

*Душица Голубовић\*, Душан Голубовић, Срђан Васковић,  
Дејана Бољдановић, Миленка Лаловић*

**Машински факултет, Универзитет у Источном Сарајеву,  
Источно Сарајево, Република Српска, Босна и Херцеговина**

## **Енергетска ефикасност хлађења у хиперболоидној расхладној кули термоелектране**

Стручни рад  
УДК: 66.045.1:621.362

*У раду су приказани утицајни фактори на хлађење воде у хипер-  
болоидној расхладној кули термоелектране. Анализирани су про-  
јектни технолошки подаци, термичке и аеродинамичке карактери-  
стике исјуне и униформности шокова воде и ваздуха. На примеру  
блока термоелектране снаге 300 MW анализирано је побољшање  
енергетске ефикасности хлађења воде применом савремених реше-  
ња исјуне кула.*

**Кључне речи:** *хиперболоидна расхладна кула, ефикасност  
хлађења*

### **Увод**

Повратно хлађење технолошке воде у термоелектранама обавља се приме-  
ном рецикулационих система хлађења. Основни елемент ових система је расхладна  
кула. Хлађење воде у расхладним кулама обавља се атмосферским ваздухом. Ако су  
вода и ваздух у директном контакту, користи се израз „влажна расхладна кула”, а у  
случају постојања површи раздвајања фаза „сува расхладна кула”. Струјање ваздуха  
кроз кулу може бити природно или принудно (вештачко) са усисним или потисним  
вентилаторима. У термоелектранама, због потреба за великом количином расхладне  
воде, најчешће се користе хиперболоидне расхладне куле са природним струјањем  
ваздуха. Проток ваздуха пропорционалан је висини куле и разлици густина ваздуха на  
улазу и излазу из куле.

---

\* Одговорни аутор; електронска адреса: golubovicd@nadlanu.com

Ток струјања воде и ваздуха може бити: противструјни, унакрсни и комбиновани. Типови испуна за хлађење воде су: капљичасти, филмски и филмско-капљичасти. Конструкција плашта хиперболоидне куле је бетонска или челична.

Хлађење воде у кулама зависи од више фактора, на пример:

- номиналног воденог оптерећења (густина кише),
- глобалне дистрибуције воде по попречном пресеку,
- распршивање воде у капљице различитих димензија или формирања филма воде, и
- контактне површи воде и ваздуха у испуни.

### **Основни пројектни подаци за пројектовање хиперболоидне расхладне куле термоелектране (блок 300 MW)**

- Номинална снага блока:  $N = 300 \text{ MW}$ ,
- Тип расхладне куле: влажна противструјна са природним хлађењем,
- Проток расхладне воде:  $q_{vw} = 38000 \text{ m}^3/\text{h}$ ,
- Температура хладне воде (на излазу из куле):  $t_{w2} = 28 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- Температура топле воде (на улазу у кулу):  $t_{w1} = 38 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- Разлика температура воде (зона хлађења):  $\Delta t_w = t_{w1} - t_{w2} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- Температура атмосферског ваздуха – суви термометар:  $t_v = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- Релативна влажност ваздуха:  $\varphi = 33\%$ ,
- Температура влажног термометра:  $t_{WB} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- Барометарски притисак:  $p_b = 980 \text{ mbar}$ ,
- Брзина ветра:  $v_v = 2 \text{ m/s}$ ,
- Степен сеизмичности локације:  $8^\circ \text{ MCS}$ ,
- Базен расхладне воде подељен на два независна дела,
- Распршивање воде је гравитационо преко профилисаних распршивача,
- Испуна куле је пластична за филмско-капљичасти ток воде,
- Струјање воде и ваздуха је противструјно,
- Систем за распршивање воде је у комбинацији отворених канала и ценовода,
- Елиминатори капљица су пластични,
- Бетонска љуска торња је хиперболоидна,
- Допуна воде је из акумулационог језера; карбонатна тврдоћа  $2^\circ \text{ DH}$ ,
- Максимална карбонатна тврдоћа расхладне воде,  $10^\circ \text{ DH}$ , и
- Висина улаза топле воде у односу на ниво воде у базену,  $z = 11 \text{ m}$ .

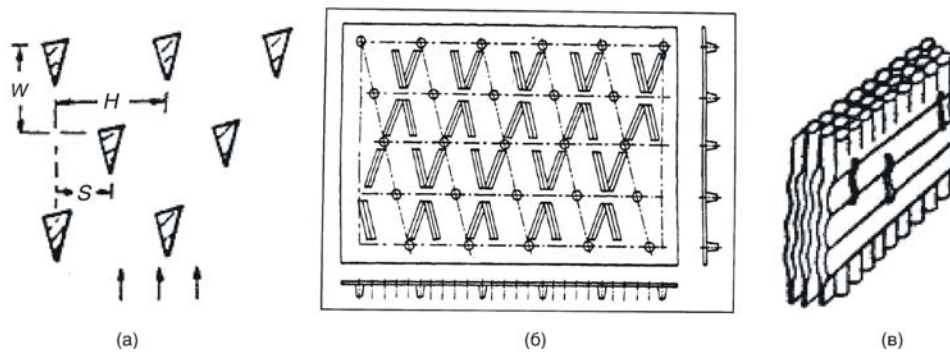
### **Испуна расхладних кула**

У пракси се користе следеће врсте испуна у зависности од токова воде, тј.

- (а) капљичасти ток, (К),
- (б) филмско-капљичасти ток (Ф-К), и
- (в) филмски ток, (Ф)

За анализу хлађења у овом раду коришћена су сва три типа испуна (сл. 1).

- (а) дрвена троугласта испуна, (К),
- (б) рељефна филмско-капљичаста испуна, (Ф-К), и



Слика 1. Типови испуна

(в) пластична профилисана испуна, ( $\Phi$ ).

### Технолошки прорачун расхладне куле

#### Основе термичког и аеродинамичког прорачуна

Главна једначина која описује процес преношења топлоте и супстанције у расхладном торњу [1, 2] познат као Меркелова главна једначина [1–3] је:

$$\int_{t_{w1}}^{t_{w2}} \frac{c_{pw} dt_w}{h_{vs} - h_v} = \frac{\beta_{XV} V}{q_{mw}} \quad (1)$$

Карактеристика испуне изражена је у облику Меркеловог броја:

$$\frac{\beta_{XV} V}{q_{mw}} = A \lambda^n h_p \quad (2)$$

где су  $A$  и  $n$  коефицијенти добијени експериментално. Основна релација за узгон ваздуха је:

$$h_{uz} = (\lambda q)^2 \frac{\zeta_t}{g(\rho_{v1}^2 - \rho_{v2}^2)} \quad (3)$$

Детаљи термичког и аеродинамичког прорачуна дати су у ранијим радовима аутора [3–5].

За дате конкретне пројектне податке, узимајући ваздушни број  $\lambda = 0,7$ , добијена је вредност Меркеловог броја,  $Me = 1,77$ .

Површински водени флуks (густина кише)  $q_k$  не утиче директно на одређивање запремине испуне. Општије гледано, густина кише утиче посредно на  $\lambda$  преко релације за узгон, тј. проток ваздуха кроз кулу.

Код савремених расхладних кула са природним струјањем ваздуха површински водени флуks  $q_k$  је у интервалу  $q_k = 2-3 \text{ kg/m}^2\text{s}$  (у прорачуну је усвојено да је  $q_k = 2,5 \text{ kg/m}^2\text{s} = 9 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ ).

Висина испуне расхладних кула је у интервалу  $h_p = 1,5-2,5 \text{ m}$ .

*Коефицијент пада притиска ваздуха  $\xi_t$*

Укупни коефицијент пада притиска ваздуха зависи од конструктивног решења торња и густине кише. Најбољи и најпоузданији начин одређивања овог коефицијента је мерење на изведеним објектима или моделима.

У недостатку експерименталних података, укупни коефицијент пада притиска ваздуха одређује се као збир локалних коефицијената. Системски преглед ових коефицијената за торњеве са природним струјањем дат је у раду [6].

У раду [7] дат је коефицијент отпора за хиперболоидне торњеве у облику:

$$\xi_t = 0,117 \frac{D_p}{h_u}^2 + 0,33 \frac{D_p}{h_u} + 2,48 \zeta_{\text{ost}} \quad (4)$$

где  $\zeta_{\text{ost}}$  обухвата отпоре у деловима торња: испуна, конструкција за ношење испуне, елиминатор капљица, систем расподеле воде и утицај ветра.

### Брзина струјања ваздуха кроз испуну

На основу усвојеног ваздушног броја  $\lambda$  и протока воде  $q_{\text{mw}}$ , одређује се масени проток ваздуха:

$$q_{\text{mv}} = \lambda q_{\text{mw}} = 0,7 \cdot 38000 \cdot \frac{1000}{3600} = 7389 \text{ kgs}^{-1} \quad (5)$$

Средња густина ваздуха кроз испуну је:

$$\bar{\rho}_v = \frac{\rho_{v1} + \rho_{v2}}{2} = \frac{1,127 + 1,087}{2} = 1,11 \text{ kgm}^{-3} \quad (6)$$

Параметри ваздуха на излазу су:

$$t_{v2} = 34,2 \text{ }^\circ\text{C}, \rho_{v2} = 1,087 \text{ kgm}^{-3} \quad (7)$$

Запремински проток ваздуха је:

$$q_{\text{vv}} = \frac{q_{\text{mv}}}{\bar{\rho}_v} = \frac{7389}{1,11} = 6657 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (8)$$

Површина попречног пресека на нивоу испуне је:

$$S = \frac{q_{vw}}{q_k} \frac{38000 \frac{1000}{3600}}{2,2} = 4798 \text{ m}^2 \quad (9)$$

Пречник куле на нивоу испуне:

$$D_p = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4798}{\pi}} = 78,2 \text{ m} \quad (10)$$

Усвојено:  $D_p = 78 \text{ m}$ .

Брзина струјања ваздуха кроз испуну је:

$$\bar{w}_p = \frac{q_{vw}}{S} = \frac{6657 \cdot 4}{78^2} = 1,40 \text{ m/s} \quad (11)$$

Силуета куле са природним  
 струјањем ваздуха

На сл. 2. приказане су основне димензије силуете расхладне куле за дате пројектне податке и различите врсте испуна.

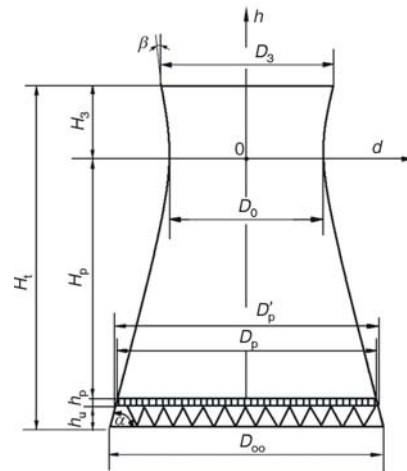
У табл. 1 су дате основне димензије силуете расхладне куле за варијантна решења испуна.

Развод воде у хиперболическој  
 расхладној кули

На хлађење воде у расхладној кули знатно утиче равномерност дистрибуције воде по попречном пресеку куле.

Основне карактеристике тока воде у кули су:

- номинални површински флуks воде (густина кише),  $q_k$ ,



Слика 2. Геометријске карактеристике хиперболическе расхладне куле

Таблица 1. Основне димензије силуете расхладног торња

Тип испуне	$H_t$ [m]	$H_3$ [m]	$H_p$ [m]	$h_u$ [m]	$h_p$ [m]	$D_{oo}$ [m]	$D_p$ [m]	$D_p'$ [m]	$D_o$ [m]	$D_3$ [m]	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]
Капљичасти	121	26	82,3	8,0	4,7	85,74	78,00	80,71	49,33	52,90	72,5	8,1
Филмско-капљичасти	110	24	76,2	8,00	1,8	84,15	78,00	79,12	49,33	52,87	72,5	8,1
Филмски	108	23	75,6	8,0	1,4	83,91	78,00	78,88	49,33	52,64	72,5	8,1

- глобална дистрибуција воде по попречном пресеку,
- распршивање воде у капљице различитих димензија или формирање филма воде, и
- контакт воде и ваздуха у испуни.

Избор номиналног површинског флукса воде зависи од технолошких параметара воде и ваздуха, типа испуне, типа куле и др. [8].

Равномерност дистрибуције воде по попречном пресеку куле зависи од: магистралних цевовода, радних дистрибутора (цеви) и распршивача.

Локално распршивање може бити под притиском или гравитационо [1]. Неравномерност зависи од лепезе распршивања.

Излазни подаци хидрауличког прорачуна су: шема система за расподелу воде, пречници цевовода, растојање између дистрибутора и распршивача, димензије распршивача и средњи проток воде кроз распршиваче.

Коефицијент неравномерности расподеле воде у разделном систему зависи од промене средњих карактеристика тока, према релацији:

$$\psi = \psi_d \psi_r \left( \frac{\varphi_{d \max}}{\varphi_{d \min}} + \frac{\varphi_{r \max}}{\varphi_{r \min}} \right) \quad (12)$$

или

$$\psi = \frac{v_{d \max}}{v_{d sr}} \frac{v_{d \min}}{v_{d sr}} \frac{v_{r \max}}{v_{r sr}} \frac{v_{r \min}}{v_{r sr}} \quad (13)$$

где су:  $\psi_d, \psi_r$  – коефицијенти неравномерности дистрибутора и распршивача;  $\varphi_d, \varphi_r$  – коефицијенти одступања од средњих брзина воде кроз дистрибутор и распршиваче;  $v_d, v_r$  – брзине воде у дистрибутору и распршивачу.

Коефицијент неравномерности је  $\psi = 0,10-0,15$ .

Вода за хлађење доводи се у кулу у централни бетонски водостан, преко два цевовода пречника DN 1800.

Брзина воде у цевоводу је:

$$w_{v1} = \frac{q_{vw1}}{\frac{D^2 \pi}{4}} = \frac{38000}{2 \cdot 3600} \frac{4}{1,8^2 \pi} = 2,07 \text{ m/s} \quad (14)$$

Централни бетонски водостан је квадратног облика унутрашњих димензија 3 × 3 m, подељен преградом на два једнака дела.

Брзина воде у водостану је:

$$w_{w2} = \frac{q_{vw}}{S} = \frac{38000}{3 \cdot 3} = 1,17 \text{ m/s} \quad (15)$$

На сваком каналу је постављен табласти затварач димензија 1,5 × 1,5 са електропогоном.

Развод воде из канала је преко пластичних цеви постављених нормално на канал, димензија DN 250, 200, 150 и 100, на растеру 0,9 m. Редукција цевовода изводи се ради равномерности дистрибуције воде по пресеку куле.

На цевима се налазе распршивачи воде за гравитационо распршивање, пречника DN 25 на растеру 0,9 m.

Проток воде кроз распршиваче је равномеран.

### Побољшање енергетске ефикасности хиперболоидне расхладне куле променом карактеристика испуна

У постојећим расхладним кулама коришћени су разни типови испуна нпр.:

- капљичасти (дрвене или плочасте гредице, летвице, и сл.),
- филмски (азбестцементне равне или таласасте плоче, пластичне профилисане плоче и сл.), и
- филмско-капљичасти (специјално профилисане пластичне плоче).

На основу анализе конструктивних, термичких и аеродинамичких карактеристика новијих типова испуна, може се закључити да постоје могућности побољшања хлађења воде у кулама.

У старијим моделима хиперболоидних расхладних кула најчешће су коришћене азбестцементне плоче или дрвене капљичасте испуне. Због слабијих термичких карактеристика висина ових кула знатно је већа.

Имајући у виду да се у термоелектранама обављају редовни годишњи ремонти, а периодично и већи реконструктивни захвати, могуће је извршити и замену постојећих испуна са новим типовима.

За анализу узета је хиперболоидна расхладна кула термоелектране снаге 300 MW. Коришћени су подаци за следеће испуне:

(а) дрвене троугласте (сл. 1а) (тип К)

подаци:  $H = 5,08$  cm,  $W = 15,24$  cm; коефицијент испуне:  $A = 0,61$ ,  $n = 0,65$ .

(б) пластична профилисана испуна (сл. 1б) (тип Ф)

подаци: дужина таласа 46 mm; висина таласа 17 mm; дебљина плоче 0,5 mm.

Таласи плоче су коси, под углом  $30^\circ$  према вертикали. Плоче се слажу једна на другу тако да су им таласи међусобно унакрсни.

Коефицијенти испуне:  $A = 1,5$ ;  $n = 0,6$ .

(в) рељефна пластична испуна са дистанцерима (сл. 1в) (тип Ф-К)

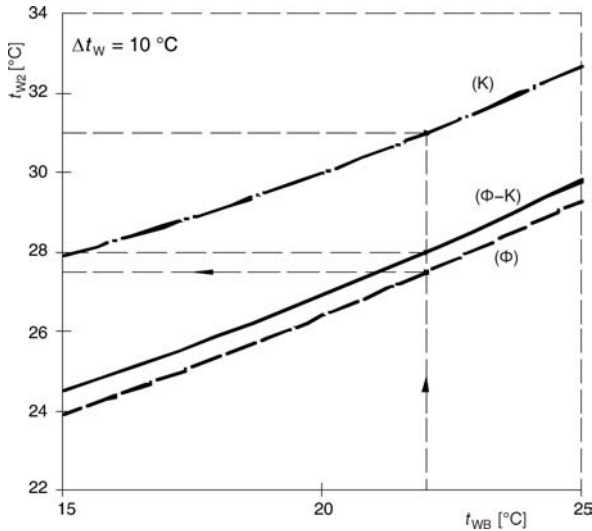
подаци: специјално оребрена плоча, растојање између плоча 24 mm, дебљина плоче 0,6 mm.

Висина испуне за сва три случаја,  $h_p = 1,8$  m.

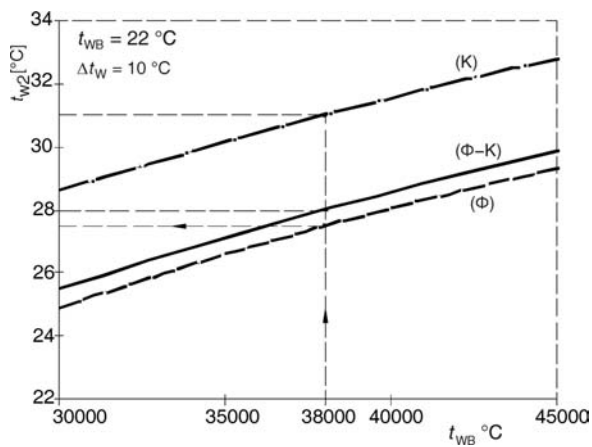
Коришћени су подаци за силуету хиперболоида,  $H_t = 110$  m.

Опрема торња (елиминатори капљица, распршивачи, дистрибутор и друго) исти су за све варијанте.

На сл. 3 приказна је зависност температуре хладне воде  $t_{w2}$  од температуре влажног термометра  $t_{WB}$  за различите типове испуна, а исти интервал хлађења  $\Delta t_w = 10$  °C и 100% номинални проток воде. Резултати показују да су температуре хладне воде  $t_{w2}$  за испуне типа (К) више за 2–4 °C у односу на испуне типа (Ф) и (Ф-К), у зависности од температуре влажног термометра  $t_{WB}$ . Такође, остваривање пројектне температуре  $t_{w2}$  за тип испуне (К) могуће је за знатно ниже температуре  $t_{WB}$ .



Слика 3. Зависност температуре хладне воде  $t_{w2}$  од температуре влажног термометра  $t_{wB}$



Слика 4. Утицај промене протока воде  $q_{v,w}$  на температуру хладне воде  $t_{w2}$

На сл. 4 приказан је утицај промене протока воде  $q_{v,w}$  на температуру хладне воде  $t_{w2}$ , за пројектне услове  $\Delta t_w = 10$  °C и  $t_{wB} = 22$  °C.

Овај утицај се обично користи да би се показало како се мења температура хладне воде, уколико се мења проток воде.

Код расхладних кула може се повећати или смањити проток воде за 20% номиналног протока (38000 m<sup>3</sup>/h). Криве хлађења се цртају за промењени проток у односу на номинални.

Променом протока мења се ваздушни број  $\lambda$ , као и Меркелов број, па се на основу њихових вредности, из дијаграма Америчког института за расхладне торњење (Cooling Tower Institute) [9], који се заснивају на Меркеловој теорији, добија приближење. Приближење се додаје на  $t_{wB}$  и на основу тога се читају вредности  $t_{w2}$ .

У интервалу промене номиналног протока 80–120% температура хладне воде  $t_{w2}$  одступа 4–5 °C.

### Закључак

У циљу разматрања побољшања хлађења воде анализиран је утицај промене карактеристика испуне која представља витални елемент опреме куле.

У циљу разматрања побољшања хлађења воде анализиран је утицај промене карактеристика испуне која представља витални елемент опреме куле.

Извршен је технолошки прорачун куле за пројектне податке блока термоелектране снаге 300 MW. У раду су приказани топлотни, аеродинамички и хидра-



улички прорачуни на основу којих је дифинисана геометрија хиперболоидне расхладне куле.

Анализом примене разних типова испуне у кули исте димензије, закључује се да применом филмских и филмско-капљичастих испуна могуће је повећати проток воде 15–20% чиме се повећава и снага термоелектарне.

Разлика у примени псуна филмског и филмско-капљичастиг типа није велика, због тога што им температуре хладне воде приближно једнаке (0,5–1 °C).

Дакле, у постојећим хиперболоидним расхладним кулама могуће је применом испуна филмског или филмско-капљичастиг типа знатно побољшати хлађење воде, односно енергетску ефикасност куле.

У даљим истраживањима побољшања хлађења воде у расхладним кулама потребно је анализирати утицај осталих елемената куле, нпр:

- дистрибуција воде по попречном пресеку куле,
- равномерност струјања ваздуха,
- гравитационо и распшивање под притиском, и
- хлађење у зони кише испод испуне.

Допринос ових утицајних фактора је нешто мањи, али није занемарљив, нарочито у случајевима већих одступања услед запрљаности воде, таложења каменица или оштећења елемената опреме.

### Ознаке

- $c_{pw}$  – специфични топлотни капацитет воде, [Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]  
 $h_v$  – енталпија ваздуха, [Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]  
 $h_{vs}$  – енталпија засићеног ваздуха, [Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]  
 $h_w$  – енталпија воде, [Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]  
 $q_{mv}$  – масени проток ваздуха, [kgs<sup>-1</sup>]  
 $q_{mw}$  – масени проток воде, [kgs<sup>-1</sup>]  
 $t_v$  – температура ваздуха, [°C]  
 $t_{w1}/t_{w2}$  – температура воде на улазу/излазу, [°C]  
 $V$  – запремина испуне, [m<sup>3</sup>]  
 $\beta_{xy}$  – коефицијант преношења топлоте и супстанције, [Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>]  
 $q$  – густина кише, [kgm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>]

### Литература

- [1] Берман, Л. Д., Испарительное охлаждение циркуляционной воды, Госенергиздат, Ленинград, СССР, 1957
- [2] Valentin, F. H., Absorption in Gas-Liquid Dispersions, Spon, London, 1967
- [3] \*\*\*, Енергоинвест – Итен, Анализа ефикасности расхладних система на ТЕ Гацко и предлог мера за побољшање, Сарајево, 1992.
- [4] Zemanek, I., Heat and Mass Transfer in Cooling Tower Packings, National Research Institute for Machine Design, Praha, 1989
- [5] Lowe, H. J., Christie, D. G., Heat Transfer and Pressure Drop Data on Cooling Tower Packings and Model Studies of the Resistance of Natural Draft Tower to Airflow, *Proceedings, 2nd International Heat Transfer Conference, Boulder, Col., USA, Vol. 3-5, 1961*
- [6] Нинић, Н., Вехауц, А., Испитивање и карактеризација пластичних испуна за расхладне торњеве, Институт за нуклеарне науке „Борис Кидрич”, Винча, Београд, 1986.

- [7] Spangemacher, K., Calculating Cooling Towers and Spray Coolers by the Aid of an Evaporative Parameter (in German), *Brennstoff-Wärme-Kraft*, 1958
- [8] \*\*\*, Технические указания по расчету и проектированию башенных противоточных градирен для тепловых электростанций и промышленных предприятий, Энергия, Ленинградское отделение, 1971
- [9] Фарфоровский, В. С., Фарфоровский, В. Б., Охладители циркуляционной воды тепловых электростанций и промышленных предприятий, Энергия, Ленинградское отделение, 1972
- [10] \*\*\*, Cooling Tower Institute, Cooling Tower Performance Curves, Published by Cooling Tower Institute, Houston, Tex., USA, 1967
- [11] Голубовић, Д., Филмско-капљичасти тип испуне влажних расхладних торњева, Савезни завод за интелектуалну својину, Београд, 2000.
- [12] Голубовић, Д., Димензионисање испуна противструјних расхладних торњева, 34. конгрес о КГХ, СМЕИТС, Београд, 2003.

#### Abstract

## Water Cooling Efficiency in Power Plant Hyperbolic Cooling Tower

by

*Dušica GOLUBOVIĆ\*, Dušan GOLUBOVIĆ, Srđan VASKOVIĆ,  
Dejana BOGDANOVIĆ, and Milenka LALOVIĆ*

**Faculty of Mechanical Engineering, University of East Sarajevo,  
Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina**

Influence factors on cooling of water in hyperbolic cooling tower were described. Technological, thermal, and aerodynamic project parameters and distribution of water and air were analyzed.

Improvement of cooling efficiency with modern packings in the power plant block 300 MW is analyzed.

Key words: *hyperbolic cooling tower; cooling efficiency*

\*Corresponding author; e-mail: golubovic@nadlanu.com

Рад примљен: 11. априла 2011.  
Рад ревидиран: 24. маја 2012.  
Рад прихваћен: 3. јуна 2012.