

ТЕМПЕРАТУРЕ У БРАНИ И АКУМУЛАЦИЈИ "БАЈИНА БАШТА" У ПЕРИОДУ 1995-2015.

Јована Јосиповић¹
Марина Ашкрабић²
Владан Кузмановић³
Милица Мирковић⁴
Зорана Петојевић⁵
Радован Госпавић⁶
Горан Тодоровић⁷

УДК: 551.526 : 627.8

DOI:10.14415/konferencijaGFS 2016.070

Резиме: У раду су најпре приказани подаци мерења температуре ваздуха, тела бране и воде у акумулацији ХЕ "Бајина Башта" у периоду од 1995. до 2015. године. Мерења су вршена на 100 мерних места. На основу измерених температураа воде у акумулацији дефинисане су аналитичке формуле нестационарног температурног поља према *Vofang*-овом моделу. Температурно поље бране је приказано у карактеристичним тачкама, у периодима када су температурни градијенти највећи. Добијени резултати омогућавају анализу термичког напрезања, што представља важан фактор праћења стабилности и сигурности брана.

Кључне речи: температурно поље, брана, температура акумулације, *Vofang*-ов модел

1. УВОД

Мерење температура је део поступка техничког осматрања код свих значајнијих хидротехничких објеката [1]. По правилу, мере се температуре воде у

¹ Јована Јосиповић, маг.инж. грађ., тел: 060 0333955, e-mail: josipovicjovanabb@gmail.com

² Марина Ашкрабић, маг. инж. грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет Београд, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 0631949313, e-mail: amarina@grf.bg.ac.rs

³ Владан Кузмановић, дипл. грађ. инж., Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 0113218556, e-mail: vladak@grf.bg.ac.rs

⁴ Милица Мирковић, маг. инж. грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет Београд, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 0644732829, e-mail: milicamirkovic91@gmail.com

⁵ Зорана Петојевић, дипл.инж. грађ., Универзитет у Београду, Грађевински факултет Београд, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 0641306101, e-mail: zjovanovic@grf.bg.ac.rs

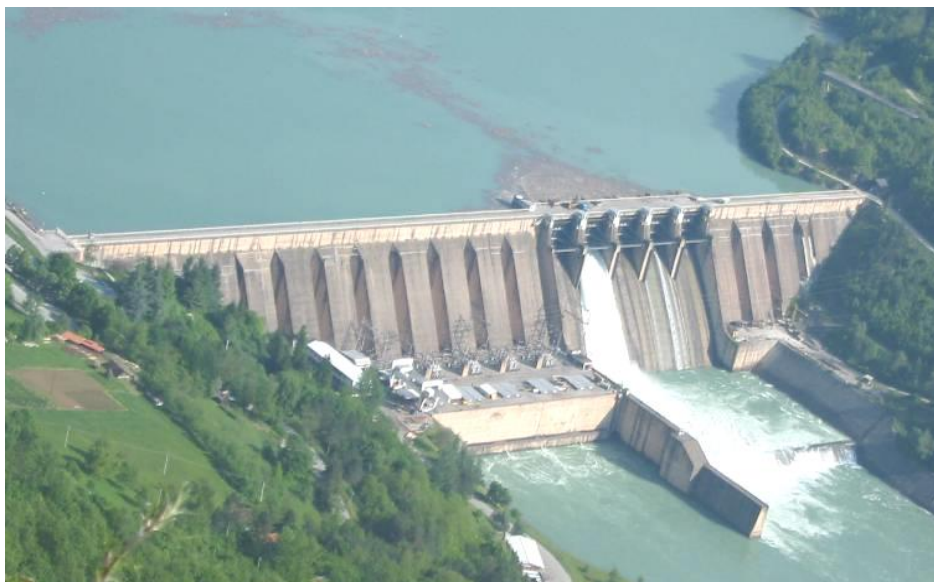
⁶ Радован Госпавић, дипл.инж.ел., Универзитет у Београду, Грађевински факултет Београд, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 0113218584, e-mail: gospavic@grf.bg.ac.rs

⁷ Горан Тодоровић, дипл.инж.ел., Универзитет у Београду, Грађевински факултет Београд, Булевар краља Александра 73, Београд, Србија, тел: 0113218584, e-mail: todor@grf.bg.ac.rs

акумулацији, бетона у телу бране и температуре ваздуха. На основу података ових мерења може се одредити стање термичког напрезања брана, које је веома значајно за процену стабилности и сигурности конструкције. Мерење температуре се врши у већем броју тачака са циљем одређивања температурног поља. Посебно су значајне зоне где постоји велики градијент температуре, јер ту могу настати највећа напрезања. Ово је нарочито изражено у летњим месецима, када су највећи утицаји инсолације и разлике између температура ваздуха и воде. У литератури постоји велики број радова који се бави овим проблемима [2], [3], [4]. У овом раду, температура воде у акумулацији одређена је према Vofang-овом моделу [5], на бази мерења температуре воде на брани „Бајина Башта“.

2. ХЕ „БАЈИНА БАШТА“

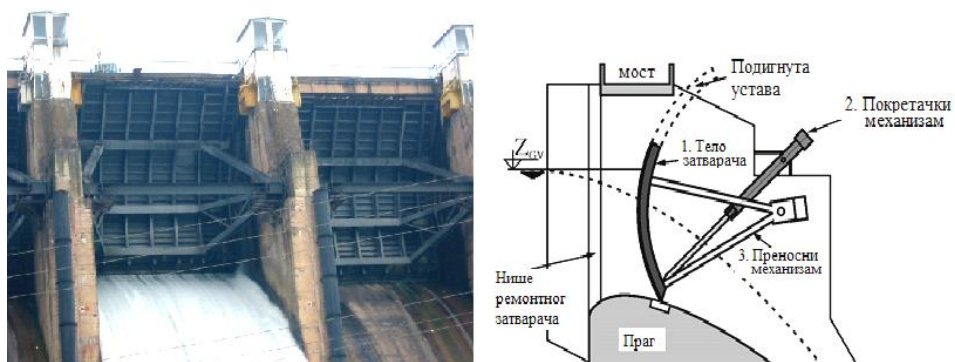
Температуре на брани и акумулацији „Бајина Башта“ мерене су у периоду од 1995. до 2015. године. Мерења температура бетона вршена су једном месечно, а температуре воде на дневном нивоу. Температура ваздуха је мерена три пута дневно. Хидроелектрана "Бајина Башта" (Слика 1) највећи је хидроенергетски објекат на реци Дрини.



Слика 1. Хидроелектрана "Бајина Башта"

Брана је контрафорна бетонска, висине 90 m и дужине у круни 460 m. Има 24 ламеле од којих су пет преливних, свака дужине по 20 m. Изграђена је од бетона МВ 30. На брани су изведене инјекционе завесе и дренажни систем за смањење узгона. На десној обали је машинска зграда са четири агрегата снаге 368 MW.

Низводно лице бране је окренуто ка југоистоку. Брана формира акумулацију „Перућац“, чија је максимална дубина уз брану око 60 m. Површина акумулације је 12,4 km², а запремина око 340 x 10⁶ m³. Испуштање вишка воде из акумулације омогућава се подизањем устава. На Слици 2 приказана је фотографија и скица попречног пресека радијалних (сегментних) устава, које се контролисано подижу, чиме се регулише ниво воде акумулације.



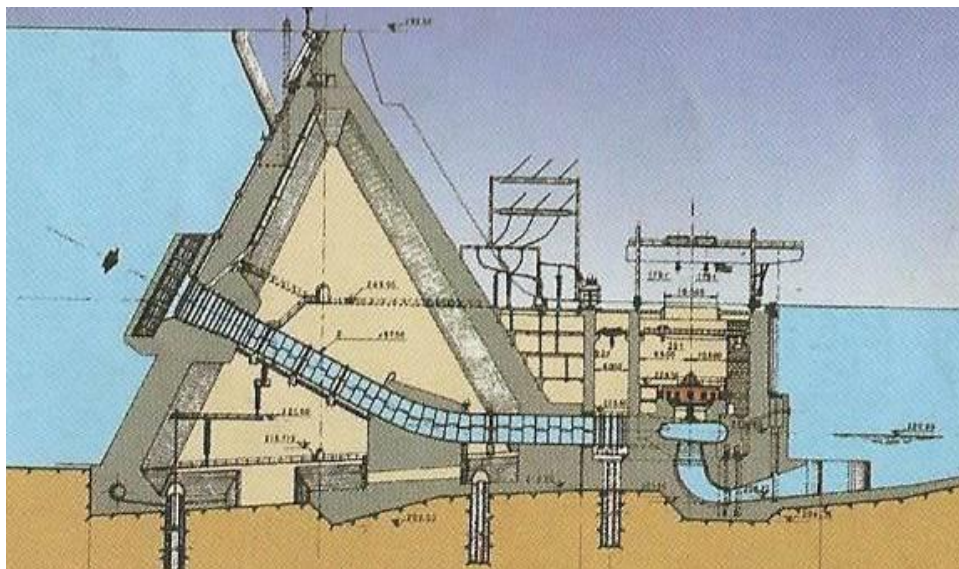
Слика 2. Изглед сегментних устава на брани "Бајина Башта"



Слика 3. Умирујући базен са зубима и низводним прагом

Вода са прелива доспева у слапиште, где се умирује и контролисано упушта у низводно речно корито, Слика 3. Тип слапишта је USBR III, што значи да умирењу енергије воде доприноси и тзв. „зуби“ који су постављени на 25 m од почетка слапишта, као и низводни праг, који омогућавају снижење спрегнуте дубине и стабилизацију хидрауличког скока. Попречни пресек бране приказан је на Слици 4. Узводно лице је закошено, чиме се користи повољно деловање вертикалне силе хидростатичког притиска и повећава стабилност бране против

клизања, превртања и испливавања.



Слика 4. Попречни пресек бране "Бајина Башта"

3. МЕТОД МЕРЕЊА ТЕМПЕРАТУРЕ

Температура воде у површинском слоју акумулације мерена је до дубине од 2,0 m, на сваких 50 cm. Коришћени су мобилни термометри, са сондама у које се стављају електрични температурни сензори на бази термо-парова. Термометри за мерење температуре бетона су такође електрични, али засновани на принципу мерења отпора. Опсег мерења температуре је $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, мерне сигурности $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Основна својства су им: мала термичка инерција и независност мерења од времена и удаљености. Термометри су фирме „Galileo“ и заснивају рад на принципу равнотеже Wheatstone-овог моста. Номинална вредност електричног отпора отпорног термометра је $29,77\ \Omega$ на 20°C .

4. ФИЗИЧКИ МОДЕЛ ТЕМПЕРАТУРЕ АКУМУЛАЦИЈЕ

Због топлотне инерције воде, температура узводног дела бране доминантно зависи од температуре воде у акумулацији. Према Vofang-овом моделу, временска зависност температуре воде у функцији дубине дата је формулом:

$$T(y,t) = T_m(y) + A(y) \cos \omega(t - t_0 - \varepsilon), \quad (1)$$

где су: y —дубина, t —време (у данима), $T(y, t)$ —температура акумулације у функцији времена и дубине, $T_m(y)$ —средња годишња температура акумулације у функцији

дубине, $A(y)$ —амплитуда годишње варијације температуре акумулације, ω —кружна фреквенција, ε и t_0 временска кашњења (у данима). По овом моделу средња годишња температура се добија из следећих израза:

$$\begin{aligned} T_m(y) &= c + (T_s - c)e^{-\alpha y}, \\ c &= \frac{(T_b - gT_s)}{(1 - g)}, \\ g &= e^{-0.04H}, \end{aligned} \quad (2)$$

где су: T_s —средња годишња температура акумулације на површини, T_b —средња годишња температура акумулације на дну, H —дубина акумулације, параметар $\alpha = 0,04$ и представља фактор пригушења осцилације температуре.

Амплитуда $A(y)$ се добија преко израза:

$$\begin{aligned} A(y) &= A_0 e^{-\beta_0 y}, \\ A_0 &= \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}. \end{aligned} \quad (3)$$

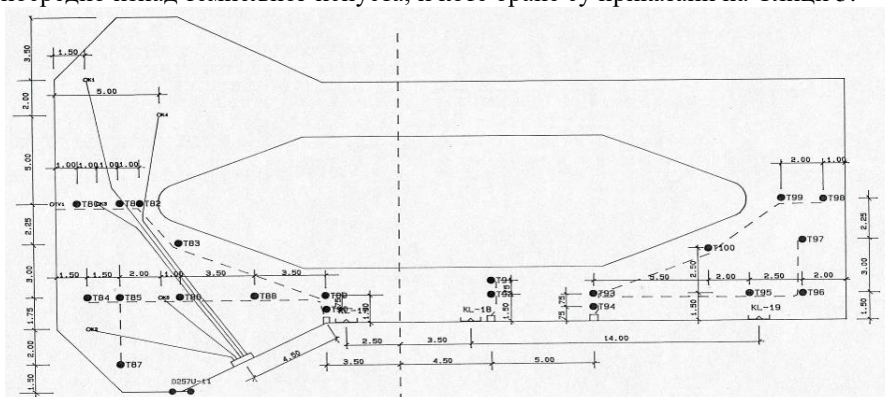
Параметар β_0 је функција дубине акумулације и рачуна се према изразу:

$$\beta_0 = -0.058545 + 7.2727 \times 10^{-4} \times H. \quad (4)$$

Видимо да за одређивање непознатих параметара c и A_0 неопходно је познавање температура на површини и дну акумулације.

5. РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА ТЕМПЕРАТУРЕ И ОДРЕЂИВАЊЕ ПАРАМЕТАРА ВОFANG-ОВОГ МОДЕЛА

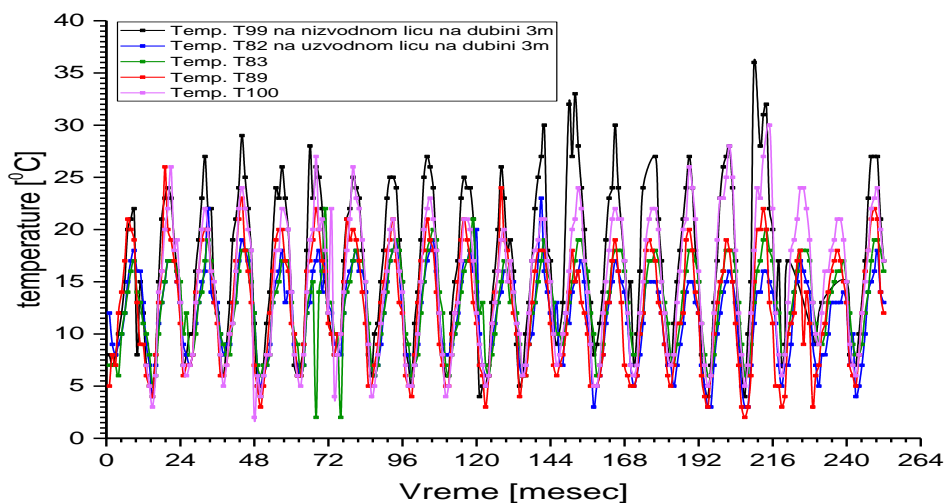
Сензори у телу бране су распоређени у 4 хоризонталне равни у ламели 11, на котима 213, 228, 243 и 258. Распореди сензора на коту 258, која се налази непосредно изнад темпељног испуста, и коте бране су приказани на Слици 5.



Слика 5. Хоризонтални пресек ламеле 11 на коту 258 тпт и положај температурних сензора Т

Резултати мерења температуре приказани су преко термометара Т82, Т83, Т89, Т99 и Т100. Термометри Т82, Т83 и Т89 се налазе у узводном делу тела бране, а Т99 и Т100 у низводном. Избор термометара омогућава приказ температурног поља у околини шупљине ламеле и термичко оптерећење у његовој околини. Градијенти температура између ове две групе сензора су највећи, с обзиром на утицај акумулације на температуре узводних сензора, односно ваздуха и сунчевог зрачења на Т99 и Т100. На Слици 6 приказане су измерене температуре поменутих термометара.

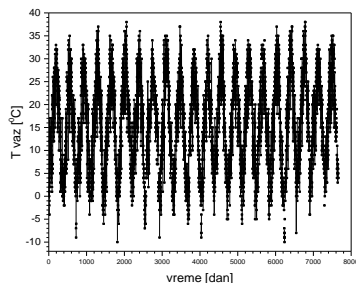
Црном бојом су приказане температуре на месту сензора Т99. Види се да су у полугодишњим периодима температуре на овом месту по правилу највеће, или најмање, у зависности од тога да ли је лето или зима. То је последица средње температуре ваздуха и количине Сунчевог зрачења које загрева површину тела бране. Плавом, зеленом и црвеном бојом, редом су означене температуре сензора Т82, Т83 и Т89 на узводној страни.



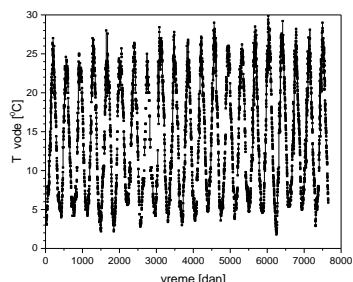
Слика 6. Приказ измерених температура бетона бране у ламели 11, на коти 213 у периоду од 20 година

По правилу ниже температуре у летњем периоду, а више у зимском, у односу на Т99 су последица утицаја температуре воде. На пример, на месту сензора Т99, максимална забележена температура, у целом периоду мерења, је била 26. 6. 2012. године и износила је 36 °С, што је последица високе дневне температуре ваздуха и загревања услед Сунчевог зрачења. Градијент температуре на коти 258 mm је тада био највећи и био је оријентисан од низводног ка узводном лицу бране, производећи термичку силу напрезања, чија је резултанта била оријентисана низводно. Постоје и ситуације у зимском периоду када је смер вектора ове силе супротан, тј. када је температура површине узводног лица бране виша од низводног, па је термичка сила напрезања оријентисана узводно. Ови случајеви

термичког напрезања, у комбинацији са другим оптерећењима и утицајима, могу потенцијално да изазову појаву прелина у телу бране.



Слика 7. Температура ваздуха

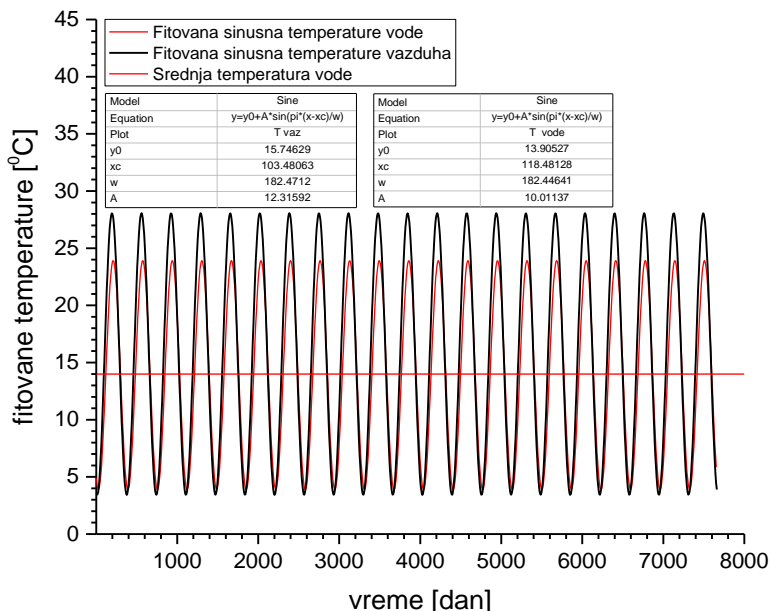


Слика 8. Температура воде на $y=2m$

На Сликама 7 и 8 приказане су температуре ваздуха и воде у акумулацији на дубини од 2 m. На овој дубини, турбулентна конвективна мешања топле и хладне воде су знатно мање изражена у односу на саму површину воде.

Уочава се да су годишње амплитуде температуре ваздуха веће од одговарајућих амплитуда температуре воде у акумулацији.

На Сlici 9 приказане су криве промене температуре воде и ваздуха добијене фитовањем експерименталних резултата са Слика 7 и 8 на синусне функције, са циљем одређивања временских параметара t_0 и ϵ из једначине (1).

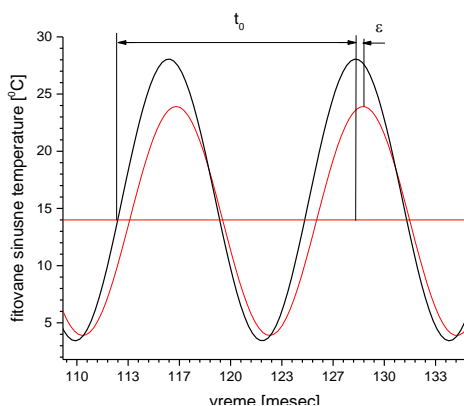


Слика 9. Фитоване синусне температуре ваздуха и воде и средња температура воде за цео период мерења

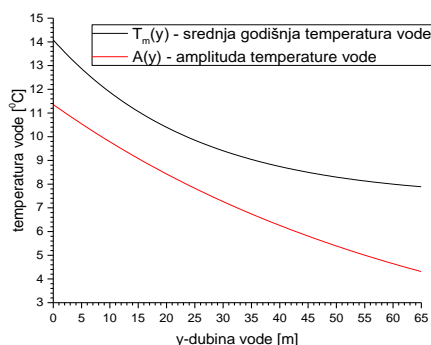
Према Vofang-овом моделу поменути параметри се могу одредити графичким путем, ако се упореде карактеристичне синусне промене температуре ваздуха и воде.

На Слици 10. је приказан сегмент синусних температура ваздуха и воде са означеним параметрима. Очитавањем са графика, усвојене су следеће вредности параметара: $t_0=9,133$ месеца и $\varepsilon=0,405$ месеци. Средња годишња температура акумулације у функцији дубине, $T_m(y)$, добијена је коришћењем израза (2). Према експерименталним подацима, средња температура воде на површини за читав период мерења је $T_s=14,08$ °C, средња годишња температура воде на дну је $T_b= 8,0$ °C (сензор T5, ката 213), параметар $c=7,39$ °C и $g=0,09072$ m. На бази ових вредности добија се аналитички израз: $T_m(y)=7,393+6,689 \cdot e^{-0,04y}$ [°C].

Параметар A_0 може да се одреди из мерних резултата на било којој дубини акумулације. Овде за израчунавање користимо средње максималне и минималне температуре воде на 2 m дубине због објашњених конвективних ефеката.



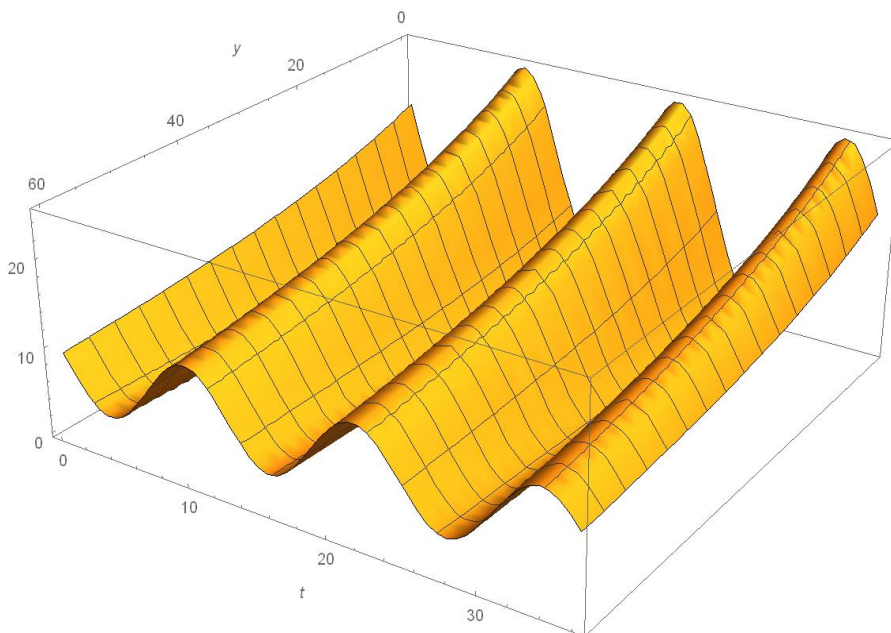
Слика 10. Графичко одређивање параметара t_0 и ε



Слика 11. Функција средње годишње емпературе $T_m(y)$ и амплитуда $A(y)$

Минималне T_{\min} и максималне T_{\max} температуре графички представљају максимуме и минимуме кривих на Слици 8. Добијене су следеће вредности: $T_{\max}=26,590$ °C, $T_{\min}=3,876$ °C и амплитуда, према изразу (3): $A(y)=11,357e^{-0,0149y}$ [°C]. Графици функција $T_m(y)$ и $A(y)$ су дати на Слици 11.

Конечан аналитички израз за температуру акумулације, по Vofang-овом моделу гласи: $T(y,t) = 7,393 + 6,689 \cdot e^{-0,04y} + 11,357 e^{-0,0149y} \cos \pi(t - 9,538) / 6$ [°C], а график модела приказан је на Слици 12.



Слика 12. Графички приказ температурног поља воде у акумулацији, $T(y,t)$ [$^{\circ}\text{C}$], у функцији дубине у $[m]$ и времена t [$mesec$], према Vofang-овом моделу
Слика приказује промену температурског поља у периоду од 3 године. Јасно се уочава пад амплитуде температуре са порастом дубине и таласни облик при порасту времена као последица сезонских промена.

6. ЗАКЉУЧАК

У раду су приказани резултати двадесетогодишњих мерења температуре ваздуха, воде и бетона на брани "Бајина Башта". Мерења су искоришћена за одређивање нестационарног температурног поља воде у акумулацији, базирана на Vofang-овом моделу, који даје аналитички израз за температуру у функцији времена и дубине. Дати су графички прикази температура и анализирани резултати мерења, који се могу користити за оцену термичког напрезања и сигурности бране.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Josipović, B. Milovanović, V. Kuzmanović, Lj. Savić, Analiza uzgona na branu "Baјina Bašta" naosnovu podataka osmatranja, 17. Konferencija SHDI, Vršac, 2015
- [2] Zhu, B. F., Prediction of Water Temperature in Deep Reservoirs, *Dam Engineering*, 8 (1997), 1, pp. 13-25

- [3] Long-term thermal 2D and 3D analysis of RCC dams, supported by monitoring verification / Kuzmanovic V., Savic Lj., Stefanakos J., // *Canadian Journal of Civil Engineering*, Issue 4, Vol. 37, (2010), DOI No. 10.1139/L10-004.
- [4] Computation of Thermal-Stresses and Contraction Joint Distance of RCC Dams / Kuzmanovic V., Savic Lj., Mladenovic N., // *Journal of Thermal Stresses*, 36:2, 112-134, DOI: 10.1080/01495739.2013.764795
- [5] H. Mirzabozorg, M. A. Hariri-Ardebili, M. Shirkhan, S.M. Seyed-Kolbadi, Mathematical Modeling and Numerical Analysis of Thermal Distribution in Arch Dams considering Solar Radiation Effect, *The Scientific World Journal*, Volume 2014 (2014), Article ID 597393

TEMPERATURE VARIATION OF "BAJINA BAŠTA" DAM BETWEEN 1995-2015

Summary: In this paper, the data for the observed temperatures (of the air, body of the dam and water in the reservoir), for "Bajina Bašta" Dam, during the 20-years period, are presented. The data were used to predict the unsteady temperature field in the reservoir, based on the Bofang model for analytical relationship between the temperature, time and reservoir depth. Obtained temperature diagrams present a usefull tool for assesing the thermal-stress field and the safety of the dam.

Keywords: temperature field, dam, Bofang's model of water temperature