вредности унутрашње енергије u , енталпије h , и ентропије s при овој температури једнаке нули, тј. $u_0 = 0$, $h_0 = 0$, $s_0 = 0$. [8]

Вредност унутрашње енергије воде у стању кључања одређује се на основу израза: [8]

$$u' = h' - pv' \quad (13)$$

а у стању суво-засићене паре на основу израза: [8]

$$u'' = h'' - pv'' \quad (14)$$

Латентна топлота испаравања, на основу првог принципа термодинамике $\delta q = dh - vdp$, одређује се на основу израза: [8]

$$r = \Delta h = h'' - h' \quad (15)$$

Релација на основу које може да се одреди латентна топлота испаравања на основу табличних података за унутрашњу енергију и специфичну запремину: [8]

$$r = (u'' - u') + p \cdot (v'' - v') \quad (16)$$

Како је $dS = \delta q/T$, промена ентропије при испаравању дата је изразом: [8]

$$s'' - s' = \frac{qp}{T_s} = \frac{r}{T_s} \quad (17)$$

где је T_s температура кључања воде при датом притиску. Показује се да се током процеса испаравања највећи део топлотне енергије ($\sim 80\%$) троши на повећавање унутрашње енергије система а мањи део на спољашњи рад ширења. [8]

Величине стања влажне паре

Стање влажне паре одређено је притиском (или температуром) кључања и степеном сувоће x , тј. количином суве паре у влажној пари. Величине које дефинишу стање влажне паре су екстензивне величине тако да поседују својство адитивности па се одређују на основу познатих величина стања на граничним линијама за дати притисак, тако што се величине стања суве водене паре помноже степеном сувоће x и саберу са одговарајућим величинама стања воде у стању кључања помножене са тзв. степеном влажности $1 - x$. [9]

Тако се, на пример, специфична запремина, енталпија, ентропија и унутрашња енергија влажне паре одређују на основу следећих израза, респективно: [9]

$$v_x = hv'' + (1 - x) \cdot v' = v' + x \cdot (v'' - v') \quad (18)$$

$$h_x = xh'' + (1 - x) \cdot h' = h' + x \cdot (h'' - h') = h' + rx \quad (19)$$

$$s_x = xs'' + (1 - x) \cdot s' = s' + x \cdot (s'' - s') = s' + \frac{rx}{T_s} \quad (20)$$

$$u_x = xu'' + (1 - x) \cdot u' = u' + x \cdot (u'' - u') \quad (21)$$

Степен сувоће може да се одреди на основу горњих израза или: [9]

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{h_x - h'}{h'' - h'} = \frac{u_x - u'}{u'' - u'} = \frac{s_x - s'}{s'' - s'} \quad (22)$$

Прегрејана пара је таква пара која има при датом притиску вишу температуру (или специфичну запремину) од температуре (или специфичне запремине) суво-засићене паре. Прегрејана пара се добија довођењем топлоте, а тиме и повишењем температуре ($T > T_s$), сувој пари при константном притиску у посебном уређају, тзв. прегрејачу при чему се повећава специфична запремина паре. У котловском уређају-прегрејачу температура прегрејане водене паре достиже вредност до око 6000°C . Прегрејана пара се знатно разликује од суве и влажне паре и приближава се својствима гасова. Што је температура прегрејане паре виша то се она све више приближава идеалном гасу. [9]

С обзиром на сложеност, а тиме и непогодност за практична израчунавања до сада предложених, (од стране различитих аутора) једначина стања прегрејане паре, величине стања (v , h , s и u) прегрејане паре се одређују на основу измерених величина стања и коришћењем одговарајућих таблица или i, s - и i, T -дијаграма, добијених на основу полуемпиријских једначина стања за прегрејану пару. [9]

Количина топлоте која је потребна да се 1 kg суве паре при константном притиску прегреје од температуре t_s до температуре t_p , тзв. топлота прегрејавања q_p , износи: [9]

$$q_p = \int_{T_s}^{T_p} C_p dT = \overline{C_p} \cdot (T_p - T_s) \quad (23)$$

где је C_p масена специфична топлота прегрејане паре при сталном притиску, а $C_p dT$ њена средња вредност у датом температурском интервалу. Зависност $C_p = C_p dT$ је сложена, али за јако прегрејану пару је приближно линеарна. Подаци за C_p дају се у одговарајућим табелама. Топлота прегрејавања може да се одреди на основу познатих вредности других термодинамичких параметара: [9]

$$q_p = \Delta u + p \Delta v = (u - u'') + p \cdot (v - v'') = h - h'' \quad (24)$$

На основу претходног, унутрашња енергија прегрејане паре може да се одреди на основу израза: [9]

$$u = h - pv = u'' - p \cdot (v - v'') + q_p \quad (25)$$

На основу израза (24) и (25), енталпија прегрејане паре може да се одреди коришћењем следеће релације: [9]

$$h = h'' + q_p = h'' + \overline{C_p} \cdot (t_p - t_s) \quad (26)$$

или на основу израза: [9]

$$h = u + pv \quad (27)$$

Ентропија прегрејане паре може да се одреди на основу израза: $ds = \delta q/T = C_p dT/T$, тако да је: [9]

$$s - s'' = \int_{T_s}^{T_p} ds = \overline{C_p} \int_{T_s}^{T_p} \frac{dT}{T} = \overline{C_p} \ln \frac{T_p}{T_s} \quad (28)$$

2.2 Карактеристике прегрејача водене паре

2.2.1 Појам прегрејача водене паре

Прегрејач паре је грејна површина котлова који производе прегрејану пару. Служи за прегревање паре од сувозасићене до прегрејане. При том се врши и сушење паре. Грејна површина прегрејача паре се састоји од система глатких цеви, змијасто савијених, смештених у ложиште или гасни канал иза ложишта. [8]

Код савремених већих котлова прегрејачи се састоје од већег броја степена. У зависности од начина предаје топлоте од продуката сагоревања грејним површинама могу бити – озрачени, полуозрачени и конвективни. Прегрејачи паре због високог притиска и температуре паре и гасова у каналу спадају у најоптерећеније грејне површине. Због тога је важно правилно изабрати материјал цеви. [8]

Грејна површина се израђује од челичних глатких цеви савијених у змије или од ливених ребрастих цеви. Грејне површине загрејача воде, испаривача и прегрејача паре су спојене колекторима и цевима и заједно чине водено-парни тракт котла. [9]

Вода која се доводи котао се претходно загрева, издувним гасовима пре него што они оду у атмосферу.

2.2.2 Врсте прегрејача паре и њихове функције

У било ком котлу водена пара напуста воду и прелази у простор за пару. Код ватроцевних котлова пара формирана око водене површине је увек засићена и не може постати прегрејана у котлу јер је у контакту са воденом површином. Да би пара постала прегрејана мора проћи кроз прегрејач паре. [8]

Ово је обични измењивач топлоте који додатну топлоту предаје пари. Прегрејач паре је елемент котла где се дешавају разни физичко-хемијски процеси у металу везани за деловање високих температура, агресије димних гасова, пепела и напрезања при том проузрокујући: [9]

- 1) пузање,
- 2) корозију (напонску, водоничну),
- 3) ерозију (пепелом, паром, и др.).

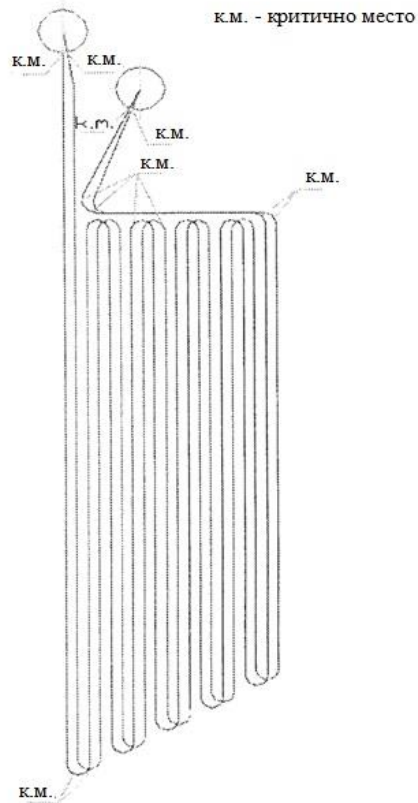
Прегрејачи паре догревају пару, а као резултат наведених деловања, настају следеће промене: [9]

- 1) пузне промене,
- 2) структурне промене (старења),
- 3) напрезања-трошења (смањење дебљине зида).

Постоје различите методе испитивања, мерења и прорачуна који омогућавају детаљну процену стања метала прегрејача. Резултати дугогодишњег испитивања експлоатисаних елемената прегрејача показују да постоје оправдане могућности продужења њиховог рада. Треба истаћи да, истрошење метала који ради у температурама вишим од граничне температуре, проузроковано је истовременим деловањем напрезања и температуре, јер: [9]

- 1) под утицајем напрезања долази до физичког уништавања метала почевши од деформације зрна, пузећих празнина чак до укупног макро и микро пуцања,
- 2) под утицајем температуре појављују се промене у структури у виду свериодизације цементита, коагулације угљеника и друго.

Најранија оштећења на прегрејачу су ободне змијаче, колена (поготово колена мања од 2 д), заварени спојеви и рачве (означено на слици 17. са к.м.).

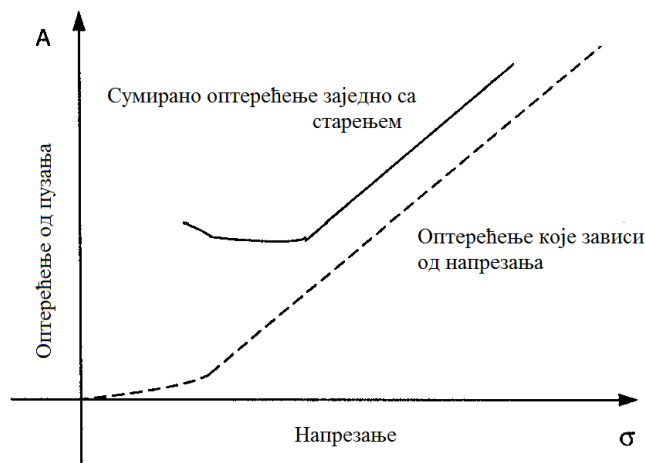


Слика 17. Змијасти прегрејач [9]

Оштећење елемената под утицајем деловања високе температуре и притиска у многоне зависе од броја промена и њиховог редоследа. Промене се најчешће појављују у трећој фази пузања, тј. онда када исцрпљење издржљивости прелази 50%. Међутим, у случају елемената под утицајем ниских напрезања о оштећењу одлучују структуралне промене зависне од времена и радне температуре метала (Слика 18). [9]



Слика 18. Деформација у функцији времена за разне напрезања [9]



Слика 19. Степен оштећења у функцији напрезања [9]

Да би утврдили степен исцрпљености змијастог прегрејача и његов преостли век експлоатације треба знати обрачунско и дозвољено време рада.

Обрачунско време рада t_o одређује се узимајући у обзир систематичан прираст температуре зида цеви и напрезања због прираста слоја угљеника на унутрашњи зид као и смањења дебљине зида цеви „змијаче“ (Слика 19). [9]

После прекорачења дозвољеног времена рада t_n повећава се могућност оштећења прегрејача. Преостало време издржљивости прегрејача t_i које се израчунава из формуле: [9]

$$t_i = t_n - t_r \quad (29)$$

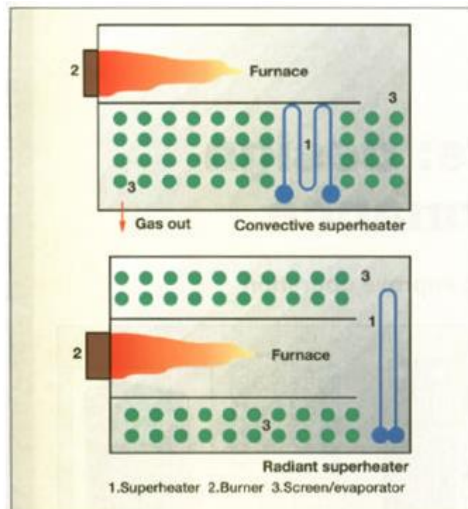
где је:

t_r – досадашњи број радних часова змијаче,

$$t_n = 0.8 t_o \quad (30)$$

Ово су теоретски обрачуни змијаче које би требало обухватити за време пројектовања.

На слици 20. је приказано типично место уградње прегрејача у парним котловима. Прегрејачи се у основи деле на радијационе и конвекционе, у зависности од њиховог положаја. [10]



Слика 20. Типично место уградње прегрејача у парним котловима[10]

Конвекциони прегрејач је заштићен од топлоте и пламена, док се радијациони налази на изласку из пећи под директим утицајем пламена. Осим тога што радијациони прегрејач захтева мању грејну површину, он има неколико недостатака у односу на конвекциони. [10]

Конвекциони прегрејач је смештен ван ударне линије пламена што му омогућава да врши хлађење гасова из горионика и такође обезбеђује да униформна мешавина гасова долази у прегрејач. Ово омогућава пројектанту да предвиди употребу прегрејача са много већом поузданошћу и прецизношћу.

Радијациони прегрејач је смештен у простору у коме гасови праве окрет, па је тако тешко предвидети уобичајени проток гаса преко цеви.

Радијациони прегрејач прима директно зрачење из горионика, што заузврат зависи од излазне температуре гаса. Уколико прецизно не предвидимо излазну температуру гаса, радиојациони топлотни флуks биће изван граница очекиваног, што се одражава на температуре паре и цеви.

Разликују се температурне карактеристике паре у ова два случаја. Радијациони апсорбује више енергије при нижим оптерећењима, док конвекциони то чини при вишим. [10]

3 ПРОРАЧУН ПРЕГРЕЈАЧА ПАРЕ ПАРНОГ КОТЛА

Пројектни задатак / поставка задатка

Извршити прорачун прегрејача паре парног котла чији су подаци дати у даљем тексту.

Поставка задатка:

Потребна количина горива за номинални режим рада:	$B_N=29.98 \text{ [kg/s]}$
Номинална продукција котла:	$D=180 \text{ [kg/s]}$
Притисак у прегрејачу паре:	$p_s=135 \text{ [bar]}$
Температура на излазу из прегрејача:	$t_s=550 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Притисак у међупрегрејачу паре:	$P_{mp}=44 \text{ [bar]}$
Температура на улаз у међупрегрејач:	$t_x= 547 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Степен искоришћења котла:	$\eta_k=85.13 \text{ [%]}$
Број турбина:	2

3.1 Количина топлоте размењене у прегрејачу паре

Прегрејач паре служи за превођење засићене водене паре у прегрејану водену пару, не мењајући јој притисак. Пара из добоша или пароскупљача струји кроз сноп змијастих цеви малог пречника, обично 20 – 40 mm. Ове цеви су изложене утицају врелих димних гасова. Прегревање водене паре врши се из више разлога:

- 1) пошто се прегревање врши при непромењеном притиску, порашће специфична запремина паре;
- 2) пошто је специфична запремина прегрејане паре већа, њена потрошња за погон парних турбина бити ће мања;
- 3) прегревањем водене паре повећава се њена енталпија, односно топлотни садржај, па она у одговарајућим машинама може да изврши већи рад;
- 4) експанзијом засићене водене паре образују се велике количине кондензата које ометају рад машина, што није случај с прегрејаном паром.

Количина топлоте прихваћене у прегрејачу паре се рачуна:

$$Q_s = D_1(h_s - h_x) \quad (31)$$

За номинални режим рада, количина топлоте износи:

$$Q_s^N = D_1^N (h_s - h_x) = 180 \cdot (3466,2 - 2562,2) = 162\,720 \text{ [kW]} \quad (32)$$

где је:

$h_s = 3466,2 \text{ kJ/kg}$ – енталпија паре на излазу из прегрејача и

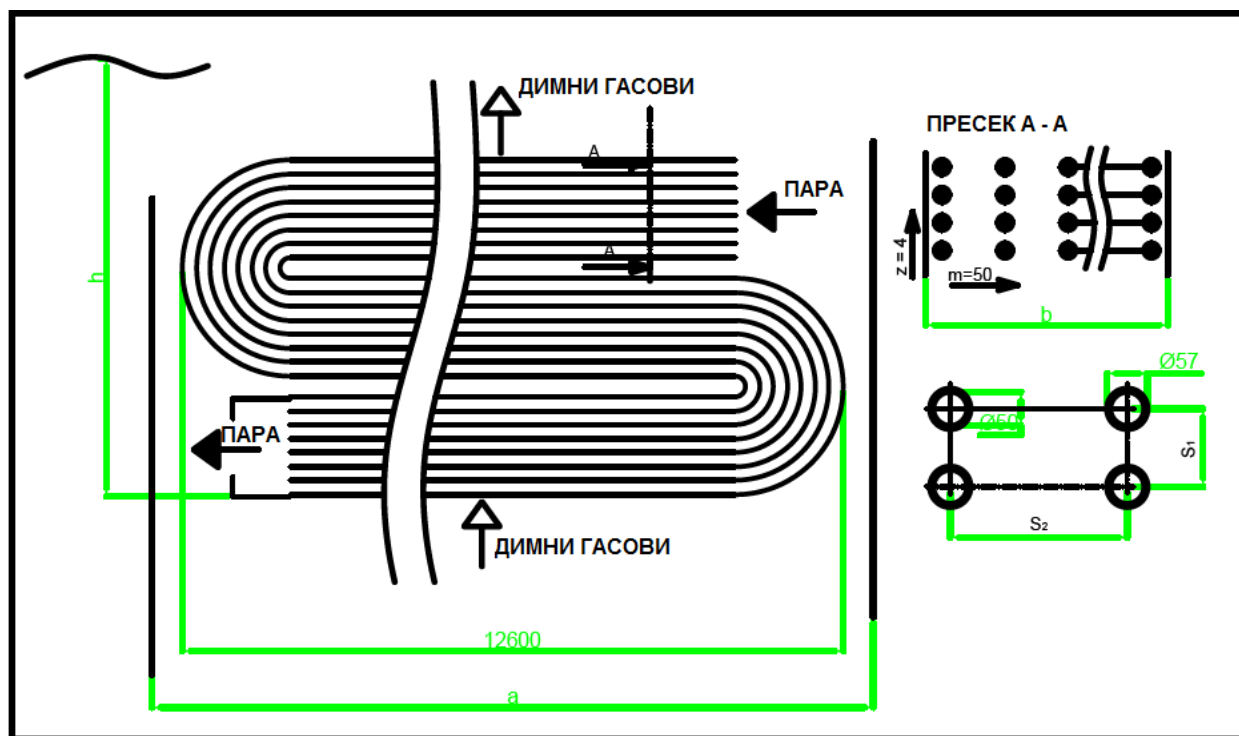
$h_x = 2562,2 \text{ kJ/kg}$ – енталпија паре на излазу из испаривача.

Будући да су усвојена два прегрејача паре, у сваком од њих се размени половина укупно размењене количине топлоте:

$$Q_{S1}^N = Q_{S2}^N = \frac{162\,720}{2} = 81\,360 \text{ [kW]} \quad (33)$$

3.2 Температура продуката сагоревања на улазу и излазу из прегрејача паре

3.2.1 Температура продуката сагоревања на излазу из прегрејача паре 2



Слика 21. Прегрејач паре 2

Табела 1. Подаци прегрејача паре 2

Прегрејач паре 2			
спољашњи пречник цеви, d_s	57 mm	број змија у завеси, z	4
унутрашњи пречник цеви, d_{ui}	50 mm	број завеса, m	50
ширина димног канала, a	13 m	број савијања цеви у змији	3
дубина димног канала, b	12,6 m	корак по ширини, s_1	0,11 m
висина измењивача	1.8 m	корак по дубини	0,25 m
средња дужина змије, I_m	52 m	површина цевног регистра, A_p	1804.1 m ²

Температура продуката сагоревања на излазу из прегрејача паре 2 се одређује на основу табеле из прилога 1. вишеструком интерполацијом. Из овог произилази да је температура

на излазу функција енталпије продуката сагоревања и коефицијента вишка ваздуха на излазу из прегрејача 2, тј.:

$$t_{PP2}^N = f(h_{PP2}^N; \lambda_{PP}^{IZL}) \quad (34)$$

где су:

h_{PP} – енталпија продуката сагоревања на излазу из прегрејача паре 2,

$\lambda_{PP}^{IZL}=1,26$ – коефицијент вишка ваздуха на излазу из прегрејача паре 2.

Табела 2. Прираштај коефицијента вишка ваздуха за номинални и максимални режим рада

Огревна површина	Номинални режим рада		Максималан режим рада	
	$\frac{\lambda_{ul}}{\lambda_{iz}}$	$\Delta\lambda$	$\frac{\lambda_{ul}}{\lambda_{iz}}$	$\Delta\lambda$
Испаривач	1,2	0,04	1,23	0,04
	1,24		1,27	
PP ₂	1,24	0,02	1,27	0,03
	1,26		1,30	
MPP	1,26	0,04	1,30	0,02
	1,30		1,32	
PP ₁	1,30	0,02	1,32	0,02
	1,32		1,34	
ZV	1,32	0,03	1,34	0,02
	1,35		1,36	
ZZ ₂	1,35	0,05	1,36	0,05
	1,40		1,41	
ZZ ₁	1,40	0,05	1,41	0,05
	1,45		1,46	

За номинални режим рада, на основу познатих вредности добија се:

$$h_{PP2}^N = h_{F2}^N - \frac{Q_S^N}{B_g^N \cdot \eta_Z^N} = 15461,7 - \frac{81\,360}{29,32 \cdot 0,995} = 12672,8 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (35)$$

где су:

$B_g = 29,32 \text{ kg/s}$ – гасификована количина горива,

$h_{F2} = 15\,461,7 \text{ kJ/kg}$ – енталпија димних гасова на излазу из испаривача,

$Q_{PP2} = 81\,360 \text{ kW}$ – количина топлоте размењена у прегрејачу паре 2,

$\eta_Z^N = 0,995$ – степен изолованости.

На основу коефицијента вишка ваздуха $\lambda_{PP}^{IZL} = 1,26$ и енталпије продуката сагоревања $12\,672,8 \text{ kJ/kg}$ из прилога 1. интерполацијом налази се температура продуката сагоревања на излазу и прегрејача паре 2:

$$\text{за } t_g = 1000^\circ\text{C и } \lambda' = 1,2 \Rightarrow h_g^{11} = 10\,657,3 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{за } t_g = 1000^\circ\text{C и } \lambda'' = 1,3 \Rightarrow h_g^{12} = 11\,455,1 \text{ kJ/kg}$$

Из општег израза за интерполацију:

$$\frac{\lambda_{iz}^N - \lambda'}{\lambda' - \lambda''} = \frac{h_{g1} - h_g^{11}}{h_g^{12} - h_g^{11}} \quad (36)$$

следи:

$$h_{g1} = h_g^{11} + (h_g^{12} - h_g^{11}) \cdot \frac{\lambda - \lambda'}{\lambda'' - \lambda'} = 10\,657,3 + (11\,455,1 - 10\,657,3) \cdot \frac{0,06}{0,1} = 11\,135,9 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (37)$$

за $t_g = 1200^\circ\text{C}$ и $\lambda' = 1,2 \Rightarrow h_g^{11} = 13\,044,8 \text{ kJ/kg}$

за $t_g = 1200^\circ\text{C}$ и $\lambda'' = 1,3 \Rightarrow h_g^{12} = 14\,017,6 \text{ kJ/kg}$

Из општег израза за интерполацију:

$$\frac{\lambda_{iz}^N - \lambda'}{\lambda' - \lambda''} = \frac{h_{g1} - h_g^{11}}{h_g^{12} - h_g^{11}} \quad (38)$$

следи:

$$h_{g2} = h_g^{11} + (h_g^{12} - h_g^{11}) \cdot \frac{\lambda - \lambda'}{\lambda'' - \lambda'} = 13\,044,8 + (14\,017,6 - 13\,044,8) \cdot \frac{0,06}{0,1} = 13\,628,5 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (39)$$

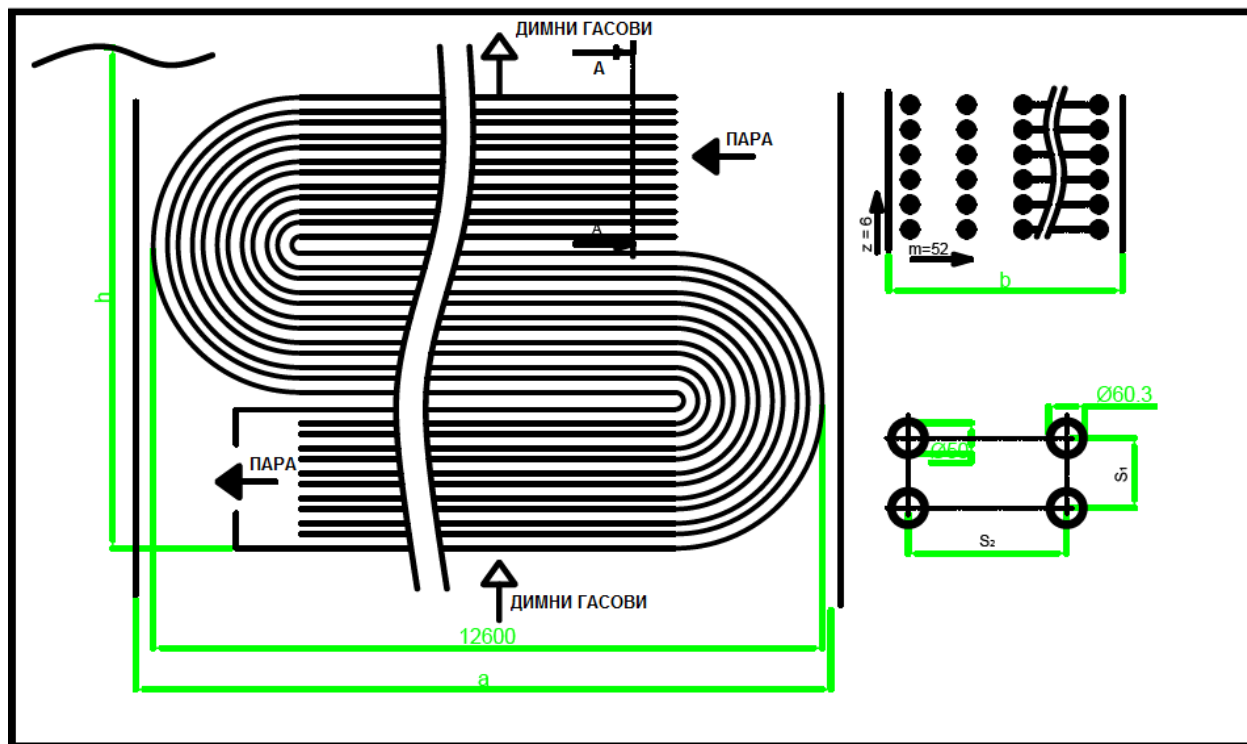
Из општег израза за интерполацију:

$$\frac{t_{PP2}^N - 1000}{1200 - 1000} = \frac{h_{PP2}^N - h_{g1}}{h_{g2} - h_{g1}} \quad (40)$$

следи:

$$t_{PP2}^N = 1000 + (1200 - 1000) \cdot \frac{12\,672,8 - 11\,135,9}{13\,628,5 - 11\,135,9} = 1123,3^\circ\text{C} \quad (41)$$

3.2.2 Температура продукта сагоревања на излазу из међупрегрејача



Слика 22. Међупрегрејач паре

Табела 3. Подаци међупрегрејача паре

Међупрегрејач паре			
спољашњи пречник цеви, d_s	60,3 mm	број змија у завеси, z	6
унутрашњи пречник цеви, d_{ui}	50 mm	број завеса, m	52
ширина димног канала, a	13 m	број савијања цеви у змији	4
дубина димног канала, b	12,6 m	корак по ширини, s_1	0,11 m
висина измењивача	3,63 m	корак по дубини	0,24 m
средња дужина змије, I_m	65 m	површина цевног регистра, A_p	3721,3 m ²

Температура продукта сагоревања на излазу из међупрегрејача се одређује на основу прилога 1. вишеструком интерполацијом. Из овог произилази да је температура на излазу функција енталпије продукта сагоревања и коефицијента вишка ваздуха на излазу из међупрегрејача, тј.:

$$t_{MP}^N = f(h_{MP}^N ; \lambda_{MP}^{IZL}) \quad (42)$$

где су:

h_{MP}^N – енталпија продукта сагоревања на излазу из прегрејача паре 2 и

$\lambda_{MP}^{IZL} = 1,26$ – коефицијент вишка ваздуха на излазу из прегрејача паре 2 (табела 2).

За номинални режим рада, на основу познатих вредности добија се:

$$h_{MP2}^N = h_{PP2}^N - \frac{Q_{MP}^N}{B_g^N \cdot \eta_Z^N} = 12\,672,8 - \frac{82\,764}{29,32 \cdot 0,995} = 9\,853,8 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (43)$$

где су:

$B_g = 29,32 \text{ kg/s}$ – гасификована количина горива,

$h_{PP2} = 15\,461,7 \text{ kJ/kg}$ – енталпија димних гасова на излазу из прегрејача паре 2,

$Q_{MP} = 81\,360 \text{ kW}$ – количина топлоте размењена у међупрегрејачу,

$\eta_Z^N = 0,995$ – степен изолованости.

На основу коефицијента вишка ваздуха $\lambda_g^{12} = 1,3$ и енталпије продуката сагоревања $9\,835,8 \text{ kJ/kg}$ из прилога 1. интерполацијом налази се температура продуката сагоревања на излазу из прегрејача паре 2:

за $t_g = 800^\circ\text{C}$ и $\lambda = 1,3 \Rightarrow h_g^{11} = 8\,828,2 \text{ kJ/kg}$

за $t_g = 1000^\circ\text{C}$ и $\lambda = 1,3 \Rightarrow h_g^{12} = 11\,455,1 \text{ kJ/kg}$

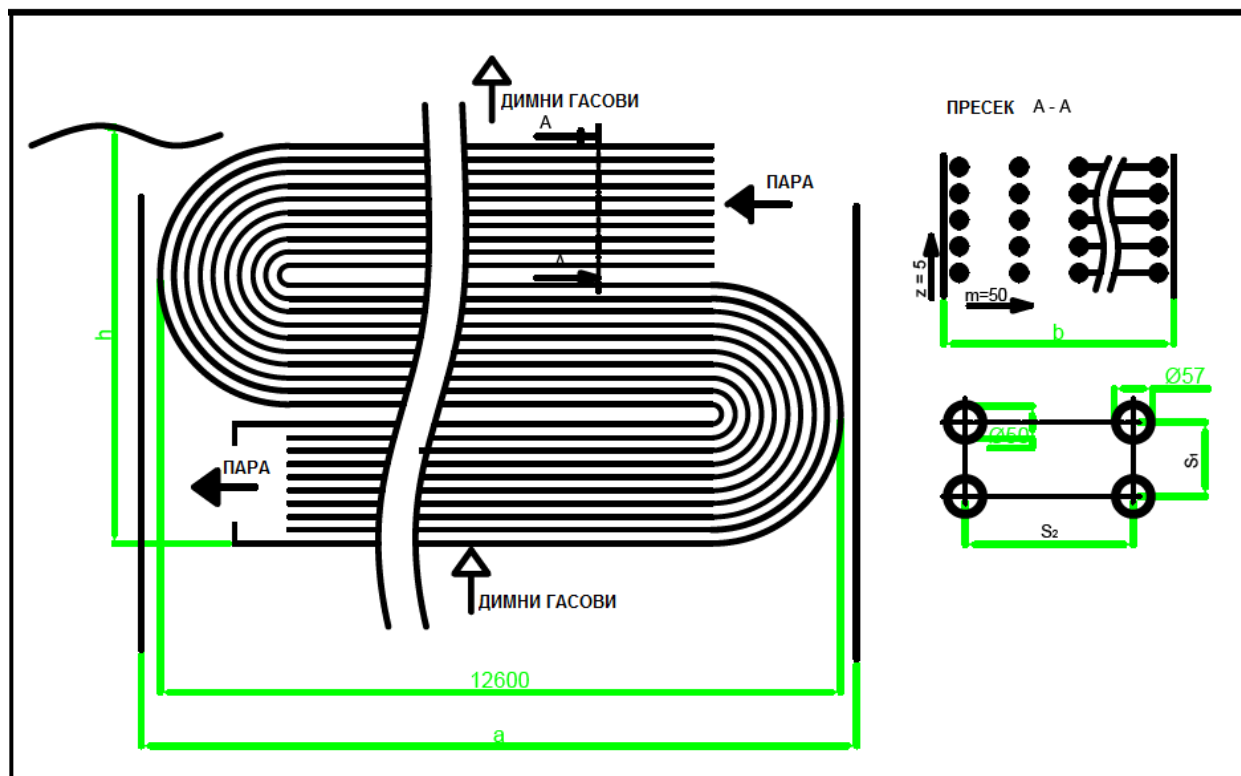
Из општег израза за интерполацију:

$$\frac{t_{MP}^N - 800}{1000 - 800} = \frac{h_{MP}^N - h_{g1}}{h_{g2} - h_{g1}} \quad (44)$$

следи:

$$t_{MP}^N = 800 + (1000 - 800) \cdot \frac{9\,835,8 - 8\,828,2}{11\,455,1 - 8\,828,2} = 876,9^\circ\text{C} \quad (45)$$

3.2.3 Температура продукта сагоревања на излазу из прегрејача паре 1



Слика 23. Прегрејач паре 1

Табела 4. Подаци прегрејача паре 1

Прегрејач паре 1			
спољашњи пречник цеви, d_s	57 mm	број змија у завеси, z	5
унутрашњи пречник цеви, d_{ui}	50 mm	број завеса, m	57
ширина димног канала, a	13 m	број савијања цеви у змији	8
дубина димног канала, b	12,6 m	корак по ширини, s_1	0,11 m
висина измењивача	5,6 m	корак по дубини	0,22 m
средња дужина змије, I_m	117 m	површина цевног регистра, A_p	6119,3 m ²

Температура продукта сагоревања на излазу из прегрејача паре 1 се одређује на основу прилога 1 вишеструком интерполацијом. Из овог следи да је температура на излазу функција енталпије продукта сагоревања и коефицијента вишка ваздуха на излазу из прегрејача 1, тј.:

$$t_{PP1}^N = f(h_{PP1}^N; \lambda_{PP1}^{IZL}) \quad (46)$$

где су:

h_{PP} – енталпија продукта сагоревања на излазу из прегрејача паре 2,
 $\lambda_{PP}^{IZL} 1,32$ – коефицијент вишка ваздуха на излазу из прегрејача паре 2 (табела 2).

За номинални режим рада, на основу познатих вредности добија се:

$$h_{PP1}^N = h_{MP}^N - \frac{Q_{PP1}^N}{B_g^N \cdot \eta_Z^N} = 9\,835,8 - \frac{81\,360}{29,32 \cdot 0,995} = 7\,046,9 \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (47)$$

где су:

$B_g = 29,32 \text{ kg/s}$ – гасификована количина горива,

$h_{mp} = 9\,835,8 \text{ kJ/kg}$ – енталпија димних гасова на излазу из међупрегрејача,

$Q_{PP1} = 81\,360 \text{ kW}$ – количина топлоте размењена у прегрејачу паре 1,

$\eta_Z^N = 0,995$ – степен изолованости.

На основу коефицијента вишка ваздуха $\lambda_{PP}^{IZL} = 1,32$ и енталпије продуката сагоревања $7\,046,9 \text{ kJ/kg}$ из прилога 1 интерполацијом налази се температура продуката сагоревања на излазу и прегрејача паре 2:

за $t_g = 600^\circ\text{C}$ и $\lambda' = 1,3 \Rightarrow h_g^{11} = 6\,455,9 \text{ kJ/kg}$

за $t_g = 600^\circ\text{C}$ и $\lambda'' = 1,4 \Rightarrow h_g^{12} = 6\,884,1 \text{ kJ/kg}$

Из општег израза за интерполацију:

$$\frac{\lambda_{iz}^N - \lambda'}{\lambda' - \lambda''} = \frac{h_{g1} - h_g^{11}}{h_g^{12} - h_g^{11}} \quad (48)$$

следи:

$$h_{g1} = h_g^{11} + (h_g^{12} - h_g^{11}) \cdot \frac{\lambda - \lambda'}{\lambda'' - \lambda'} = 6\,455,9 + (6\,884,1 - 6\,455,9) \cdot \frac{0,02}{0,1} = 6\,541,5 \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (49)$$

за $t_g = 800^\circ\text{C}$ и $\lambda' = 1,2 \Rightarrow h_g^{11} = 8\,828,2 \text{ kJ/kg}$

за $t_g = 800^\circ\text{C}$ и $\lambda'' = 1,3 \Rightarrow h_g^{12} = 9\,410,7 \text{ kJ/kg}$

Из општег израза за интерполацију:

$$\frac{\lambda_{iz}^N - \lambda'}{\lambda' - \lambda''} = \frac{h_{g1} - h_g^{11}}{h_g^{12} - h_g^{11}} \quad (50)$$

следи:

$$h_{g2} = h_g^{11} + (h_g^{12} - h_g^{11}) \cdot \frac{\lambda - \lambda'}{\lambda'' - \lambda'} = 8\,828,2 + (9\,410,7 - 8\,828,2) \cdot \frac{0,02}{0,1} = 8\,944,7 \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (51)$$

Из општег израза за интерполацију:

$$\frac{t_{PP1}^N - 600}{800 - 600} = \frac{h_{PP2}^N - h_{g1}}{h_{g2} - h_{g1}} \quad (52)$$

следи:

$$t_{PP1}^N = 600 + (800 - 600) \cdot \frac{7\,046,9 - 6\,541,5}{8\,944,7 - 6\,541,5} = 642,06^\circ\text{C} \quad (53)$$

3.2.4 Температура паре на улазу у прегрејач паре 2

Стање прегрејане паре на излазу из прегрејача паре 2:

$$p_o = 135 \text{ bar}$$

$$t_{pp}^{iz} = 550^\circ\text{C}$$

Енталпија на излазу из прегрејача вади се за задати притисак $p_s = 135 \text{ bar}$ и температуру $t_s = 550^\circ\text{C}$ прегрејане паре из термодинамских таблица: [11]

$$h_s = 3466,2 \text{ kJ/kg}$$

Количина топлоте прихваћена у прегрејачу паре 2:

$$Q_S^N = 810360 \text{ [kW]}$$

Енталпија прегрејане паре на улазу у прегрејач паре 2 одређује се из израза:

$$h_{Pul} = h_{Piz} - \frac{Q_{SPP2}^N}{D_1^N} = 3466,2 - \frac{81\,360}{180} = 3014,2 \text{ [kJ/Kg]} \quad (54)$$

На основу познате енталпије h_{Pul} и p_o добија се температура паре на улазу у прегрејач паре 2:

$$t_{pp2}^{ul} = 399,7^\circ\text{C}$$

3.2.5 Температура паре на улазу у међупрегрејач

Енталпије на улазу и излазу из међупрегрејача паре ваде се помоћу задатог притиска на улазу у међупрегрејач $p_{MP} = 44 \text{ bar}$ који се сматра константним у целом међупрегрејачу, из термодинамских таблица [11], а на основу температуре:

За улаз у међупрегрејач:

$$t_{x1} = t_a + 100^\circ\text{C} = 352,29^\circ\text{C} \quad (55)$$

За излаз из међупрегрејача:

$$t_{x2} = t_s - 3^\circ\text{C} = 547^\circ\text{C} \quad (56)$$

$$h_{MPiz} = 3549,5 \text{ kJ/kg} \quad (57)$$

Номинална продукција котла:

$$D_1 = 180 \text{ kg/s.}$$

Проток паре кроз међупрегрејач је:

$$D_{MP} = D_1 = 180 \text{ kg/s}$$

Енталпија прегрејане паре на улазу у међупрегрејач одређује се из израза:

$$h_{MPul} = h_{MPiz} - \frac{Q_{MP}^N}{D_{MP}^N} = 3549,5 - \frac{82764}{180} = 3089,7 \text{ [kJ/Kg]} \quad (58)$$

На основу познате енталпије h_{MPul} и p_{mp} добија се температура паре на улазу у међупрегрејач

$$t_{MP}^{ul} = 352,3^\circ\text{C} \quad (59)$$

3.2.6 Температура на улазу из прегрејача паре 1

Стање прегрејане водене паре на излазу из прегрејача паре 1 је:

$$p_o = 135 \text{ bar}$$

$$t_{pp1}^{lzl} = 399,7^\circ\text{C} - \text{једнака је температури на улазу у прегрејач паре 2.}$$

Овом стању одговара енталпија (израчуната у 3.2.1.):

$$h_{pp1iz} = 3014,2^\circ\text{C}$$

Енталпија прегрејане паре на улазу у међупрегрејач одређује се из израза:

$$h_{pp1ul} = h_{pp1iz} - \frac{Q_{pp1}^N}{D_1^N} = 3014,2 - \frac{81360}{180} = 2562,2 \text{ [kJ/Kg]} \quad (60)$$

На основу познате енталпије h_{pp1ul} и p_{pp} добија се температура паре на улазу у прегрејач паре 1:

$$t_{pp1}^{ul} = 333,8^\circ\text{C}$$

3.3 Прорачун прегрејача паре 2

Почетак прорачуна прегрејача паре захтева усвајање геомтерије измењивача топлоте помоћу које се добија његова површина. Пречници су усвојени према литератури [12] (челичне бешавне цеви, страна 435).

Табела 5. Подаци прегрејача паре 2

Прегрејач паре 2			
спољашњи пречник цеви, d_s	57 mm	број змија у завеси, z	4
унутрашњи пречник цеви, d_{ui}	50 mm	број завеса, m	50
ширина димног канала, a	13 m	број савијања цеви у змији	3
дубина димног канала, b	12,6 m	корак по ширини, s_1	0,11 m
висина прегрејача паре, h	1,80 m	корак по дубини	0,25 m
средња дужина змије, l_m	52 m		

$$m=b/s_2=50,4 \text{ усваја се: } m=50 \quad (61)$$

$$l_m=(n+1) \cdot a=(3+1) \cdot 13=52 \text{ m} \quad (62)$$

Геометријски параметри су усвојени на основу података из литературе [13] (на страницама од 4.349 до 4.353, примери димензионисања прегрејача паре).

Додатни подаци потребни за прорачун:

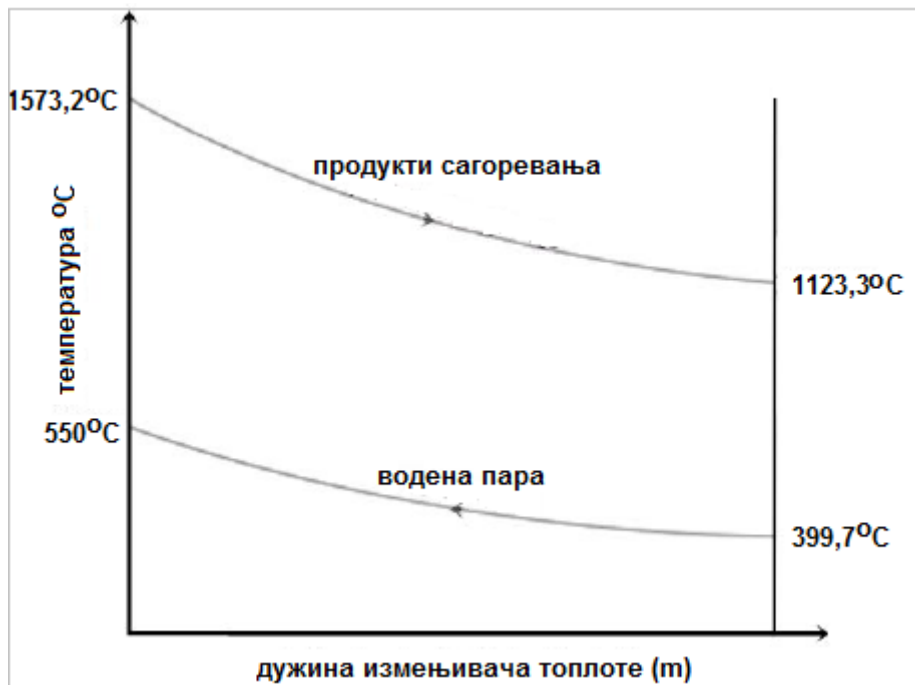
$Q_{s1} = 81\,360 \text{ kW}$ – количина топлоте размењена у прегрејачу паре 2 ,

$t_{pp2}^{ul} = 399,7^\circ\text{C}$ – температура на улазу у прегрејач паре 2 ,

$t_{pp2}^{iz} = 550^\circ\text{C}$ – температура на излазу из прегрејач паре 2,

$t_{pp2}^N = t_{F2} = 1573,2^\circ\text{C}$ – температура продуката сагоревања на улазу,

$t_{pp2}^N = t_{pp2} = 1123,3^\circ\text{C}$ – температура продуката сагоревања на излазу.



Слика 24. Дијаграм температурне разлике за прегрејач паре 2

Узимајући у обзир да је потребно оставити простор између ивица прегрејача и зидова котла средња дужина цеви у змији се коригује тако што се од ширине димног канала одузима вредност тог простора:

$$a' = a - 0,4 = 13 - 0,4 = 12,6 \text{ m}$$

Према изразу (61) следи:

$$l = (n+1) \cdot a' = (3+1) \cdot 12,6 = 50,4 \text{ m} \quad (63)$$

Површина цевног регистра прегрејача паре је:

$$A_p = d_s \cdot \pi \cdot l \cdot z \cdot m = 0,057 \cdot 3,14 \cdot 50,4 \cdot 4 \cdot 50 = 1804,1 \text{ m}^2 \quad (64)$$

Према енергетском билансу, с друге стране површина се рачуна као:

$$A_{0p} = \frac{Q_s}{k \cdot \Delta t_{sRln}} \quad (65)$$

где су:

$t_{sRln} [^{\circ}\text{C}]$ – средња логаритамска температура измењивача топлоте

$k [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ – збирни коефицијент преноса топлоте

Логаритамска температура се рачуна према:

$$\Delta t_{sRln} = \frac{\Delta t_v}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{1023,2 - 723,6}{\ln \frac{1023,2}{723,6}} = 864,8^{\circ}\text{C} \quad (66)$$

$$\Delta t_v = 1573,2 - 550 = 1023,2^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t_m = 1123,3 - 399,7 = 723,6^{\circ}\text{C}$$

где су:

Δt_v – разлика температура медија (продукти сагоревања – пара) на улазу у прегрејач паре и
 Δt_m – разлика температура медија (продукти сагоревања – пара) на излазу из прегрејача паре.

Коефицијент преноса топлоте једнак је:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + R + \frac{1}{\lambda_2}} \quad (67)$$

где су:

$\lambda_1 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ – коефицијент прелаза топлоте с продуката сагоревања на зид,

$\lambda_2 [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ – коефицијент прелаза топлоте с зида на водену пару,

R – топлотни отпор кроз зид цеви и топлотни отпор услед запрљаности

$$R = R_0 \cdot C_d + \Delta R \quad (68)$$

где су:

R_0 – почетни коефицијент запрљаности цеви у коридорном поретку при сагоревању чврстог горива, одређује се према литератури [13] (слика 4.112, на страни 4.117.) на основу брзине гасова,

C_d – корекциони фактор за одређивање коефицијента задржаности при сагоревању чврстих горива, одређује се према [13] (слика 4.115, на страни 4.118.),
 ΔR – поправни коефицијент задржаности, одређује се према [13] (табела 4.11, на страни 4.118).

Брзина гасова потребна за одређивање R_0 рачуна се из израза:

$$W_g = \frac{B_g^N \cdot V_{RW} \cdot (273 + t_{gSR})}{273 \cdot f_g} \quad (69)$$

где су:

$B_g = 29,32 \text{ kg/s}$ – гасификована количина горива,

$V_{RW} = 7,02 \text{ m}^3/\text{kg}$ – количина влажних продуката сагоревања добијена за коефицијент вишка ваздуха $\lambda = 1,24$ (улаз у прегрејач паре 2, према табели 2) интерполацијом на основу табеле 5.

t_{gSR} – средња температура продуката сагоревања

f_g – средњи попречни пресек за пролаз продуката сагоревања

Табела 6. Стварна количина влажних продуката сагоревања

λ	$\lambda - 1$	V_{Lmin}	ΔV_L	V_R
1	0	5.26	0.00	5.76
1.1	0.1	5.26	0.53	6.29
1.2	0.2	5.26	1.05	6.81
1.3	0.3	5.26	1.58	7.34
1.4	0.4	5.26	2.10	7.86
1.5	0.5	5.26	2.63	8.39
1.6	0.6	5.26	3.16	8.92
1.7	0.7	5.26	3.68	9.44
1.8	0.8	5.26	4.21	9.97
1.9	0.9	5.26	4.74	10.5
2	1	5.26	5.26	11.32

Средњи попречни пресек за пролаз продуката сагоревања се одређује према:

$$f_g = AF - d_s \cdot m \cdot a' = 163,8 \cdot 0,057 \cdot 50 \cdot 12,6 = 127,9 \text{ m}^2 \quad (70)$$

где су:

$A_F = a \cdot b = 163,8 \text{ m}^2$ – попречни пресек канала

$d_s = 57 \text{ mm}$ – спољни пречник цеви

$m = 50$ – број завеса

Средња температура продуката сагоревања

$$t_{gSR} = \frac{t_{gUL} + t_{gIZL}}{2} = \frac{1573,2 + 1123,3}{2} = 1348,3 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (71)$$

Сада се према изразу (69) брзина гасова може израчунати:

$$W_g = \frac{29,32 \cdot 7,02 \cdot (273,15 + 1348,3)}{273,15 \cdot 127,9} = 9,5 \text{ m/s} \quad (72)$$

Сада се са наведених дијаграма могу прочитати вредности:

$$R_0 = 0,51 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W} \quad (73)$$

$$C_d = 1,55 \quad (74)$$

$$\Delta R = 0,00172 \quad (75)$$

Према изразу (68) вредност топлотног отпора је:

$$R = 0,51 \cdot 10^{-2} \cdot 1,55 + 0,00172 = 0,0097 \text{ m}^2 \text{ K/W} \quad (76)$$

Коефицијент прелаза топлоте са продуката сагоревања на зид:

$$\lambda_1 = \lambda_{1K} + \lambda_{1Z} \quad (77)$$

где су:

λ_{1K} – коефицијент прелаза топлоте конвекцијом

λ_{1Z} – коефицијент прелаза топлоте зрачењем

Коефицијент прелаза топлоте зрачењем одређује се на основу зрачења троатомних и вишеатомних гасова. Будући да је количина сумпора у продуктима сагоревања занемарива, занемарује се и утицај зрачења овог гаса.

$$\lambda_{1Z} = \frac{\lambda_{CO_2} + \lambda_{H_2O}}{t_{gUL} - t_{gIZL}} \quad (78)$$

λ_{CO_2} , λ_{H_2O} – коефицијенти прелаза топлоте услед зрачења троатомних гасова који се рачунају према:

$$\lambda_{CO_2} = 11,2 \cdot S \cdot (p_{CO_2} \cdot s)^{0,4} \cdot (0,01 \cdot t_{gSR})^{3,1} \quad (79)$$

$$\lambda_{CO_2} = 11,2 \cdot 0,8 \cdot (0,1519 \cdot 0,31)^{0,4} \cdot (0,01 \cdot 1348,3)^{3,1} = 8385,2 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\lambda_{H_2O} = 1,31 \cdot S \cdot (40 - 71,4 \cdot p_{H_2O} \cdot s)^{0,6} \cdot (0,01 \cdot t_{gSR})^{2,37 + 1,383 \sqrt{(p_{H_2O} \cdot s)}} \quad (80)$$

$$\lambda_{H_2O} = 1,31 \cdot 0,8 \cdot (40 - 71,4 \cdot 0,1938 \cdot 0,31)^{0,6} \cdot (0,01 \cdot 1348,3)^{2,37 + 1,383 \sqrt{(0,1938 \cdot 0,31)}} \quad (81)$$

где су:

$S = 0,8$ – према препорукама из литературе [13] (на страни 4.327)

$s = 0,38$ – слој који зрачи

$t_{gSR} = 1348,3 \text{ }^\circ\text{C}$ – средња температура продуката сагоревања

$p_{H_2O} = 0,1938$ – парцијални притисак H_2O у продуктима сагоревања

$p_{CO_2} = 0,1519$ – парцијални притисак CO_2 у продуктима сагоревања

Слој који зрачи се рачуна према:

$$S = \frac{1,8}{\frac{1}{a'} + \frac{1}{b'} + \frac{1}{c'}} = \frac{1,8}{\frac{1}{a'} + \frac{1}{s_2 - d_s} + \frac{1}{h}} = \frac{1,8}{\frac{1}{12,6} + \frac{1}{0,193} + \frac{1}{1,80}} = 0,31 \text{ m} \quad (82)$$

Где су:

a', b', c' – ширина, дубина и висина коморе образоване двома суседним завесама.

Сада се из израза (78) може израчунати коефицијент прелаза топлоте зрачењем са троатомних гасова на површину прегрејача паре:

$$\lambda_{IZ} = \frac{17337,4 + 8385,2}{1573,2 - 1123,3} = 57,17 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Коефицијент прелаза топлоте конвекцијом се рачуна:

$$\lambda_{1k} = C_z \cdot C_\phi \cdot \lambda_{1k} = 1 \cdot 0,98 \cdot 61,8 = 60,5 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (83)$$

где су коефицијенти узети према литератури [13] (дијаграм на страни 4.95, слика 4.91):

$C_z = f(z) = 1$ – за број редова по дубини $z > 30$

$C_\phi = f(t_{gSR}; r_{H_2O}) = 0,98$ – за $r_{H_2O} = 0,1938$ (удео влаге) и

$t_{gSR} = 1348,3 \text{ }^\circ\text{C}$

$$\lambda_{1d} = f(wg; ds) = 61 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ – коефицијент прелаза топлоте} \quad (84)$$

Коефицијент прелаза топлоте са продуката сагоревања на зид сада се може израчунати према изразу (79):

$$\lambda_1 = 57,17 + 60,5 = 117,67 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (85)$$

Коефицијент λ_2 који представља коефицијент прелаза топлоте с зидова цеви на водену пару се одређује на следећи начин:

$$\lambda_2 = C_{d1} \cdot \lambda'_2 \quad (86)$$

где су коефицијенти узети према литератури [13] (дијаграм на страни 4.99, слика 4.95):

$$C_{d1} = f(d_u) = 0,88 \quad (87)$$

$$\lambda'_2 = f(p_{sm}; t_{pSR}; w_p) \quad (88)$$

За усвајање вредности коефицијента прелаза топлоте (λ'_2) потребне су вредности средњег притиска паре p_{sm} , средње температуре паре t_{pSR} , те средње брзине паре w_{sm} . Средњи притисак паре p_{sm} усваја се као константа, на основу притиска прегрејане паре.

Средња брзина паре може се одредити на основу једначине континуитета:

$$D_1^N = \rho_p \cdot A_v \cdot W_{sm} = \frac{1}{V_p} \cdot A_v \cdot W_p \quad (89)$$

$$W_p = \frac{V_p \cdot D_1^N}{A_v} = \frac{0,0221 \cdot 180}{0,393} = 9,56 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (90)$$

где су:

$D_1 = 180 \text{ kg/s}$ – продукција паре,

$v_p = 0,0221 \text{ m}^3/\text{kg}$ – специфична запремина паре, добијена из приручника [11] за одобрени притисак од 135 бар и средњу температуру паре

$$t_{pSR} = (550+399,7)/2 = 474,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$A_v = m \cdot z \cdot \frac{d_u^2 \cdot \pi}{4} = 50 \cdot 4 \cdot \frac{0,05^2 \cdot 3,14}{4} = 0,393 \text{ m}^2 \quad (91)$$

На основу p_{sm} , t_{pSR} и w_p прочитан је коефицијент

$$\lambda'_2 = 1890 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (92)$$

Па је коначно:

$$\lambda_2 = 0,88 \cdot 1890 = 1663,2 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (93)$$

На основу добијених вредности топлотног отпора, коефицијента прелаза топлоте с продуката сагоревања на зид, и с зида на водену пару, добија се коначни коефицијент преноса топлоте, према изразу (67) и износи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{117,7} + 0,0097 + \frac{1}{1663,2}} = 52,5 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (94)$$

Односно, према изразу (65) површина прегрејача паре износи:

$$A_{0P} = \frac{Q_s}{k \cdot \Delta t_{SRln}} = \frac{81\,360\,000}{52,5 \cdot 864,8} = 1791,9 \text{ m}^2 \quad (95)$$

Грешка износи:

$$\frac{|A_p - A_{0P}|}{A_p} \cdot 100 = \frac{|1804,1 - 1791,9|}{1804,1} \cdot 100 = 0,68 \% < 5 \% \quad (96)$$

што задовољава.

3.4 Прорачун међупрегрејача паре

Почетак прорачуна међупрегрејача паре, као и у предходном случају за прегрејач паре 2, захтева усвајање димензија измењивача топлоте помоћу којих се добија његова површина. Пречници су усвојени према литератури [12] (челичне бешавне цеви, страна 435).

Табела 7: Подаци међупрегрејача паре

Међупрегрејач паре			
спољашњи пречник цеви, d_s	60,3 mm	број змија у завеси, z	6
унутрашњи пречник цеви, d_{ui}	50 mm	број завеса, m	52
ширина димног канала, a	13 m	број савијања цеви у змији	4
дубина димног канала, b	12,6 m	корак по ширини, s_1	0,11 m
висина прегрејача паре, h	3,63 m	корак по дубини	0,24 m
средња дужина змије, l_m	65 m		

$$m=b/s_2=52,5, \text{ усваја се: } m=52 \quad (97)$$

$$l_m=(n+1) \cdot a=(4+1) \cdot 13= 65 \text{ m} \quad (98)$$

Геометријски параметри су усвојени на основу података из литературе [13] као и код прегрејача паре 2.

Геометрија међупрегрејача:

Додатни подаци потребни за прорачун:

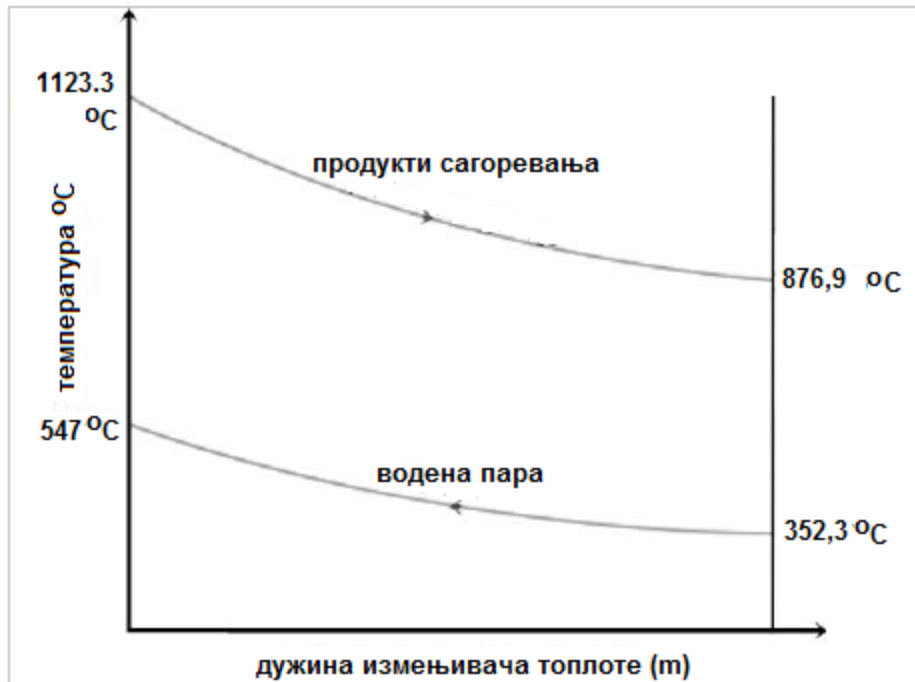
$Q_{s1} = 82\,764 \text{ kW}$ – количина топлоте размењена у међупрегре

$t_{MP}^{ul} = 399,7^\circ\text{C}$ – температура на улазу у међупрегрејач,

$t_{MP}^{izl} = 547^\circ\text{C}$ – температура на излазу из међупрегрејача,

$t_{MPu}^N = t_{pp2} = 1123,3^\circ\text{C}$ – температура продуката сагоревања на улазу,

$t_{MPi}^N = t_{MP} = 876,9^\circ\text{C}$ – температура продуката сагоревања на излазу.



Слика 25. Дијаграм температурне разлике за међупрегрејач

Узимајући у обзир да је потребно оставити простор између ивица међупрегрејача и зидова котла средња дужина цеви у змији се коригује тако што се од ширине димног канала одузима вредност тог простора:

$$a' = a - 0,4 = 13 - 0,2 = 12,6 \text{ m} \quad (99)$$

Према изразу (98) следи:

$$l = (n+1) \cdot a' = (4+1) \cdot 12,6 = 63 \text{ m} \quad (100)$$

Површина цевног регистра међупрегрејача паре је:

$$A_p = d_s \cdot \pi \cdot l \cdot z \cdot m = 0,0603 \cdot 3,14 \cdot 63 \cdot 6 \cdot 52 = 3721,7 \text{ m}^2 \quad (101)$$

Према енергетском билансу, с друге стране површина се рачуна као:

$$A_{0p} = \frac{Q_s}{k \cdot \Delta t_{SRln}} \quad (102)$$

где су:

t_{SRln} [°C] – средња логаритамска температура измењивача топлоте

k [W/m²K] – збирни коефицијент преноса топлоте

Логаритамска температура се рачуна према:

$$\Delta t_{SRln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{576,3 - 524,6}{\ln \frac{576,3}{524,6}} = 550,04^\circ\text{C} \quad (103)$$

$$\Delta t_v = 1123,3 - 547 = 576,3^\circ\text{C} \quad (104)$$

$$\Delta t_m = 876,9 - 352,3 = 524,6^\circ\text{C} \quad (105)$$

где су:

Δt_v – температурна разлика медија (продукти сагоревања – пара) на улазу у међупрегрејач,
 Δt_m – разлика температура медија (продукти сагоревања – пара) на излазу из међупрегрејача.

Коефицијент преноса топлоте једнак је:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + R + \frac{1}{\lambda_2}} \quad (106)$$

где су:

λ_1 [W/m²K] – коефицијент прелаза топлоте с продуката сагоревања на зид,

λ_2 [W/m²K] – коефицијент прелаза топлоте с зида на водену пару,

R – топлотни отпор кроз зид цеви и топлотни отпор услед запрљаности

$$R = R_0 \cdot C_d + \Delta R \quad (107)$$

где су:

R_0 – почетни коефицијент запрљаности цеви у коридорном поретку при сагоревању чврстог горива, одређује се према литератури [13] (слика 4.112, на страни 4.117.) на основу брзине гасова,

C_d – корекциони фактор за одређивање коефицијента запрљаности при сагоревању чврстих горива, одређује се према [13] (слика 4.115, на страни 4.118.)

ΔR – поправни коефицијент запрљаности, одређује се према [13] (табела 4.11, на страни 4.118)

Брзина гасова потребна за одређивање R_0 рачуна се из израза:

$$W_g = \frac{B_g^N \cdot V_{RW} \cdot (273 + t_{gSR})}{273 \cdot f_g} \quad (108)$$

где су:

$B_g = 29,32$ kg/s – гасификована количина горива,

$V_{RW} = 7,12$ m³/kg – количина влажних продуката сагоревања добијена за коефицијент вишка ваздуха $\lambda = 1,26$ (улаз у међупрегрејач, према табели 3) интерполацијом на основу табеле 5.

t_{gSR} – средња температура продуката сагоревања

f_g – средњи попречни пресек за пролаз продуката сагоревања

Средњи попречни пресек за пролаз продуката сагоревања се одређује према:

$$f_g = A_F - d_s \cdot m \cdot a' = 163,8 - 0,0603 \cdot 52 \cdot 12,6 = 124,3 \text{ m}^2 \quad (109)$$

где су:

$A_F = a \cdot b = 163,8 \text{ m}^2$ – попречни пресек канала

$d_s = 60,3 \text{ mm}$ – спољашњи пречник цеви

$m = 52$ – број завеса

Средња температура продуката сагоревања:

$$t_{gSR} = \frac{t_{gUL} + t_{gIZL}}{2} = \frac{1123,3 + 876,9}{2} = 1000,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (110)$$

Сада се према изразу (108) брзина гасова може израчунати:

$$W_g = \frac{29,32 \cdot 7,12 \cdot (273,15 + 1000,1)}{273,15 \cdot 124,3} = 7,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (111)$$

Сада се са наведених дијаграма могу прочитати вредности:

$$R_0 = 0,72 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$C_d = 1,58$$

$$\Delta R = 0,00172$$

Према изразу (107) вредност топлотног отпора је: $R = 0,72 \cdot$

$$10^{-2} \cdot 1,58 + 0,00172 = 0,0131 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Коефицијент прелаза топлоте са продуката сагоревања на зид:

$$\lambda_1 = \lambda_{1K} + \lambda_{1Z} \quad (112)$$

где су:

λ_{1K} – коефицијент прелаза топлоте конвекцијом

λ_{1Z} – коефицијент прелаза топлоте зрачењем

Коефицијент прелаза топлоте зрачењем одређује се на основу зрачења троатомних и вишеатомних гасова. Будући да је количина сумпора у продуктима сагоревања занемарива, занемарује се и утицај зрачења овог гаса.

$$\lambda_{1Z} = \frac{\lambda_{CO_2} + \lambda_{H_2O}}{t_{gUL} - t_{gIZL}} \quad (113)$$

λ_{CO_2} , λ_{H_2O} – коефицијенти прелаза топлоте услед зрачења троатомних гасова који се рачунају према:

$$\lambda_{CO_2} = 11,2 \cdot S \cdot (p_{CO_2} \cdot s)^{0,4} \cdot (0,01 \cdot t_{gSR})^{3,1} \quad (114)$$

$$\lambda_{CO_2} = 11,2 \cdot 0,8 \cdot (0,1519 \cdot 0,31)^{0,4} \cdot (0,01 \cdot 1000,1)^{3,1} = 3322,6 \text{ K/m}^2\text{W} \quad (115)$$

$$\lambda_{H_2O} = 1,31 \cdot S \cdot (40 - 71,4 \cdot p_{H_2O} \cdot s)^{0,6} \cdot (0,01 \cdot t_{gSR})^{2,37 + 1,38^3 \sqrt{(p_{H_2O} \cdot s)}} \quad (116)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{H_2O} &= 1,31 \cdot 0,8 \cdot (40 - 71,4 \cdot 0,1938 \cdot 0,31)^{0,6} \cdot (0,01 \cdot 1000,1)^{2,37 + 1,38^3 \sqrt{(0,1938 \cdot 0,31)}} \\ &= 7286,6 \text{ W/m}^2\text{K} \end{aligned} \quad (117)$$

где су:

где су:

$S = 0,8$ – према препорукама из литературе [13] (на страни 4.327)

$s = 0,31$ – слој који зрачи

$t_{gSR} = 1000,1 \text{ }^\circ\text{C}$ – средња температура продуката сагоревања

$p_{H_2O} = 0,1938$ – парцијални притисак H_2O у продуктима сагоревања

$p_{CO_2} = 0,1519$ – парцијални притисак CO_2 у продуктима сагоревања

Слој који зрачи се рачуна према:

$$S = \frac{1,8}{\frac{1}{a'} + \frac{1}{b'} + \frac{1}{c'}} = \frac{1,8}{\frac{1}{a'} + \frac{1}{s_2 - d_s} + \frac{1}{h}} = \frac{1,8}{\frac{1}{12,6} + \frac{1}{0,193} + \frac{1}{1,80}} = 0,31\text{m} \quad (118)$$

Где су:

a', b', c' – ширина, дубина и висина коморе образоване двама суседним завесама.

Сада се из израза (113) може израчунати коефицијент прелаза топлоте зрачењем са троатомних гасова на површину прегрејача паре:

$$\lambda_{IZ} = \frac{7286,6 + 3322,6}{1123,3 - 876,9} = 43,1 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (119)$$

Коефицијент прелаза топлоте конвекцијом се рачуна:

$$\lambda_{1k} = C_z \cdot C_\Phi \cdot \lambda_{1k} = 1 \cdot 0,99 \cdot 51 = 50,5 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (120)$$

где су коефицијенти узети према литератури [13] (дијаграм на страни 4.95, слика 4.91):

$C_z = f(z) = 1$ – за број редова по дубини $z > 30$

$C_\Phi = f(tgSR; r_{H_2O}) = 0,99$ – за $r_{H_2O} = 0,1938$ (удео влаге) и

$tgSR = 1000,1 \text{ }^\circ\text{C}$

$\lambda_{1d} = f(wg; ds) = 51 \text{ W/m}^2\text{K}$ – коефицијент прелаза топлоте

Коефицијент прелаза топлоте са продуката сагоревања на зид сада се може израчунати према изразу (112):

$$\lambda_1 = 43,1 + 50,5 = 93,6 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (121)$$

Коефицијент λ_2 који представља коефицијент прелаза топлоте с зидова цеви на водену пару се одређује на следећи начин:

$$\lambda_2 = C_{d1} \cdot \lambda'_2 \quad (122)$$

где су коефицијенти узети према литератури [13] (дијаграм на страни 4.99, слика 4.95):

$$C_{d1} = f(du) = 0,88 \quad (123)$$

$$\lambda'_2 = f(p_{sm}; t_{pSR}; w_p) \quad (124)$$

За усвајање вредности коефицијента пријелаза топлоте (λ'_2) потребне су вредности средњег притиска паре p_{sm} , средње температуре паре t_{pSR} , те средње брзине паре w_{sm} . Средњи притисак паре p_{sm} усваја се као константа, на основу притиска прегрејане паре.

Средња брзина паре може се одредити на основу једначине континуитета:

$$D_1^N = \rho_p \cdot A_v \cdot W_{sm} = \frac{1}{V_p} \cdot A_v \cdot W_p \quad (125)$$

$$W_p = \frac{V_p \cdot D_1^N}{A_v} = \frac{0,0723 \cdot 180}{0,613} = 21,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (126)$$

где су:

$D_1 = 180 \text{ kg/s}$ – продукција паре,

$v_p = 0,0723 \text{ m}^3/\text{kg}$ – специфична запремина паре, добијена из приручника [11] за притисак међупрегрејања од 44 бара и средњу температуру паре:

$$t_{pSR} = (547 + 352,3)/2 = 449,7 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (слика 24)} \quad (127)$$

Површина из предходног израза:

$$A_v = m \cdot z \cdot \frac{d_u^2 \cdot \pi}{4} = 50 \cdot 6 \cdot \frac{0,05^2 \cdot 3,14}{4} = 0,613 \text{ m}^2 \quad (128)$$

На основу p_{sm} , t_{pSR} и w_p коефицијент $\lambda'_2 = 1120 \text{ W/m}^2\text{K}$

Па је коначно:

$$\lambda_2 = 0,88 \cdot 1090 = 959,2 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (129)$$

На основу добијених вредности топотног отпора, коефицијента прелаза топлоте с продуката сагоревања на зид, те с зида на водену пару, добија се коначни коефицијент преноса топлоте, према изразу (106). и износи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{93,6} + 0,0131 + \frac{1}{959,2}} = 40,3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (130)$$

Односно, према изразу (102) површина прегрејача паре износи:

$$A_{0P} = \frac{Q_s}{k \cdot \Delta t_{SRIn}} = \frac{82\,764\,000}{40,3 \cdot 550,4} = 3731,3 \text{ m}^2 \quad (131)$$

Грешка износи:

$$\frac{|A_P - A_{0P}|}{A_P} \cdot 100 = \frac{|3721,7 - 3731,3|}{3721,7} \cdot 100 = 0,26 \% < 5 \% \quad (132)$$

што задовољава.

3.5 Прорачун прегрејача паре 1

На почетку прорачуна, као код предходна два котловска елемента, усваја се геометрија прегрејача паре 1. Пречници су усвојени према литератури [12] (челичне бешавне цеви, страна 435).

Табела 8. Подаци прегрејача паре 1

Прегрејач паре 1			
спољашњи пречник цеви, d_s	60,3 mm	број змија у завеси, z	5
унутрашњи пречник цеви, d_{ui}	50 mm	број завеса, m	57
ширина димног канала, a	13 m	број савијања цеви у змији	8
дубина димног канала, b	12,6 m	корак по ширини, s_1	0,11 m
висина прегрејача паре, h	5,6 m	корак по дубини	0,22 m
средња дужина змије, l_m	65 m		

$$m = b/s_1 = 57,3 \quad (133)$$

$$\text{усваја се: } m = 57 \quad (134)$$

$$l_m = (n+1) \cdot a = (8+1) \cdot 13 = 117 \text{ m} \quad (135)$$

Геометријски параметри су усвојени на основу података из литературе [13]. Геометрија прегрејача паре приказана је на слици 25.

Додатни подаци потребни за прорачун:

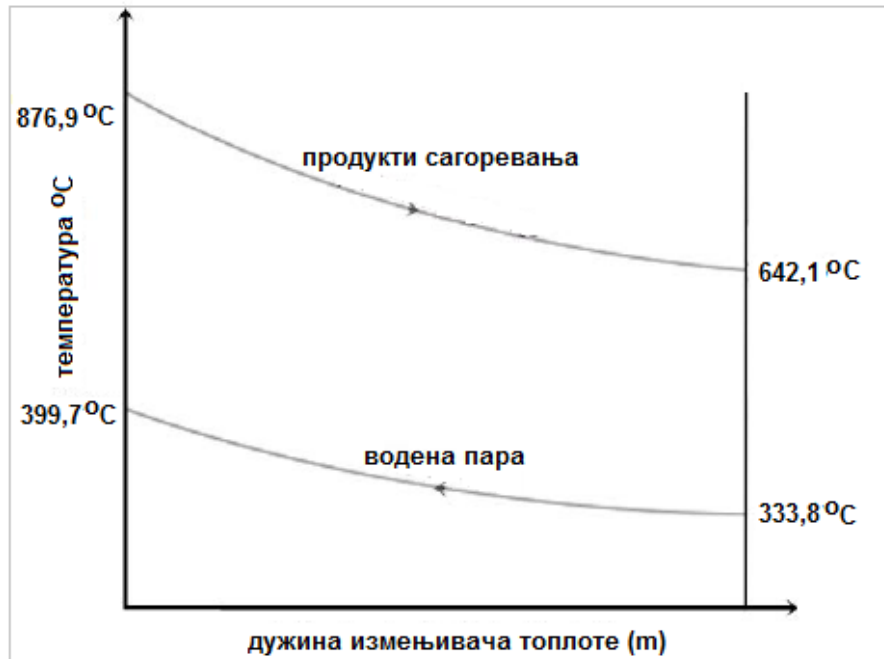
$Q_{s1} = 81\,360 \text{ kW}$ – количина топлоте резмењена у прегрејачу паре 1,

$t_{PP1}^{ul} = 333,8^\circ\text{C}$ – температура на улазу у прегрејач паре 1,

$t_{PP1}^{IZL} = 399,7^\circ\text{C}$ – температура на излазу из прегрејача паре 1,

$t_{PPu1}^N = t_{MPiz} = 876,9^\circ\text{C}$ – температура продуката сагоревања на улазу,

$t_{PPu2}^N = t_{PP1} = 642,1^\circ\text{C}$ – температура продуката сагоревања на излазу.



Слика 26. Дијаграм температурне разлике за прегрејач 1

Узимајући у обзир да је потребно оставити простор између ивица прегрејача и зидова котла средња дужина цеви у змији се коригује тако што се од ширине димног канала одузима вредност тог простора:

$$a' = a - 0,4 = 13 - 0,4 = 12,6 \text{ m} \quad (136)$$

Према изразу (62) следи:

$$l = (n+1) \cdot a' = (8+1) \cdot 12,6 = 113,4 \text{ m} \quad (137)$$

Површина цевног регистра прегрејача паре је:

$$A_p = d_s \cdot \pi \cdot l \cdot z \cdot m = 0,0603 \cdot 3,14 \cdot 113,4 \cdot 5 \cdot 57 = 6119,3 \text{ m}^2 \quad (138)$$

Према енергетском билансу, с друге стране површина се рачуна као:

$$A_{0p} = \frac{Q_s}{k \cdot \Delta t_{SRln}} \quad (139)$$

где су:

t_{SRln} [°C] – средња логаритамска температура измењивача топлоте,

k [W/m²K] – збирни коефицијент преноса топлоте,

Логаритамска температура се рачуна према:

$$\Delta t_{SRln} = \frac{\Delta t_v - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_v}{\Delta t_m}} = \frac{537,2 - 308,3}{\ln \frac{537,2}{308,3}} = 412,2^\circ\text{C} \quad (140)$$

$$\Delta t_v = 876,9 - 399,7 = 537,2^\circ\text{C} \quad (141)$$

$$\Delta t_m = 642,1 - 333,8 = 308,3^\circ\text{C} \quad (142)$$

где су:

Δt_v – разлика температура медија (продукти сагоревања – пара) на улазу у прегрејач паре,

Δt_m – разлика температура медија (продукти сагоревања – пара) на излазу из прегрејача паре

Коефицијент преноса топлоте једнак је:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_1} + R + \frac{1}{\lambda_2}} \quad (143)$$

где су:

λ_1 [W/m²K] – коефицијент прелаза топлоте с продуката сагоревања на зид

λ_2 [W/m²K] – коефицијент прелаза топлоте са зида на водену пару

R – топлотни отпор кроз зид цеви и топлотни отпор услед задрљаности

$$R = R_0 \cdot C_d + \Delta R \quad (144)$$

где су:

R_0 – почетни коефицијент задрљаности цеви у коридорном поретку при сагоревању чврстог горива, одређује се према литератури [13] (слика 4.112, на страни 4.117.) на основу брзине гасова,

C_d – корекциони фактор за одређивање коефицијента задрљаности при сагоревању чврстих горива, одређује се према [13] (слика 4.115, на страни 4.118.)

ΔR – поправни коефицијент задрљаности, одређује се према [13] (табела 4.11, на страни 4.118)

Брзина гасова потребна за одређивање R_0 рачуна се из израза:

$$W_g = \frac{B_g^N \cdot V_{RW} \cdot (273 + t_{gSR})}{273 \cdot f_g} \quad (145)$$

где су:

$B_g = 29,32 \text{ kg/s}$ –гасификована количина горива,

$V_{RW} = 7,34 \text{ m}^3/\text{kg}$ – количина влажних продуката сагоревања добијена за коефицијенту вишка ваздуха $\lambda = 1,30$ (улаз у прегрејач ваздуха 2, према табели 2) на основу табеле 5

t_{gSR} – средња температура продуката сагоревања,

f_g – средњи попречни пресек за пролаз продуката сагоревања.

Средњи попречни пресек за пролаз продуката сагоревања се одређује према:

$$f_g = AF - d_s \cdot m \cdot a' = 163,8 - 0,0603 \cdot 57 \cdot 12,6 = 120,5 \text{ m}^2 \quad (146)$$

где су:

$$AF = a \cdot b = 163,8 \text{ m}^2 - \text{попречни пресек канала} \quad (147)$$

$d_s = 60,3 \text{ mm}$ – спољашњи пречник цеви

$m = 57$ – број завеса

Средња температура продуката сагоревања:

$$t_{gSR} = \frac{t_{gUL} + t_{gIZL}}{2} = \frac{876,9 + 642,1}{2} = 759,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (148)$$

Сада се према изразу (69) брзина гасова може израчунати:

$$W_g = \frac{29,32 \cdot 7,34 \cdot (273,15 + 759,5)}{273,15 \cdot 120,5} = 6,8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (149)$$

Сада се са наведених дијаграма могу прочитати вредности:

$$R_0 = 0,83 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\text{K/W} \quad (150)$$

$$C_d = 1,58$$

$$\Delta R = 0,00172$$

Према изразу (68) вредност топлотног отпора је:

$$R = 0,83 \cdot 10^{-2} \cdot 1,58 + 0,00172 = 0,0149 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (151)$$

Коефицијент прелаза топлоте са продуката сагоревања на зид:

$$\lambda_1 = \lambda_{1K} + \lambda_{1Z} \quad (152)$$

где су:

λ_{1K} – коефицијент прелаза топлоте конвекцијом

λ_{1Z} – коефицијент прелаза топлоте зрачењем

Коефицијент прелаза топлоте зрачењем одређује се на основу зрачења троатомних и вишеатомних гасова. Будући да је количина сумпора у продуктима сагоревања занемарива, занемарује се и утицај зрачења овог гаса.

$$\lambda_{1Z} = \frac{\lambda_{CO_2} + \lambda_{H_2O}}{t_{gUL} - t_{gIZL}} \quad (153)$$

λ_{CO_2} , λ_{H_2O} – коефицијенти прелаза топлоте услед зрачења троатомних гасова који се рачунају према:

$$\lambda_{CO_2} = 11,2 \cdot S \cdot (p_{CO_2} \cdot s)^{0,4} \cdot (0,01 \cdot t_{gSR})^{3,1} \quad (154)$$

$$\lambda_{CO_2} = 11,2 \cdot 0,8 \cdot (0,1519 \cdot 0,28)^{0,4} \cdot (0,01 \cdot 759,5)^{3,1} = 1356,8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\lambda_{H_2O} = 1,31 \cdot S \cdot (40 - 71,4 \cdot p_{H_2O} \cdot s)^{0,6} \cdot (0,01 \cdot t_{gSR})^{2,37 + 1,38^3 \sqrt{(p_{H_2O} \cdot s)}} \quad (155)$$

$$\lambda_{H_2O} = 1,31 \cdot 0,8 \cdot (40 - 71,4 \cdot 0,1938 \cdot 0,31)^{0,6} \cdot (0,01 \cdot 759,5)^{2,37 + 1,383 \sqrt{(0,1938 \cdot 0,31)}} \\ = 3170,4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

где су:

$S = 0,8$ – према препорукама из литературе [13] (на страни 4.327)

$s = 0,28$ – слој који зрачи

$t_{gSR} = 1000,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ – средња температура продуката сагоревања

$p_{H_2O} = 0,1938$ – парцијални притисак H_2O у продуктима сагоревања

$p_{CO_2} = 0,1519$ – парцијални притисак CO_2 у продуктима сагоревања

Слој који зрачи се рачуна према:

$$S = \frac{1,8}{\frac{1}{a'} + \frac{1}{b'} + \frac{1}{c'}} = \frac{1,8}{\frac{1}{a'} + \frac{1}{s_2 - d_s} + \frac{1}{h}} = \frac{1,8}{\frac{1}{12,6} + \frac{1}{0,16} + \frac{1}{5,6}} = 0,28\text{m} \quad (156)$$

Где су :

a', b', c' – ширина, дубина и висина коморе образоване двема суседним завесама.

Сада се из израза (78) може израчунати коефицијент прелаза топлоне зрачењем са троатомних гасова на површину прегрејача паре:

$$\lambda_{IZ} = \frac{3170,4 + 1356,8}{876,9 - 642,1} = 19,3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (157)$$

Коефицијент прелаза топлоте конвекцијом се рачуна:

$$\lambda_{1k} = C_z \cdot C_\Phi \cdot \lambda_{1k} = 1 \cdot 1,1 \cdot 46 = 50,1 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (158)$$

где су коефицијенти узети према литератури [13]:

$C_z = f(z) = 1$ – за број редова по дубини $z > 30$

$C_\Phi = f(t_{gSR}; p_{H_2O}) = 1,1$ – за $p_{H_2O} = 0,1938$ (удио влаге, поглавље 1) и

$t_{gSR} = 759,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

$\lambda_{1d} = f(wg; ds) = 44,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ – коефицијент прелаза топлоте

Коефицијент прелаза топлоте са продуката сагоревања на зид сада се може израчунати према изразу:

$$\lambda_1 = 19,3 + 44,9 = 64,2 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (159)$$

Коефицијент λ_2 који представља коефицијент прелаза топлоте с зида цеви на водену пару се одређује на следећи начин:

$$\lambda_2 = C_{d1} \cdot \lambda'_2 \quad (160)$$

где су коефицијенти узети према литератури [13]:

$$C_{d1} = f(du) = 0,88 \quad (161)$$

$$\lambda'_2 = f(p_{sm}; t_{pSR}; w_p)$$

За усвајање вредности коефицијента прелаза топлоте (λ'_2) потребне су вредности средњег притиска паре p_{sm} , средње температуре паре t_{pSR} , и средње брзине паре w_{sm} . Средњи притисак паре p_{sm} усваја се као константа, на основу притиска прегреане паре.

Средња брзина паре може се одредити на основу једначине континуитета:

$$D_1^N = \rho_p \cdot A_v \cdot W_{sm} = \frac{1}{V_p} \cdot A_v \cdot W_p \quad (162)$$

$$W_p = \frac{V_p \cdot D_1^N}{A_v} = \frac{0,0157 \cdot 180}{0,559} = 5,1 \frac{m}{s} \quad (163)$$

где су:

$D_1 = 180 \text{ kg/s}$ – продукција паре

$v_p = 0,0157 \text{ m}^3/\text{kg}$ – специфична запремина паре, добијена из приручника [11] за притисак прегрејања од 135 бар и средњу температуру паре:

$$t_{pSR} = (399,7 + 333,8)/2 = 366,8 \text{ }^\circ\text{C} \quad (164)$$

Површина из предходног израза је:

$$A_v = m \cdot z \cdot \frac{d_u^2 \cdot \pi}{4} = 57 \cdot 4 \cdot \frac{0,05^2 \cdot 3,14}{4} = 0,559 \text{ m} \quad (165)$$

$$\text{На основу } p_{sm}, t_{pSR} \text{ и } w_p \text{ коефицијент } \lambda'_2 = 2420 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (166)$$

Па је коначно:

$$\lambda_2 = 0,88 \cdot 1060 = 2129,6 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (167)$$

На основу добијених вредности топлотног отпора, коефицијента прелаза топлоте с продуката сагоревања на зид, те с зида на водену пару, добија се коначни коефицијент преноса топлоте, према изразу (67) и износи:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{64,3} + 0,0149 + \frac{1}{2129,6}} = 32,4 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (168)$$

Односно, према изразу (65) површина прегрејача паре износи:

$$A_{0P} = \frac{Q_s}{k \cdot \Delta t_{SRln}} = \frac{81\,360\,000}{32,4 \cdot 412,2} = 6091,9 \text{ m}^2 \quad (169)$$

Грешка износи:

$$\frac{|A_p - A_{0P}|}{A_p} \cdot 100 = \frac{|6119,3 - 6091,9|}{6119,3} \cdot 100 = 0,45 \% < 5 \% \quad (170)$$

што задовољава.

ЗАКЉУЧАК

Основни задатак котловског постројења је трансформација хемијске енергије горива у топлотну енергију радног флуида, а у правилу му је главни део парни котао – проточни систем за трансформацију енергије. У подручју изградње енергетских, топлотних и процесних система проблеми градње парних котлова чине засебно подручје.

У котловском постројењу се настоји постићи што већа ефикасност при претварању енергије. Процес добијања рада може се најбоље приказати у топлотним кружним процесима. Топлотни кружни процес је низ промена стања радног медија. Одвија се у деловима термоенергетског постројења: генератору паре – турбини – кондензатору.

У развоју парних котлова и стројева енергетских постројења постигнут је велики напредак нарочито последњих 50 година. У теоријским решењима, конструктивном извођењу и усвајању нових материјала, примењивани су виши притисци произведене паре и више температуре прегрејања паре. Основне карактеристике развоја парних котлова усмерене су на употребу горива мале топлотне вредности (отпадни угаљ у рудницима) као и на остала отпадна горива.

Пара је реалан гас близу стања кондензације, који знатно одступа од идеалног гаса. Од свих пара најзначајију улогу у термотехници има водена пара. Водена пара се користи као радно тело у парним моторима и као грејни флуид у многим топлотним уређајима. Посебно је значајно што нема штетно дејство на живе организме и животну околину. Како поседује релативно добре термодинамичке особине водена пара је од свих других пара нашла највећу практичну примену.

Прегрејач паре је склоп огревних површина измењивача топлоте у којем се прегрејава водена пара из засићеног стања до одређене температуре прегрејања. У прегрејачу се, осим тога, суши пара која на улазу у прегрејач садржи одређени проценат водених честица (од 1 до 5%). Огревне површине прегрејача паре изводе се у облику снопова челичних бешавних цеви, а према потреби и од легираног челика смештених било у ложишту било у водовима димних гасова. Код савремених великих јединица високог прегрејања паре огревне површине прегрејача подељене су на више делова. Топлота се конвективним пролазом и зрачењем преноси од димних гасова на водену пару која струји цевима прегрејача.

У овом раду је урађен прорачун прегрејача паре једног парног котла на угаљ по избору. Најпре је израчуната количина топлоте размењене у прегрејачу паре и она износи 162720 kW, а пошто су усвојена два прегрејача паре, у сваком од њих се размени половина укупно прихваћене топлоте и износи 81360 kW, по прегрејачу паре. Затим, је израчуната температура паре на излазу из прегрејача паре 2 и добијена је вредност од 1123,3 °C. Након тога добијена је температура на излазу из међупрегрејача паре и она износи 876,9 °C. На излазу из прегрејача паре 1 добијена је температурна вредност од 642,06 °C. Након добијених вредности израчунате су температуре на улазу у прегрејач паре 2 (399,7 °C), на улазу међупрегрејача (352,3 °C) и прегрејача паре 1 (333,8 °C). Након добијених температурних вредности на улазу и излазу прегрејача и међупрегрејача паре, приступило се њиховом прорачуну. Прорачун прегрејача паре 1 и 2 и међупрегрејача подразумева се

израчунавање: дужине цеви прегрејача, површина прегрејача и међупрегрејача, логаритамске температуре, коефицијент преноса топлоте, топлотни отпор кроз зидове цеви и топлотни отпор услед запрљаности, а затим и брзине гасова, средњег попречног пресека за пролаз продуката сагоревања, средње температуре продуката сагоревања, коефицијента прелаза топлоте конвекцијом и зрачењем и слој који зрачи.

Након добијених вредности креирана је шема струјања димних гасова, ваздуха, воде и водене паре (прилог 3), на којој су обележене и добијене вредности.

Прорачуном прегрејача паре добијене су и површине прегрејача паре 1 и 2, као и површина међупрегрејача, па површина прегрејача паре 1 износи $6091,9 \text{ m}^2$, површина прегрејача паре 2 износи $1791,9 \text{ m}^2$, а површина међупрегрејача износи $3731,3 \text{ m}^2$. Из овога се може закључити да је површина прегрејача паре 1 за три пута већа од површине прегрејача паре 2.

На крају, може се закључити да се добијене вредности за сваки од посматраних елемената видно разликују, па је тако температура на излазу из прегрејача паре 1 $642,06 \text{ }^\circ\text{C}$, а на излазу из прегрејача паре 1 $1123,3 \text{ }^\circ\text{C}$, односно на улазу у прегрејач паре 1 $333,8 \text{ }^\circ\text{C}$, а на улазу у прегрејач 2 нешто виша и износи $399,7 \text{ }^\circ\text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ћулчић, Б. (1979). Основи машинства, I део, Парни котлови, X издање, Научна књига, Београд.
- [2] Гулич, Г. (1954). Парни котло, Минерва, Суботица.
- [3] Дедић А. (2009). Основи машинства са примерима решених задатака, Шумарски факултет, Београд.
- [4] Гулич М., Бркић Љ., Перуновић П. (1986). Парни котлови, Машински факултет, Београд.
- [5] Бркић Љ., Живановић Т., Туцаковић Д. (2010). Термички прорачун парних котлова, Машински факултет, Београд.
- [6] Богнер, М., Исаиловић, М. (2015). Термотехничка енергетска постројења, ЕТА, Београд.
- [7] Бојић, М. (2011). Термодинамика, Машински факултет, Крагујевац.
- [8] Ђорђевић, Б. (2015). Термодинамика, Технолошко-металуршки факултет, Београд.
- [9] Шекулић, Р., Козић, Д. (2007). Термодинамика и термотехника, Завод за уџбенике, Београд.
- [10] Стојановић, Б. Јаневски, Ј. (2009). Практикум из парних котлова, Машински факултет, Ниш.
- [11] Козић, Ђ., Васиљевић, Б., Бекавац В. (1983). Приручник за термодинамику и простирање топлоте. Грађевинска књига, Београд.
- [12] Краут, Б. (1987). Стројарски приручник. Техничка књига, Загреб.
- [13] Ђурић, В. (1969). Парни котлови. Грађевинска књига, Београд.

ПРИЛОЗИ

Прилог 1 – Енталпије продуката сагоревања

Прилог 2 – Дијаграм енталпија сагоревања

Прилог 3 – Шема струјања димних гасова, ваздуха, воде и водене паре

Прилог 4 – Шема парног котла

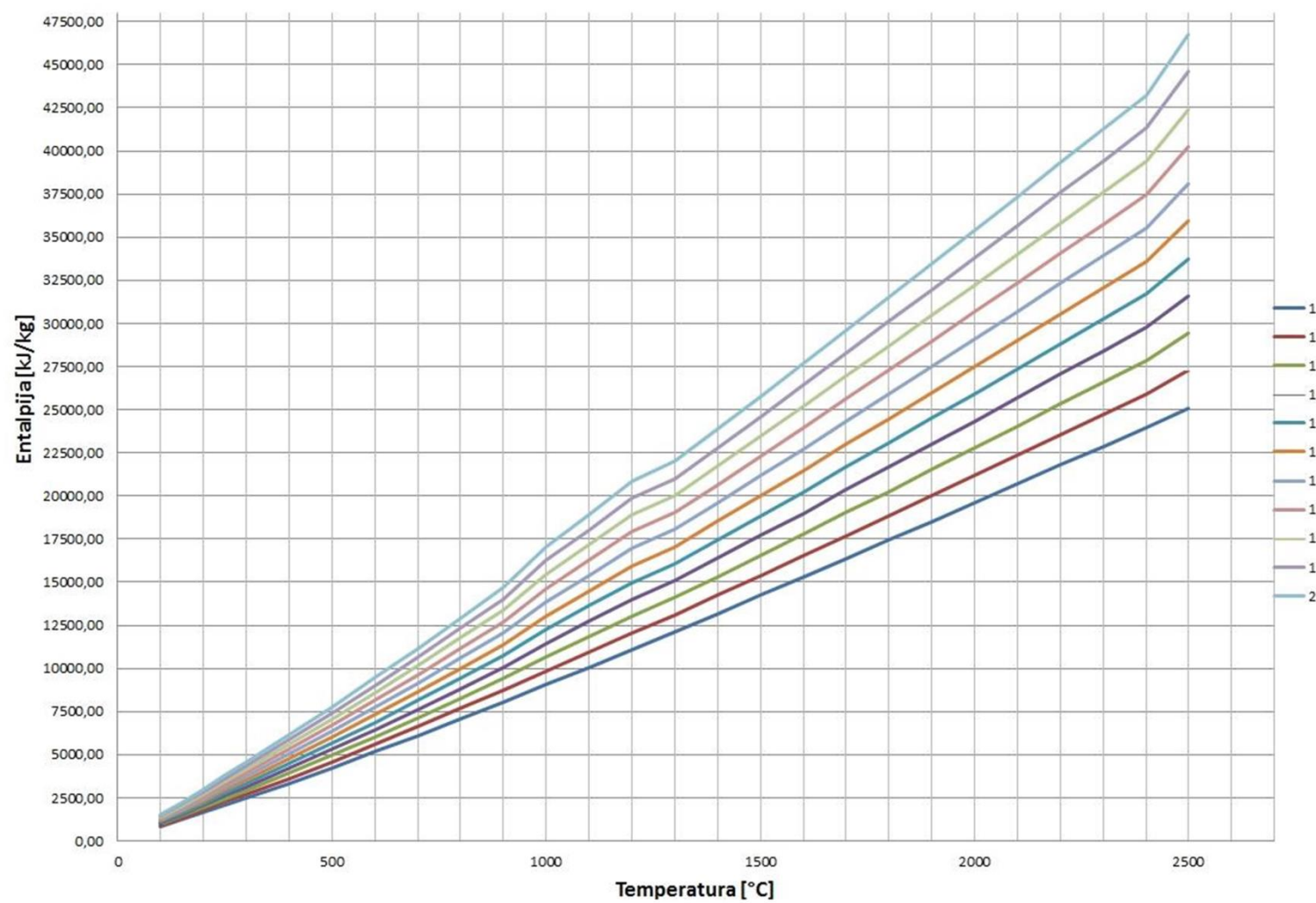
Прилог 5 – Елементи парног котла

ПРИЛОГ 1. – Енталпије продуката сагоревања

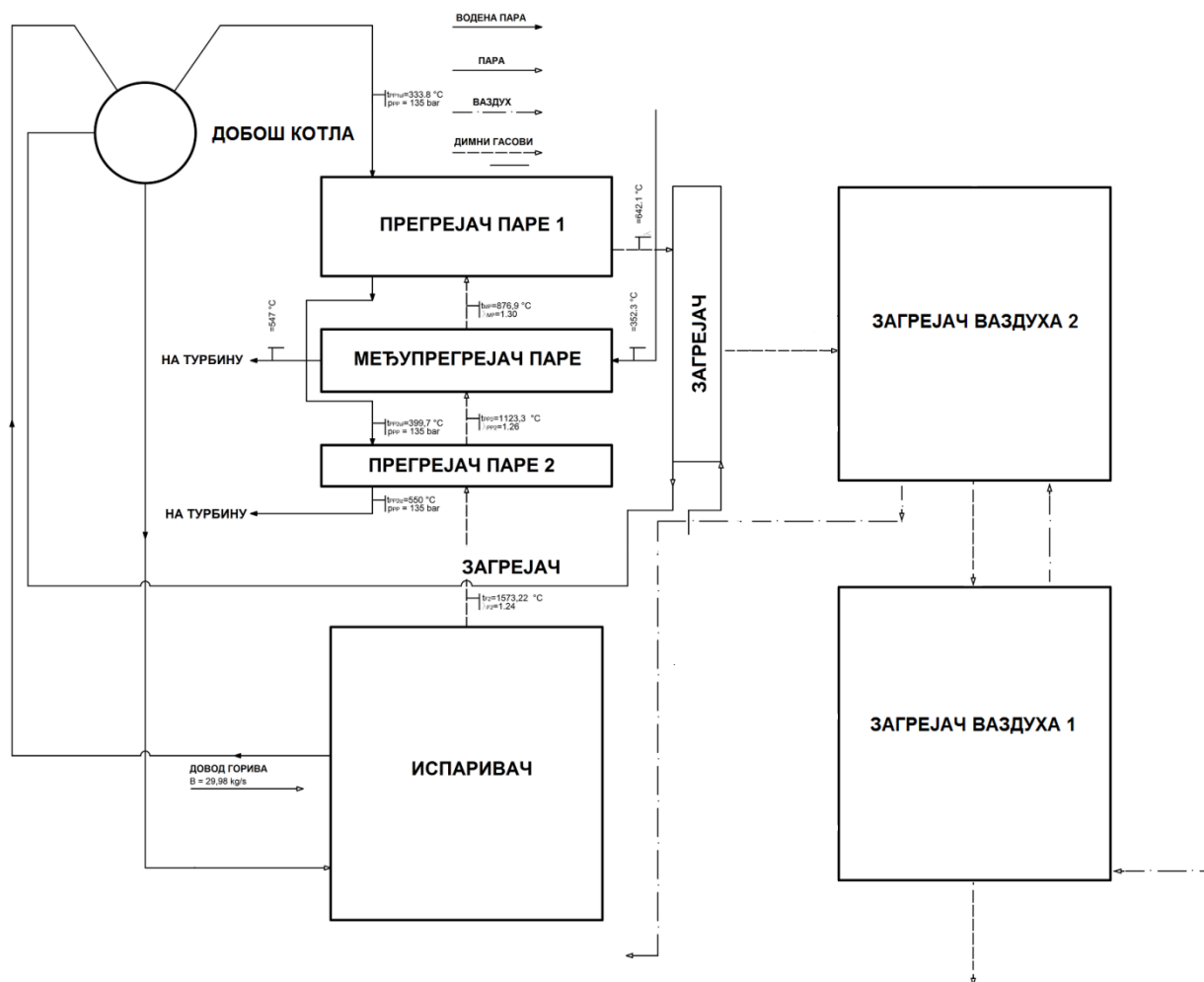
	Енталпија							λ [kJ/kg]										
	ПРОДУКТИ САГОРЕВАЊА				ВАЗДУХ													
	K.P.S	V _i	i _i	V _i *i _i	VLmin	iL	VLmin*iL	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.90	2.00
100	CO ₂	0.98	170.03	166.63	5.26	130.04	684.01											
	H ₂ O	0.59	150.52	88.81														
	SO ₂	0.03	181.37	5.99														
	N ₂	4.16	130.04	540.97														
	Σ	5.76	631.96	802.39														
200	CO ₂	0.98	357.47	350.32	5.26	261.42	1375.07											
	H ₂ O	0.59	304.46	179.63														
	SO ₂	0.03	377.69	12.46														
	N ₂	4.16	260.65	1084.7														
	Σ	5.76	1300.3	1627.1														
300	CO ₂	0.98	558.94	547.76	5.26	395.15	2078.49											
	H ₂ O	0.59	462.64	272.96														
	SO ₂	0.03	587.41	19.38														
	N ₂	4.16	393.27	1636.0														
	Σ	5.76	2002.2	2476.1														
400	CO ₂	0.98	772.05	756.61	5.26	531.72	2796.85											
	H ₂ O	0.59	626.35	369.35														
	SO ₂	0.03	806.80	26.62														
	N ₂	4.16	528.37	2198.0														
	Σ	5.76	2733.5	3350.8														
500	CO ₂	0.98	994.37	974.48	5.26	671.56	3532.41											
	H ₂ O	0.59	795.07	469.09														
	SO ₂	0.03	1034.9	34.15														
	N ₂	4.16	666.12	2771.0														
	Σ	5.76	3490.5	4248.7														
600	CO ₂	0.98	1224.6	1200.1	5.26	813.91	4281.17											
	H ₂ O	0.59	968.83	571.61														
	SO ₂	0.03	1267.3	41.82														
	N ₂	4.16	807.22	3358.0														
	Σ	5.76	4268.0	5171.6														
800	CO ₂	0.98	1704.8	1670.7	5.26	1107.41	5824.98											
	H ₂ O	0.59	1334.3	787.25														
	SO ₂	0.03	1746.7	57.64														
	N ₂	4.16	1097.3	4565.0														
	Σ	5.76	5883.2	7080.6														
1000	CO ₂	0.98	2203.5	2159.4	5.66	1409.70	7977.45											
	H ₂ O	0.59	1722.8	1016.4														
	SO ₂	0.03	2237.8	73.85														
	N ₂	4.16	1397.1	5812.1														
	Σ	5.76	7561.3	9061.8														
1200	CO ₂	0.98	2716.4	2662.0	5.66	1719.10	9728.34											
	H ₂ O	0.59	2132.3	1258.0														
	SO ₂	0.03	2733.9	90.22														

	N ₂	4.16	1704.0	7088.7														
	Σ	5.76	9286.7	11099.29				11099.1	12071.9	13044.8	14017.6	14990.4	15963.3	16936.1	17908.9	18881.8	19854.6	20827.4
1400	CO ₂	0.98	3238.9	3174.1	5.26	2033.95	10698.5											
	H ₂ O	0.59	2558.9	1509.7														
	SO ₂	0.03	3223.0	106.36														
	N ₂	4.16	2016.7	8389.8														
	Σ	5.76	11037.5	13180.0				13180.0	14249.9	15319.8	16389.6	17459.5	18529.13	19599.2	20669.0	21738.9	22808.8	23878.6
1600	CO ₂	0.98	3768.5	3693.1	5.26	2353.4	12378.8											
	H ₂ O	0.59	3001.9	1771.1														
	SO ₂	0.03	3726.2	122.97														
	N ₂	4.16	2333.7	9708.2														
	Σ	5.76	12830.3	15295.4				15295.5	16533.4	17771.3	19009.2	20247.1	21485.0	22722.8	23960.7	25198.6	26436.5	27674.4
1800	CO ₂	0.98	4304.0	4217.9	5.26	2676.20	14076.8											
	H ₂ O	0.59	3458.7	2040.6														
	SO ₂	0.03	4237.0	139.82														
	N ₂	4.16	2654.4	11042.0														
	Σ	5.76	14654.1	17440.3				17440.8	18848.5	20256.2	21663.8	23071.5	24479.2	25886.9	27294.6	28712.2	30109.9	31517.6
2000	CO ₂	0.98	4844.1	4747.2	5.26	301.94	15790.2											
	H ₂ O	0.59	3925.5	2316.0														
	SO ₂	0.03	4768.7	157.37														
	N ₂	4.16	2977.6	12387.0														
	Σ	5.76	16516.9	19607.6				19607.7	21186.7	22765.7	24344.7	25923.7	27502.8	29081.8	30660.8	32239.8	33818.8	35397.9

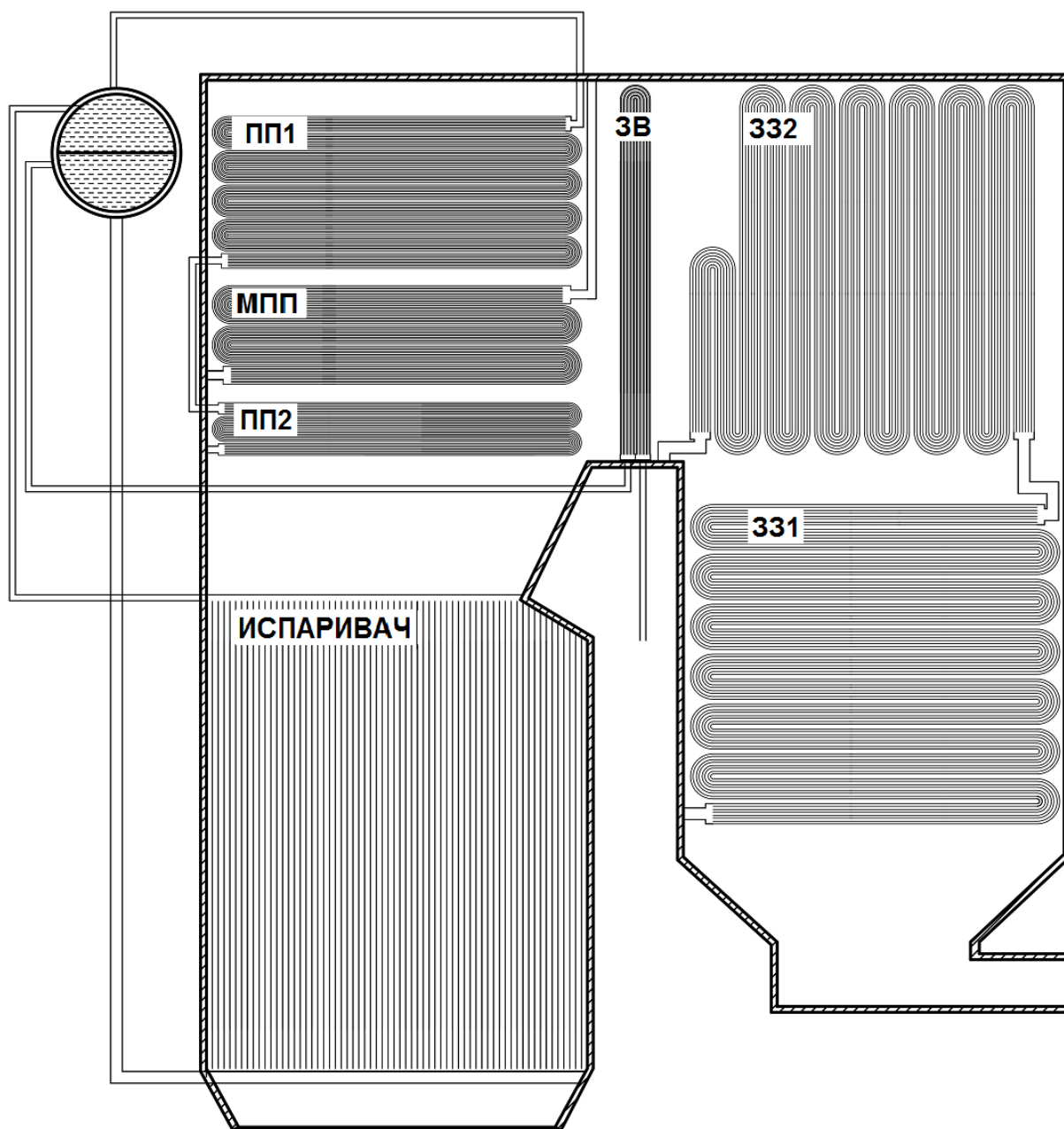
ПРИЛОГ 2 – Дијаграм енталпија сагоревања



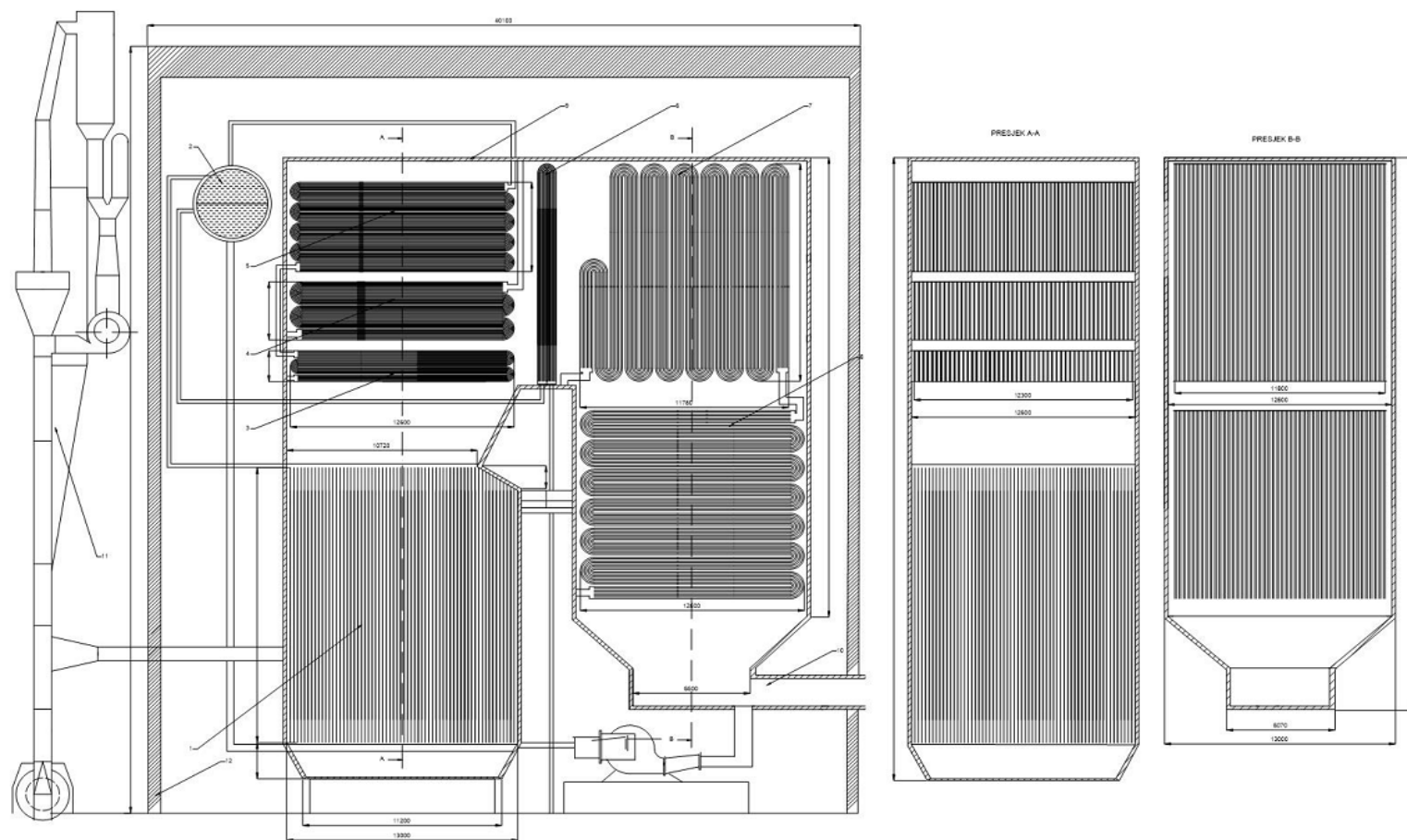
ПРИЛОГ 3 – Шема струјања димних гасова, ваздуха, воде и водене паре



ПРИЛОГ 4 – Шема парног котла



ПРИЛОГ 5 – Елементи парног котла



1- испаривач, 2 - добош котла, 3 - прегрејач паре 2, 4 - међупрегрејач паре, 5 - прегрејач паре 1, 6 - загрејач воде, 7 - загрејач ваздуха 2, 8 - загрејач ваздуха 1, 9 - оплата котла, 10 - димни канал, 11 - млин за угаљ, 12 - носећа конструкција