

ГУБИТАК ЕНЕРГИЈЕ У КРИВИНИ КРУЖНОГ ПРОВОДНИКА ПРИ БУРНОМ ТЕЧЕЊУ

Милена КОЛАРЕВИЋ, Енергопројект-Хидроинжењеринг,
Љубодраг САВИЋ, Радомир КАПОР, Универзитет у Београду – Грађевински факултет,
Никола МЛАДЕНОВИЋ, Универзитет у Београду – Машински факултет

РЕЗИМЕ

У раду су анализирани губици енергије у кривини који настају при бурном течењу у проводнику кружног попречног пресека. Урађена су хидрауличка моделска испитивања, на основу којих су одређени коефицијенти губитка енергије. Предложени су изрази за коефицијент губитка у зависности од карактеристика кривине (скретног угла и закривљености). С обзиром да у литератури не постоје изрази којима се описује овакав губитак енергије у кривини, предложене зависности су упоређене са изразима који се односе на течење под притиском. На крају рада су дате препоруке и закључци.

Кључне речи: губитак енергије, бурно течење, хоризонтална кривина, затворени проводник, хидраулички модел

1 УВОД

Све пространији и међусобно повезанији водопривредни системи, са све сложенијим конфигурацијама објеката, са бранама, акумулацијама, ретензијама и другим објектима који су неопходни да одбезбеде испуњење све бројнијих циљева коришћања вода, уређења водних режима и заштите вода [1], намећу захтеве да се оствари висока поузданост свих објеката. Највећи захтеви се постављају у погледу хидрауличке поузданости високих брана и свих њихових пратећих објеката. То је подстакло интензивна истраживања читавог спектра хидрауличких појава од виталне важности за поуздано функционисање евакуационих објеката брана ([2], [3], [4]) и провере њиховог капацитети ([5], [6]). У циљу што бољег уклапања у окружење, које је подвргнуто све бројнијим просторним и

другим ограничењима, развијају се и диспозиције евакуационих објеката мање стандардних облика [7] и [8].

Са гледишта хидрауличке стабилности објеката посебно су важна истраживања објеката у којима се јављају режими бурног течења. Једном од важних аспеката тог веома важног феномена баве се и истраживања приказана у овом чланку.

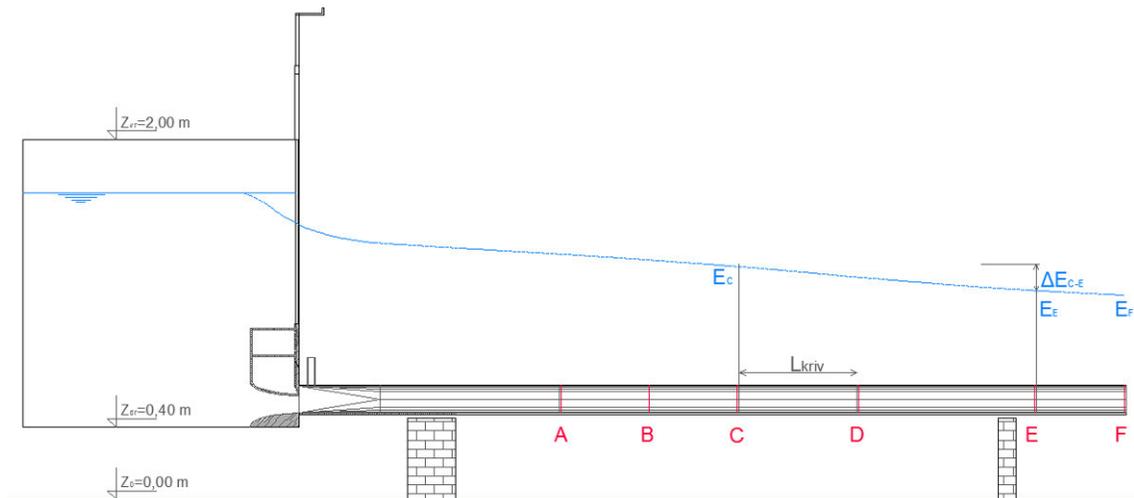
При бурном течењу у кривини проводника кружног попречног пресека, долази до губитка енергије, који није занемарљив. Од интереса је да се одреди вредност тог губитка, чиме се омогућава и одређивање преостале енергије низводно од кривине, што је веома значајно при димензионисању евакуационих објеката (као што су темељни испусти и тунелски преливи високих брана ([9], [10], [11]).

2 ХИДРАУЛИЧКА МОДЕЛСКА ИСПИТИВАЊА

Експериментална инсталација за испитивање разматраног течења се састоји од:

- узводног резервоара из кога се вода контролисано упушта у проводник и
- хоризонталног проводника пречника $D = 15$ cm, који се састоји од узводне праве деонице, кривине и низводне праве деонице.

Проток се мери на Томсоновом преливу, пре уласка у узводни резервоар (слика 1). Затим се вода контролисано упушта у проводник помоћу табласте уставе, постављене на излазу из резервоара. Да би се узводно од кривине остварило течење са што мањим поремећајима, излаз из резервоара је хидраулички обликован по боковима и дну. Уз то, изнад горње ивице табласте уставе је постављена покретна маска, прилагођена облику горње ивице млаза.



Слика 1. Пресек експерименталне инсталације, мерна места и енергетска линија

Са квадратног попречног пресека уставе прелази се на кружни пресек цеви – проводника прелазном деоницом дужине $3D = 45$ cm. Права деоница узводно од кривине је дужине 245 cm, а низводно 150 cm. Аерациона цев је постављена на улазу у проводник (непосредно иза затварача), како би се надокнадио ваздух који је увучен у турбулентни ток. Жељени услови течења (прилазна дубина и Фрудов број) се постижу променом дубине воде у резервоару и отвора уставе.

На физичком хидрауличком моделу су мерене дубине у 6 попречних пресека (A, B, C, D, E и F).

Меродавни почетни – узводни пресек за одређивање губитка енергије је пресек C (непосредно узводно од кривине).

У кривини и низводно од ње се јавља окретање млаза по обиму проводника (хеликоидно течење), па

се као низводни пресек узима место на коме се млаз „размота“ и поново се успостави приближно паралелно и праволинијско струјање (пресек E на слици 1).

На разматраној деоници (између пресека C и E) јављају се енергетски губици услед трења о зидове проводника – линијски губици, као и губици који настају услед промене правца чврсте границе – локални губици. Да би се одредили локални губици, који су последица кривине, укупне губитке између пресека C и E треба умањити за одговарајуће линијске губитке на деоници.

Треба имати на уму да нивои воде, у попречном правцу, у мерним пресецима нису хоризонтални. Узводно од кривине разлике нивоа на левој и десној страни проводника нису велике, а настају као последица несавршено обликоване контуре излаза из резервоара.



Слика 2. Хеликоидно течење низводно од кривине

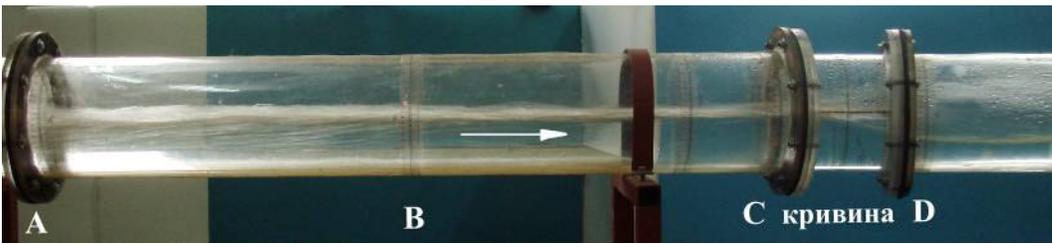
Висина поремећаја (стојећих таласа) узводно од кривине зависи од услова течења (бездимензионалне дубине, h_0/D и Фрудовог броја $Fr_0 = v/\sqrt{gh}$), а ови од отвора затварача и дубине воде у резервоару. При једном броју испитивања са веома малим отворима затварача, јављали су се поремећаји истог реда величине као и основни ток. Таква мерења су изузета из разматрања, јер су стојећи таласи утицали

на течење у кривини и онемогућавали прецизно одређивање карактеристика течења узводно од ње.

На слици 3 су приказани примери без поремећаја узводно од кривине (слика 3б), као и примери са прихватљиво малим поремећајима, јер не утичу значајно на течење у кривини (слика 3а).



Слика 3а. Са повећањем брзине тока, повећава се увлачење ваздуха и таласна дужина стојећих таласа (растојање између два суседна максимума)



Слика 3б. Течење без поремећаја узводно од кривине

Слика 3. Поремећаји (стојећи таласи) узводно од кривине

Низводно од кривине се јављају знатне разлике нивоа воде на супротним странама проводника, као последица течења у кривини (слике 2 и 4).

При окретању млаза по обиму проводника повећава се додирна површина између воде и ваздуха, па се додатно појачава увлачење ваздуха у ток (слика 4). Уз то, окренути млаз повлачи са собом ваздух и заробљава мехуриће при поновном спајању са током на супротној страни (слика 5). Увлачење ваздуха и одступање нивоа од хоризонталног, отежавају прецизно мерење дубина низводно од кривине, а тиме и прецизну процену преостале енергије.



Слика 4. Поглед на течење у проводнику са низводне стране



Слика 5. Интензивно увлачење ваздуха у ток при окретању млаза

3 АНАЛИЗА МОДЕЛСКИХ ИСПИТИВАЊА

При одређивању губитака у кривини, прво су процењени укупни губици енергије између пресека С и Е.

$$\Delta E_{C-E} = E_C - E_E \quad (1)$$

На хидрауличком моделу је испитано 13 различитих случајева кривина, одређених комбинацијом закривљености и скретног угла. Испитане су 3 закривљености ($D/R = 1/2, 1/3$ и $1/4$) и четири скретна угла ($15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ и 60°). За закривљеност $D/R = 1/3$ је испитан и скретни угао од 75° .

Енергетски губици су анализирани за сваки модел посебно, да би се оценио утицај скретног угла и закривљености на губитке.

Анализом су обухваћена само мерења код којих се остварило хеликоидно течење без загушења. Било је укупно 69 успешних мерења, а у табели 1 су дати подаци о броју мерења за сваки разматрани модел.

Већи број мерења и мање „расипање” резултата, указују на већу поузданост.

Табела 1. Број разматраних мерења код којих се остварило хеликоидно течење без загушења

	15°	30°	45°	60°	75°
R=2D	4	6	6	8	/
R=3D	5	7	8	8	2
R=4D	4	6	3	2	/

Разлике у дужини анализираних кривина су велике и крећу се од 7,85 cm за угао од 15° и $R = 2D$ до 62,83 cm за угао од 60° и $R = 4D$ (мерено по средњој линији кривине). Да би се одвојио утицај дужине кривине, односно одговарајућих линијских губитака, укупан енергетски губитак између пресека С и Е је умањен за линијски губитак на овој деоници, а који одговара губитку на правој деоници исте дужине (као да нема кривине).

$$\Delta E_{kriv} = \Delta E_{C-E} - \Delta E_{C-E}^{lin} \quad (2)$$

Линијски губици су обрачунати са хидрауличким параметрима који се односе на пресек узводно од кривине (пресек С). Експериментална цев је направљена од акрилних плоча (polymethyl methacrylate), познатијих под називом клирит или плексиглас. На основу података из литературе [9] за овакву врсту материјала, усвојен је Манингов коефицијент храпавости од $0,009 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$.

$$\Delta E_{C-E}^{lin} = \left(\frac{Q \cdot n}{A_C \cdot R_C^{2/3}} \right) \cdot (L_{kriv} + L_{D-E}) \quad (3)$$

Коефицијент губитка у кривини одређен је на основу преосталих енергетских губитака по једначини (2) и брзина узводно од кривине.

$$\xi_{kriv} = \frac{2g \cdot \Delta E_{kriv}}{V_C^2} \quad (4)$$

За сваки модел кривине је одређена средња вредност коефицијента губитка, која се односи на разматрану комбинацију закривљености и скретног угла (табела 2 и слика 6). Такође је одређена и стандардна девијација (мера одступања резултата од средње вредности), као показатељ поузданости добијених резултата (табела 3).

$$\bar{\xi}_{kriv}^{R,\alpha} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_{kriv,i}^{R,\alpha} \tag{5}$$

$$\sigma_{\xi_{kriv}^{R,\alpha}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\xi_{kriv,i}^{R,\alpha} - \bar{\xi}_{kriv}^{R,\alpha})^2} \tag{6}$$

Табела 2. Средња вредност коефицијента губитка на кривини

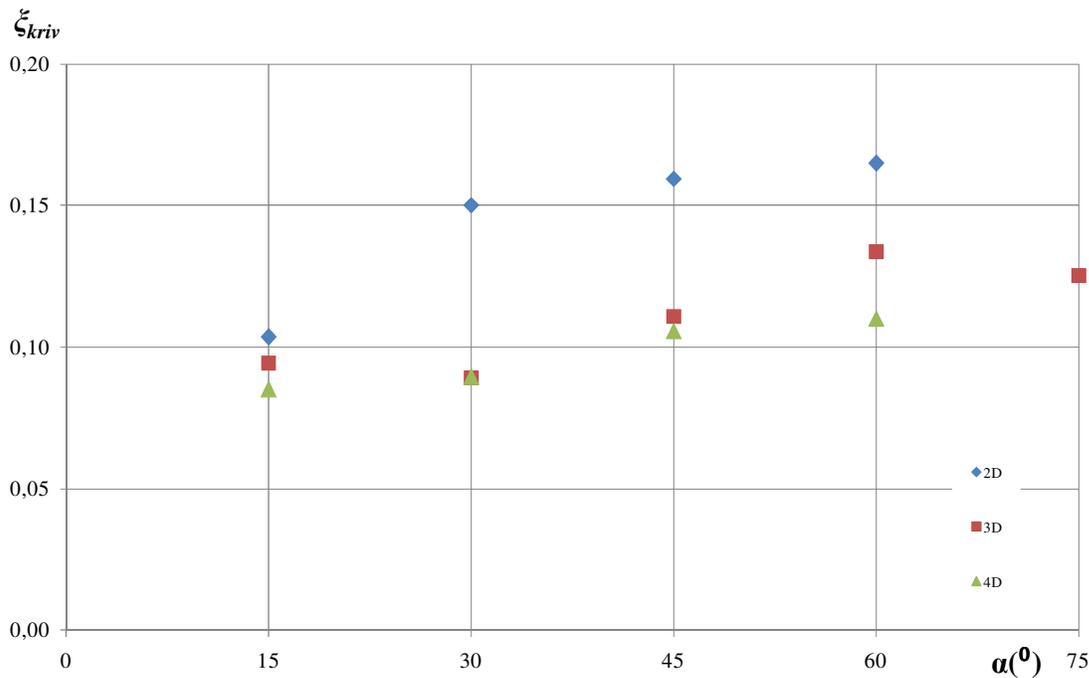
$\bar{\xi}_{kriv}^{R,\alpha}$	15°	30°	45°	60°	75°
R=2D	0,104	0,150	0,159	0,165	/
R=3D	0,095	0,089	0,111	0,134	0,125
R=4D	0,085	0,090	0,106	0,110	/

Са слике 6 се уочава да са повећањем закривљености и скретног угла, расте и вредност коефицијента губитка у кривини, што се могло очекивати. У табели 3 запажа се велика вредност стандардне девијације за скретни угао од 75°, што указује на релативно малу поузданост коефицијената губитка за овај угао. Такође, и

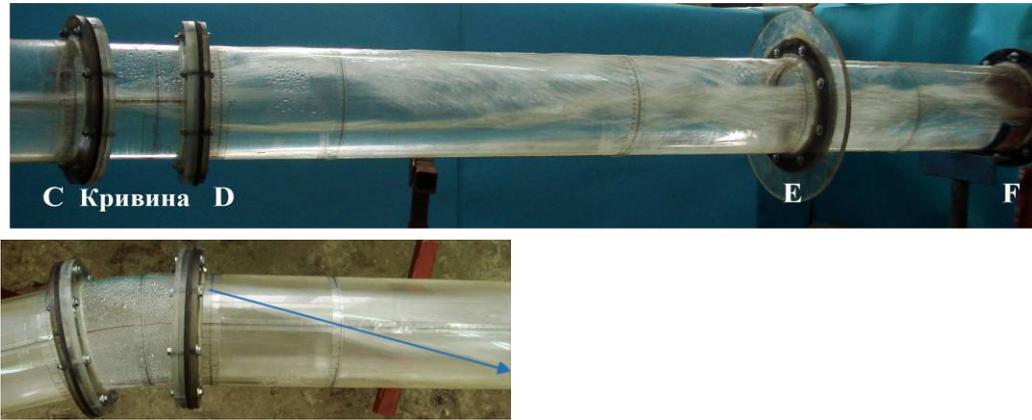
Табела 3. Стандардна девијација коефицијента губитка на кривини

$\sigma_{\xi_{kriv}^{R,\alpha}}$	15°	30°	45°	60°	75°
R=2D	0,123	0,021	0,034	0,057	/
R=3D	0,047	0,025	0,063	0,020	0,143
R=4D	0,031	0,043	0,045	0,034	/
$\bar{\sigma}_{\xi_{kriv}^{R,\alpha}}$	0,067	0,029	0,047	0,037	0,143

вредности стандардне девијације за скретни угао од 15° су веће у односу на остале разматране углове. При малом скретном углу, млаз се окреће по обиму цеви под малим нагибом у односу на правац проводника, па клизи по калоти на великој дужини (слика 7). Због тога је представљало тешкоћу да се за овај скретни угао одреди меродавна дубина низводно од кривине у пресеку Е, а грешке при њеном одређивању доводе до разлика у коефицијенту губитка.



Слика 6. Средња вредност коефицијента губитка у кривини, у зависности од закривљености и скретног угла



Слика 7. Окретање млаза по обиму цеви под малим нагибом у односу на правац проводника за скретни угао од 15°.

На основу приказаних резултата истраживања предложене су зависности за коефицијент локалног губитка у кривини кружног проводника при бурном течењу са слободном површином:

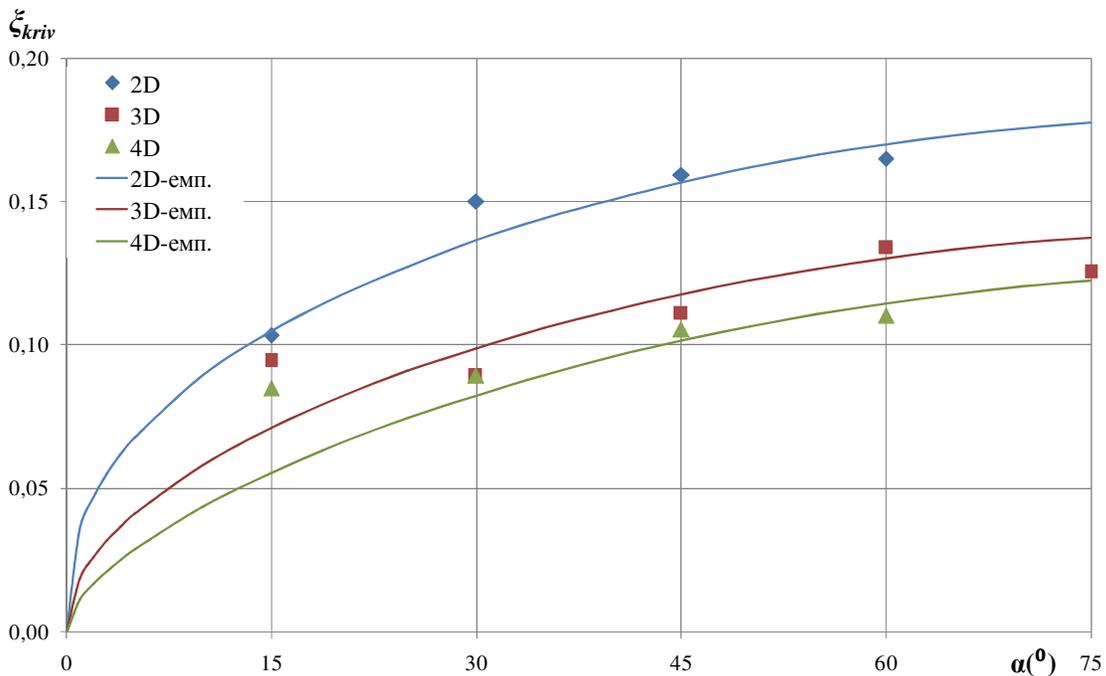
$$\xi_{kriv} = a \cdot \sin^b \alpha, \tag{7}$$

$$a = 0,11 + 0,29 \left(\frac{D}{R} \right)^2 \tag{8}$$

$$b = 0,2 + 0,1 \frac{R}{D} \tag{9}$$

где су коефицијенти a и b функције закривљености кривине:

Вредности коефицијената у једначинама (8) и (9) одређене су на основу регресионе анализе измерених величина.



Слика 8. Средња вредност коефицијента губитка у кривини и предложене емпиријске зависности.

4 ПОРЕЂЕЊЕ РЕЗУЛТАТА СА ИЗРАЗИМА ЗА ТЕЧЕЊЕ ПОД ПРИТИСКОМ

У литератури не постоје подаци о енергетским губицима у кривини затвореног кружног проводника, при бурном течењу са слободном површином. Зато ће се резултати приказаног истраживања поредити са изразима који се односе на струјање у кривини при течењу под притиском, према [12]. Ови изрази такође уважавају зависност губитка у кривини од закривљености и скретног угла.

$$\xi_{kriv} = \frac{2\alpha}{\pi^2} \frac{1}{\ln\left(\frac{R}{D}\right) + \alpha} \quad (10)$$

На слици 9 су упоређени резултати истраживања за течење са слободном површином у бурном режиму са изразом (10), према литератури [12]. Уочава се да су при течењу са слободном површином добијени за око 40% веће вредности коефицијента губитка енергије у кривини од вредности коефицијента губитка при течењу под притиском. Веће вредности настају с обзиром да при бурном течењу прво

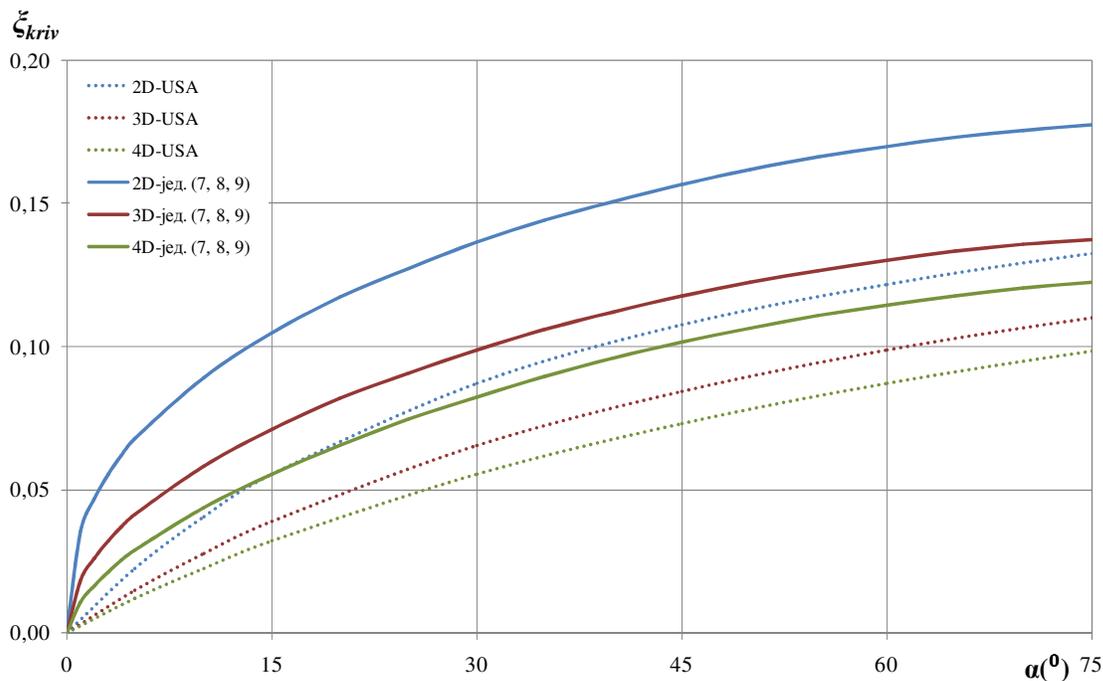
долази до удара окренутог млаза у супротну страну проводника и спајања са „неокренути“ током, а затим и до губитка енергије услед наизменичног ударања тока у странице проводника (стојећи таласи).

Коришћењем израза Идељчика [13]:

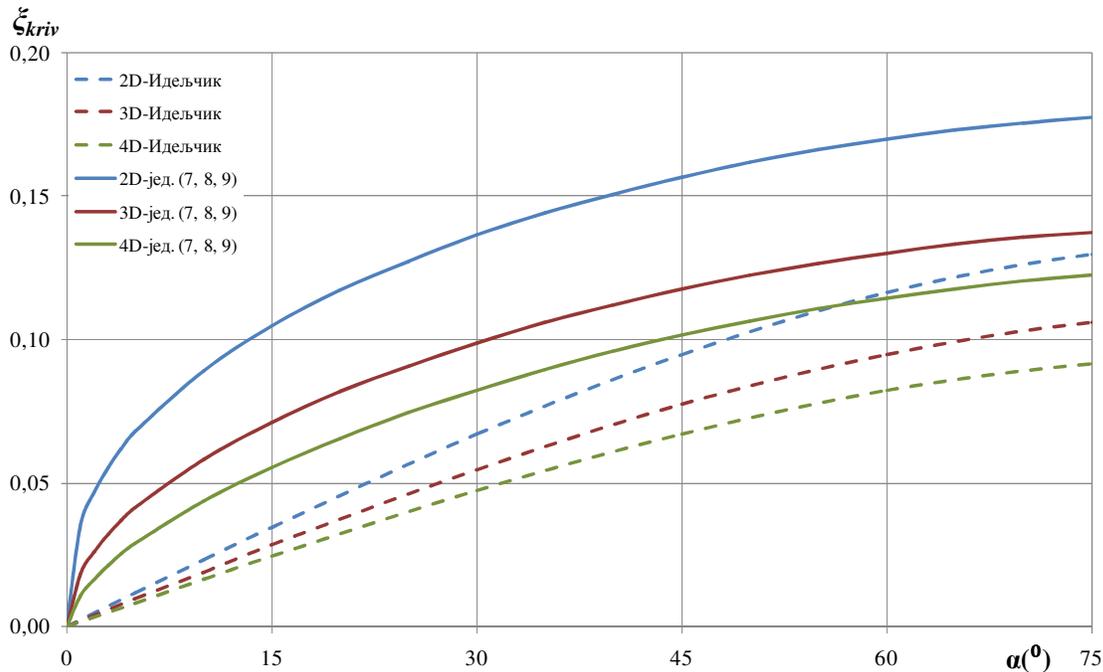
$$\xi_{kriv} = \frac{0,19 \cdot \sin \alpha}{\sqrt{\frac{R}{d_0}}} \quad (11)$$

добијају се још веће разлике између вредности коефицијената губитка у кривини. Разлике се повећавају са смањењем скретног угла, па за угао од 15° износе 2 – 3 пута.

На претходним дијаграмима се уочава да предложене криве генерално имају сличан облик као криве из литературе [12] и [13], али и да су са смањењем закривљености, суседне криве све ближе једна другој, односно да су разлике између вредности коефицијената губитка у кривини све мање.



Слика 9. Вредности коефицијента губитка у кривини при бурном течењу према предложеној зависности (7), (8) и (9), у поређењу са изразом USA Corps of Engineers за течење под притиском [12].



Слика 10. Вредности коефицијента губитка у кривини при бурном течењу, према предложеној зависности (7), (8) и (9), у поређењу са изразом Иделчика за течење под притиском [13].

5 ЗАКЉУЧЦИ

На основу испитивања на хидрауличком моделу одређене су емпиријске зависности за вредност коефицијента губитка енергије, који настају услед присуства кривине у затвореном проводнику при бурном току. Испитано је 13 различитих кривина, одређених комбинацијом скретног угла и закривљености.

Због непостојања сличних испитивања у литератури, поређене су вредности коефицијента губитка енергије у кривини, одређене на моделу, са вредностима коефицијента губитка енергије за течење под притиском, из литературе. Разлике су око 40%, „у корист“ коефицијента губитка при бурном течењу са слободном површином.

ЗАХВАЛНОСТ

Овај рад је подржан од стране Министарства просвете и науке Републике Србије у оквиру пројекта ТР 37009 „Мерење и моделирање физичких, хемијских, биолошких и

морфодинамичких параметара река и водних акумулација“.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Đorđević, B. (2008): Realizacija razvoja vodoprivredne infrastrukture u skladu sa strategijom iz Prostornog plana Srbije, Vodoprivreda, N^o 234-236, s.215-226.
- [2] Erčić, Ž. (2007): Pregled i primena rezultata savremenih hidrauličkih istraživanja u projektovanju preliva visokih brana, II deo, Vodoprivreda, N^o 228, s.181-204.
- [3] Erčić, Ž. (2009): Pregled i primena rezultata savremenih hidrauličkih istraživanja u projektovanju preliva visokih brana, III deo, Vodoprivreda, N^o 237-2239, s.47-60.
- [4] Erčić, Ž. (2011): Pregled i primena rezultata savremenih hidrauličkih istraživanja u projektovanju preliva visokih brana, IV deo, Vodoprivreda, N^o 252-254, s.227-248

- [5] Савић, Љ., Капор, Р., Кузмановић, В., Миловановић, Б. (2012): Одређивање димензија шахтног прелива емпиријским једначинама, *Водопривреда*, N⁰ 258-260, с. 141-154.
- [6] Капор, Р. и други (2009): Procena propusne моћи dvostrukog боћног прелива, *Vodoprivreda*, N⁰ 240-242, с.103-108.
- [7] Савић, Љ., Кузмановић, В., Миловановић, Б. (2010): Степенести прелив са одбојном гредом, *Водопривреда*, N⁰ 246-248, с.175-180.
- [8] Žugić, D. i други (2007): Hidraulička modelska ispitivanja stepenastog прелива, *Vodoprivreda*, N⁰ 225-227, с.97-104.
- [9] Капор, Р., (2011), *Хидраулика*, Универзитет у Београду – Грађевински факултет, Београд.
- [10] Савић, Љ., Капор, Р., Кузмановић, В., Миловановић, Б., (2012), „Одређивање димензија шахтног прелива емпиријским једначинама“, *Водопривреда* бр. 258-260, pp. 141-155.
- [11] Kolarević, M, Savić, Lj, Kapor, R, Mladenović, N., (2013), Supercritical Flow in Circular Closed-conduit Bends, *Proceedings of the 4th International Congress of Serbian Society of Mechanics*, Vrnjačka Banja, pp. 267-272.
- [12] U.S.A. Corps of Engineers, (1977), *Hydraulic Design Criteria*.
- [13] Idelchik, I.E., (1986), *Handbook of Hydraulic Resistance*, Springer – Verlag, Berlin.

ENERGY LOSS IN A CIRCULAR-CONDUIT BENDS WITH SUPERCRITICAL FLOW

by

Milena KOLAREVIĆ, Energoprojekt-Hidroinženjering,
Ljubodrag SAVIĆ, Radimir KAPOR, University of Belgrade – Faculty of Civil Engineering,
Nikola MLADENOVIĆ, University of Belgrade – Faculty of Mechanical Engineering

Summary

In this paper the energy loss in a circular conduit bend with supercritical flow is analyzed. Based on the test results obtained by a scale model, the energy-loss coefficient has been determined. Simple empirical relationships were developed, describing the effects of the bend curvature and bend deflection angle on the energy losses. Since no expressions for supercritical

flow bend energy-loss coefficient exist, proposed empirical relationships have been compared with expressions relating to pressurized flow.

Keywords: energy loss, supercritical flow, horizontal bend, closed conduit, scale model

Redigovano 26.11.2013.