

**Мирјана С. Лаковић\*, Слободан В. Лаковић, Велимир П. Сиџефовић,  
Младен М. Сиџојиљковић, Драгољуб С. Живковић, Предраг М. Живковић**

Машински факултет, Универзитет у Нишу, Ниш, Србија

## **Дневна промена притиска у кондензатору повратно хлађеног парног блока за просечан летњи дан**

Стручни рад

UDC: 621.311.22:66.045.1

*Промене притиска у кондензатору око пројектне вредности значајно утичу на економичност рада турбогенераторског дела парног блока, имајући у виду стив да промена притиска кондензације од 1 кРа води промени стивена искориштења од 1%. До промене притиска у кондензатору долази пре свега услед промене температуре и/или пројока расхладне воде кондензатора, и код термоелектрана које имају пројочни систем хлађења, а још изразитије код повратно хлађених парних блокова. Код повратно хлађених блокова промене параметара, пре свега релативне влажност и температуру атмосферског ваздуха, директно утичу на промену температуре воде охлађене у расхладном торњу, а тиме и улазне температуре расхладне воде кондензатора. Ова промена условљава промену притиска кондензације. Како су промене параметара атмосферског ваздуха стивне и врло изражене у току једног дана, на тај начин настају дневне осцилације у стивену искориштења простројења, односно дневне промене у ефикасности рада парног блока. Ово је нарочито изражено у летњем периоду, где због пораста температуре атмосферског ваздуха долази до пада ефикасности рада простројења.*

*У овом раду разматрана је дневна промена температуре охлађене воде у расхладном торњу са принудном промајом, и утицај ове промене на притисак у кондензатору парног блока А5 термоелектране „Колубара А”, снаге 110 MW за један просечан летњи дан, у зависности од параметара атмосферског ваздуха. Температура и релативна влажност атмосферског ваздуха су очивавани на сваких сив времена у току изабраног дана са аутоматске метеоролошке мерне стивнице у непосредној близини референчног простројења. Добијени резултати се могу генерализовати за дужи временски период.*

**Кључне речи:** притисак кондензације, релативна влажност и температура ваздуха, расхладна вода, енергетска ефикасност

---

\* Одговорни аутор; електронска адреса: lmirjana@masfak.ni.ac.rs

## **Увод**

Свако, макар и мало побољшање енергетске ефикасности термоенергетских постројења води великим економским уштедама, ако се има у виду да су ова постројења основни произвођачи електричне енергије и код нас и у свету. У том смислу се може рећи да се основни задатак енергетике у будућности огледа управо у повећању енергетске ефикасности термоенергетских постројења.

Због недостатка довољних количина проточне расхладне воде данас се све више примењују рецикулациони (повратни) системи за хлађење. Због својих техничких карактеристика влажни расхладни торњеви са природном промајом су погодни за примену на базним блоковима веће снаге.

Без обзира на то који систем хлађења је примењен, могућност система расхладне воде да одведе отпадну топлоту зависи од локалних временских прилика. У летњем периоду, због пораста температуре расхладне воде смањује се генерисана снага постројења и код проточног и код повратног хлађења. Ово представља значајан проблем, посебно ако се у обзир узме да се у периоду високих температура повећава потрошња електричне енергије због рада уређаја за хлађење зграда. Екстремно високе температуре у летњем периоду могу довести и до неопходности искључивања из погона агрегата из еколошких и сигурносних разлога, што је посебно изражено код нуклеарних термоенергетских постројења.

Климатске промене настале као резултат глобалног загревања огледају се у промени температуре ваздуха, количине атмосферских падавина, промене водених ресурса, појаве олуја и суша, порасту нивоа мора и слично. Уопште узев, постојећа индустријска и енергетска инфраструктура није под превеликим утицајем ових промена. Ипак, локални утицаји као и утицаји у појединим индустријама могу бити велики. При томе треба нагласити да и најмањи губици у производњи електричне енергије воде великим економским губицима.

Најдиректнији утицај климатских промена насталих услед глобалног загревања на производњу електричне енергије у конвенционалним термоелектранама на фосилна горива огледа се, како је већ наглашено, у делу система за хлађење, односно могућности да се одведе отпадна топлота. Како се предвиђа, климатске промене ће довести не само до повећања температуре ваздуха већ и до смањења расположиве количине воде за хлађење, што све повећава ефекат смањења ефикасности и чак поузданости производње електричне енергије у блиској будућности.

## **Проточно и повратно хлађење**

Данас се у свету од укупне потрошње воде на пиће односи 2–6%, а на хлађење 60–80%. Поуздано се може рећи да недостатак проточне расхладне воде представља ограничавајући фактор изградњи нових и проширивању постојећих енергетских и индустријских капацитета и да ће се овај проблем, с обзиром на ограниченост водених ресурса и све израженије еколошке захтеве у будућности, постављати у све оштријем виду [1].

Тамо где није могуће применити проточно, користи се повратно хлађење. У том случају вода је посредник при предаји топлоте од уређаја који се хлади у атмосферском ваздуху. Као хладњак у систему повратног хлађења могу бити расхладна језера, расхладни базени, суви расхладни торњеви и влажни расхладни торњеви.

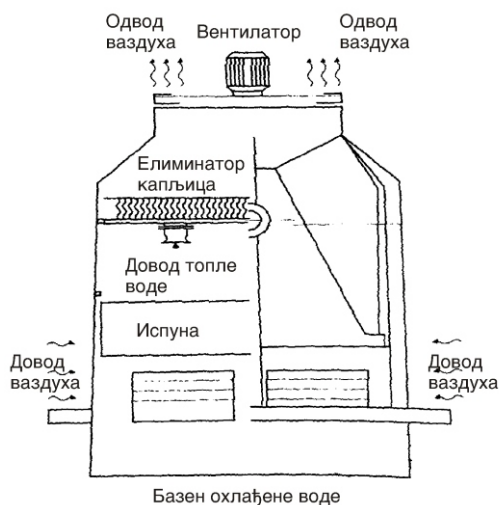
Због својих техничких карактеристика влажни расхладни торњеви са природном промајом су погодни за примену на базним блоковима веће снаге. Ограниченост расположивих терена на локацији чини примену ових торњева повољнијом од осталих система, нарочито у случају великих концентрација капацитета на једном месту. Инвестициона улагања у влажне расхладне торњеве са природном промајом су релативно висока, 6–9 \$/kW. Експлоатациони трошкови су нижи, тако да су укупно повољнији за снаге изнад 150–200 MW.

Због својих техничких и економских карактеристика, влажни расхладни торњеви са вештачком промајом су погодни за еластичан рад како за велике тако и за мале капацитете. Неповољнији ефекти у погледу локације вентилаторских расхладних торњева долазе до изражаја при већим снагама, како у погледу потребне површине терена, тако и у погледу влажења околине и стварања буке, нарочито у случају веће концентрације објеката на једном месту. Ови торњеви имају једноставнију регулацију протока ваздуха и воде. Релативна влажност ваздуха мало утиче на карактеристике торња. Овом торњу се често као недостатак приписује могуће мешање паре и димних гасова код термоелектрана на фосилна горива (сл. 1).

Инвестиције у вентилаторски расхладни торањ за веће капацитете износе 5–8 \$/kW. Због већих погонских трошкова (потрошња енергије, расположивост, инвестиционо одржавање), ови торњеви се могу показати нееконичнијим, нарочито за базна оптерећења при већим снагама.

### Опис постројења

Парни блок ради у затвореном кружном Ранкиновом циклусу чији степен искоришћења зависи од ширине температурног подручја у којем се процес обавља. На тај начин, и термодинамички степен искоришћења циклуса, а самим тим и стварни степен искоришћења постројења зависи, осим од почетних параметара паре, и од температуре предаје топлоте спољној околини, односно температуре кондензације. Код парног блока топлота се предаје расхладној води у кондензатору, који је површински рекуперативни измењивач топлоте непроменљивих димензија. Због



Слика 1. Расхладна кула са принудном промајом

промене температуре расхладне воде мењају се услови рада кондензатора што изазива промену његовог капацитета и притиска кондензације, а тиме и температуре кондензације. То, у складу са реченим, доводи до промене и снаге и степена искоришћења блока, односно енергетске ефикасности постројења.

Термоелектрана „Колубара А” најстарија је активна термоелектрана у Електропривреди Србије. Лоцирана је на ивици колубарског угљеног басена, у Великим Црљенима у близини Лазаревца. Електрана има пет блокова – три од 32 MW и по један од 65 и 110 MW инсталисане снаге. У овом раду разматран је хладни крај блока А5 110 MW. Коришћени подаци о блоку су дати у литератури [2].

Пројектовано је да се кондензатор блока А5 110 MW ТЕ „Колубара А” у Доњим Црљенима хлади системом од 10 расхладних торњева са принудном промајом. У функцији је, међутим, 8 расхладних торњева (хелија).

### **Параметри атмосферског ваздуха разматране локације**

Један од задатка јесте одређивање промене температуре воде у влажном расхладном торњу услед дневне промене температуре атмосферског ваздуха и утицаја овакве дневне промене на промену генерисане снаге и специфичне потрошње топлоте термоелектране односно дневне промене енергетске ефикасности парног блока услед промене параметара атмосферског ваздуха. Без обзира на то који систем хлађења је примењен, могућност система расхладне воде да одведе отпадну топлоту зависи од локалних временских прилика. У летњем периоду, због пораста температуре расхладне воде смањује се генерисана снага постројења и код проточног и код повратног хлађења. Ово представља значајан проблем, посебно ако се у обзир узме да се у периоду високих температура повећава потрошња електричне енергије због рада уређаја за хлађење. Екстремно високе температуре у летњем периоду могу довести и до неопходности искључивања из погона агрегата из еколошких и сигурносних разлога, што је посебно изражено код нуклеарних термоенергетских постројења.

При примењеном проточном хлађењу кондензатора парног блока, температура расхладне воде на улазу у кондензатор зависи од температуре природног водотока за хлађење, и зависи пре свега од периода године. Због тога се код ових система перформансе расхладног система електране, а тиме и енергетска ефикасност у смислу постизања задатог оптерећења и специфичне потрошње топлоте значајно разликују у зимском и летњем режиму рада. У наредном периоду истраживања на овом пројекту посебна пажња ће бити посвећена проблему смањења енергетске ефикасности постројења у летњем периоду и начину превазилажења тог проблема.

У расхладном торњу, температура охлађене воде зависи од параметара атмосферског ваздуха. Због дневне промене температуре расхладне воде мењају се услови рада кондензатора што изазива промену његовог капацитета и притиска кондензације [3]. То доводи до дневне промене и снаге и степена искоришћења блока, односно енергетске ефикасности постројења [4].

За постављен физички и математички модел процеса у расхладном торњу урађен је прорачун за променљиве параметре атмосферског ваздуха, коришћењем одговарајућег софтверског алата. Излаз из нумеричког прорачуна је сноп кривих

зависности температуре охлађене воде у торњу за дневну промену температуре атмосферског ваздуха, за различите вредности протока охлађене воде. Крива зависности температуре охлађене воде на излазу из расхладног торња биће улазна величина за симулацију рада кондензаторског постројења референтног објекта у даљем раду на овом пројекту.

За наведене прорачуне урађен је преглед климатских параметара, пре свега температуре атмосферског ваздуха и његове релативне влажности, како у екстремним периодима године, тако и у току просечног дана и седмице, коришћењем мерања добијених на аутоматским мерним станицама референтног објекта.

Параметри атмосферског ваздуха коришћени су даље у симулацији рада расхладног торња, како би се добила температура воде охлађене у торњу, да би затим ова температура била улазни параметар за симулацију рада кондензатора.

### Прорачун и резултати

Урађен је математички модел кондензаторског дела постројења, и на основу овог математичког модела урађена је симулација рада кондензаторског дела постројења [5]. При овоме се проток расхладне воде кондензатора и проток паре кроз кондензатор сматрају константним, како би се показао утицај промене температуре расхладне воде на промену притиска у кондензатору.

За кондензатор одређене конструкције (број пролаза расхладне воде) и задатог парног оптерећења, један од најчешће коришћених израза за прорачун коефицијента пролаза топлоте јесте израз Бермана [6]:

$$K = 3500\beta \frac{1.1w}{\sqrt[4]{D_1}}^x \left(1 - \frac{0.42\sqrt{\beta}}{1000}(35 - t_1)^2\right) \phi_z \phi_\delta \quad (1)$$

где је:

$$x = 0.12\beta(1 + 0.15t_1),$$

$\beta$  – коефицијент запрљаности површине;  $\beta = 0,80-0,85$  за проточно хлађење и чисту воду;  $\beta = 0,75-0,80$  за циркулационо хлађење и хемијски обрађену воду;  $\beta = 0,65-0,75$  за прљаву воду и присутне минералне насlage,

$w$  – брзина расхладне воде,

$t_1$  – температура расхладне воде на улазу у кондензатор,

$\phi_z$  – фактор који урачунава број ходова воде:

$$\phi_z = 1 - \frac{z-2}{10} + \frac{t_1}{35} \quad (2)$$

$z$  – број пролаза воде,

$\phi_\delta$  – фактор који урачунава утицај парног оптерећења кондензатора:

– при парном оптерећењу од номиналног  $d_k^{\text{nom}}$  до граничног  $d_k^{\text{gr}} = (0.09 - 0.012t_1)d_k^{\text{nom}}$ ,

$\phi_\delta = 1$ , и

– за парно оптерећење  $d_k$   $d_k^{\text{gr}}$ :  $\phi_\delta = \delta(2 - \delta)$ ;  $\delta = \frac{d_k}{d_k^{\text{gr}}}$ ;  $d_k$  [N/m<sup>2</sup>h] (3)

Прорачун је урађен у програмском језику Visual Basic у Microsoft Excel окружењу. Као резултат добијена је карактеристика кондензатора, која даје зависност притиска кондензације од температуре расхладне воде, како је приказано на сл. 2. Очигледно је да са порастом температуре расхладне воде, расте притисак кондензације уколико се снага постројења односно проток паре сматрају константним. То је последица смањења капацитета кондензатора да одведе топлоту од паре која се кондензује, па да би се овај капацитет вратио на задати ниво неопходно је да се повећа притисак кондензације односно температурна разлика у кондензатору.

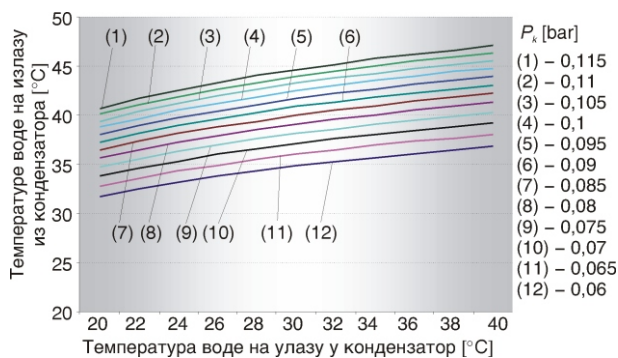


Слика 2. Промена притиска у кондензатору са порастом температуре расхладне воде

$$t_2 = t_1 e^{\frac{FC}{G_w c_w}} - t_k \quad (4)$$

где је:

$t_2$  температура расхладне воде на излазу из кондензатора,  $t_k$  температура кондензације,  $G_w, c_w$  проток и специфични топлотни капацитет воде,  $F$  површина кондензатора, и  $K$  коефицијент пролаза топлоте у кондензатору.



Слика 3. Промена температуре расхладне воде на излазу из кондензатора

Са променом притиска кондензације условљеним променом температуре расхладне воде промениће се и излазна температура воде из кондензатора. Нову излазну температуру воде која напушта кондензатор и одлази у расхладни торањ можемо израчунати на основу израза:

Температура расхладне воде на излазу из кондензатора је улазна величина за симулацију процеса хлађења те воде у расхладном торњу. Промена температуре расхладне воде на излазу из кондензатора у зависности од температуре воде на улазу у кондензатор и притиска кондензације приказана је на сл. 3.

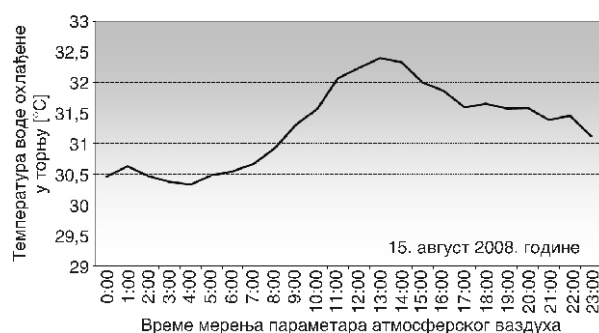
Након симулације рада кондензатора са добијеним

зависностима, урађена је симулација рада расхладног торња, са циљем да се добије зависност температуре воде охлађене у торњу од температуре и релативне влажности атмосферског ваздуха. Параметри атмосферског ваздуха за изабран летњи дан добијени су са аутоматске мерне станице у непосредној близини објекта, и дати су у табл. 1. Узимајући као полазне параметре ваздуха температуру сувог термометра и релативну влажност ваздуха за сваки сат мерења у току изабраног дана, добијена је промена температуре охлађене воде на излазу из расхладног торња у току 24 сата, на сваки сат мерења параметара ваздуха.

**Таблица 1. Измерени параметри атмосферског ваздуха („Колубара А” 15. августа 2008. године)**

Време	Температура	Тачка росе	Температура влажног термометра	Релативна влажност	Притисак
0:00 AM	27,0 C	13,0 C	18,0 C	42%	1012 hPa
1:00 AM	26,0 C	14,0 C	18,4 C	47%	1012 hPa
2:00 AM	25,0 C	13,0 C	17,5 C	47%	1011 hPa
3:00 AM	23,0 C	14,0 C	17,4 C	57%	1011 hPa
4:00 AM	23,0 C	14,0 C	17,4 C	57%	1010 hPa
5:00 AM	25,0 C	14,0 C	18,1 C	50%	1009 hPa
6:00 AM	25,0 C	14,0 C	18,1 C	50%	1009 hPa
7:00 AM	26,0 C	14,0 C	18,4 C	47%	1009 hPa
8:00 AM	28,0 C	14,0 C	19,1 C	42%	1009 hPa
9:00 AM	31,0 C	14,0 C	,0 C	35%	1009 hPa
10:00 AM	32,0 C	14,0 C	20,4 C	33%	1009 hPa
11:00 AM	34,0 C	15,0 C	21,5 °C	32%	1008 hPa
12:00 PM	35,0 C	13,0 C	20,8 °C	26%	1008 hPa
1:00 PM	36,0 C	14,0 C	20,6°C	27%	1007 hPa
2:00 PM	38,0 C	12,0 C	20,3°C	21%	1006 hPa
3:00 PM	38,0 C	10,0 C	20,5°C	18%	1005 hPa
4:00 PM	38,0 C	10,0 C	20,5°C	18%	1005 hPa
5:00 PM	38,0 C	12,0 C	21,3°C	13%	1003 hPa
6:00 PM	37,0 C	11,0 C	20,6 °C	21%	1003 hPa
7:00 PM	35,0 C	11,0 C	20,0 °C	23%	1003 hPa
8:00 PM	34,0 C	12,0 C	20.1 °C	26%	1002 hPa
9:00 PM	33,0 C	13,0 C	20.2 °C	29%	1002 hPa
10:00 PM	32,0 C	13,0 C	19.9 °C	31%	1003 hPa
11:00 PM	31,0 C	11,0 C	19.6 °C	29%	1002 hPa

Ова промена приказана је на сл. 4. Може се видети да у најтоплијем делу дана температура воде на излазу значајно расте, а тиме је и температура воде на улазу у кондензатор постројења виша, што опет доводи до пораста притиска у кондензатору, а ово смањењу степена искоришћења целог постројења [8, 9]. Узимајући ове вредности добијене на излазу из расхладног торња као улазне вредности температуре расхладне воде за симулацију рада кондензатора, добијена је дневна промена притиска кондензације у наведеном кондензатору за изабрани летњи дан, као што је приказано на сл. 5.



Слика 4. Промена температуре охлађене воде у расхладном торњу



Слика 5. Промена температуре охлађене воде у расхладном торњу

параметара атмосферског ваздуха (атмосферског притиска, температуре сувог термометра, релативне влажности ваздуха), за један просечан летњи дан, на промену притиска кондензације изабраног термоенергетског парног постројења. Постројење

Као што се види, у току најтоплијег дела дана, као резултат пораста температуре атмосферског ваздуха притисак у кондензатору порасте за скоро 1 kPa. Нешто нижи притисак у 18 h добијен је као резултат метеоролошких услова, јер је у том периоду измерена значајно нижа релативна влажност у околини термоелектране, што је резултирало нешто бољим хлађењем воде у торњу, а тиме и нешто нижим притиском у кондензатору.

#### Закључак

Све изразитије климатске промене имају значајан утицај на рад термоенергетских постројења, који се пре свега огледа у промени услова рада хладног краја постројења. Пораст температуре атмосферског ваздуха води порасту температуре расхладне воде кондензатора, што узрокује смањење енергетске ефикасности рада постројења. Разматран је утицај



се налази у централној Србији и има повратни систем хлађења расхладне воде кондензатора са расхладним торњевима са принудном циркулацијом ваздуха.

Пораст температуре атмосферског ваздуха у топлијем делу дана доводи до погоршања услова хлађења воде у расхладном торњу. Виша температура воде охлађене у торњу односно улазне температуре расхладне воде кондензатора доводи до пораста притиска у кондензатору, а такође и до више температуре воде на излазу из кондензатора. То значи да ће на улазу у расхладни торањ температура воде такође порастати, чиме су додатно погоршани услови хлађења. Добијени резултати указују на то да се у току просечног летњег дана притисак у кондензатору услед лошијих услова хлађења воде у расхладном торњу мења за око 1 kPa. Промене притиска у кондензатору термоенергетског постројења значајно утичу на економичност рада турбогенераторског дела постројења, имајући у виду да свака промена притиска од 1 kPa води промени степена искоришћења постројења од 1% [10].

Како и најмање побољшање степена искоришћења постројења води великим економским уштедама, требало би посветити значајно већу пажњу оптималнијем раду хладног краја постројења, у смислу реконструкције расхладних торњева (повећање површине размене топлоте, узимање оштријих пројектних услова при пројектовању) као и конструкцији и одржавању кондензатора (исправно димензионисање у смислу довољне површине размене топлоте, могућност варијације протока расхладне воде, перманентно чишћење кондензаторских цеви, исправна хемијска и механичка припрема воде), а све у циљу повећања степена искоришћења постројења, посебно у топлијем делу године.

## Литература

- [1] Laković, S., Stojiljković, M., Laković, M., Today's Condition and the Future of the Cooling Towers, ASME-ZSIS International Thermal Science Seminar (*ITSS II Proceedings*), Bled, Slovenia, June 13-16, 2004
- [2] Лаковић, С., и др., Одређивање карактеристика хладног краја термоелектрана, референтно постројење ТЕ „Колубара А” 110 MW, Елаборат извештаја за прву годину истраживања на пројекту ТР 18006, Ниш, 2009.
- [3] Лаковић, С., Лаковић, М., Стојиљковић, М., Утицај температуре расхладне воде на енергетску ефикасност парног моно блока, Симпозијум термичара Србије и Црне Горе, *Зборник на комјакатн диску, Симијерм 2005*, Соко Бања, 18–21. октобар 2005.
- [4] Harpster, J. W., Putman, R. E., The Economic Effects of Condenser Backpressure on Heat Rate, Condensate Sub-Cooling and Feedwater Dissolved Oxygen, *Proceedings, 2000 International Joint Power Generation Conference*, Miami Beach, Fla., USA, July 23-26, 2000
- [5] Лаковић, С., Лаковић, М., Живковић, Д., Митровић, Д., Утицај димензија и услова рада кондензатора на енергетску ефикасност парног моно блока, Симпозијум, *Електиране 2004*, Врњачка Бања, Октобар/Новембар 2004
- [6] Berman, L. D., *Evaporative Cooling of Circulation Water*, Pergamon Press, London, 1961
- [7] Лаковић, М., Утицај услова рада хладног краја на енергетску ефикасност парног моно блока, Магистарски рад, Машински факултет у Нишу, Ниш 2005.
- [8] Kromhout, J., Goudappel, E., Pechtl, P., Economic Optimization of a 540 Mwe Coal Fired Power Plant Using Thermodynamic Simulation, *VGB Powertech*, 81 (2001), 11, 43-46
- [9] Zhao, B., Liu, L., Zhang, W., Optimization of Cold End System of Steam Turbine, *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 2 (2008), 3, 348-353
- [10] Truhnii, A. D., Losev, S. M., *Stationary Steam Turbines*, Energoizdat, Moscow, 1981.

**Abstract**

**Condensing Pressure Daily Variation in the  
Steam Power Plant with Closed Cycle Cooling  
System during Summer Day**

by

*Mirjana S. LAKOVIĆ\**, *Slobodan V. LAKOVIĆ*, *Velimir P. STEFANOVIĆ*,  
*Mladen M. STOJILJKOVIĆ*, *Dragoljub S. ŽIVKOVIĆ*, and *Predrag M. ŽIVKOVIĆ*

**Faculty of Mechanical Engineering, University of Niš, Niš, Serbia**

Energy efficiency of the steam power plant strongly depends on the condenser pressure. Changes in condensing pressure of 1 kPa leads to change in energy efficiency of 1%. Change of the pressure in the condenser occurs primarily due to changes in temperature and / or the flow rate of cooling water at power plants with once-through cooling system, and more expressive in plants with closed-cycle cooling system. Changes of atmospheric air parameters, especially relative humidity and temperature, directly affect the temperature change of the water on output of the cooling tower, and in that way of the inlet temperature in the condenser. This change causes a change of condensing pressure. Air parameters are changing continuously with significant fluctuations during one day. Due to those fluctuations, daily fluctuation of energy efficiency of the power plant occurs. This is especially pronounced during the summer, when high air temperature leads to decrease the efficiency of the plant.

In this paper, the daily changes in temperature of water cooled in the cooling tower with forced draft depending on the atmospheric air parameters for an average summer day are considered. Also, impact of those changes on the condensing pressure, thus air parameters influence on this pressure is obtained for the reference plant, 110 MW power plant "Kolubara A", unit A5. Air relative humidity and temperature are obtained for every hour during selected days with automatic meteorological measuring stations located in the vicinity of the reference plant. The results can be generalized for a longer period of time.

*Key words: condensing pressure, air temperature and relative humidity, cooling water, energy efficiency*

\*Corresponding author; e-mail: lmirjana@masfak.ni.ac.rs