

## БУРНО ТЕЧЕЊЕ У КРИВИНИ ПРОВОДНИКА КРУЖНОГ ПОПРЕЧНОГ ПРЕСЕКА

Милена КОЛАРЕВИЋ<sup>1</sup>, Љубодраг САВИЋ<sup>2</sup>, Радомир КАПОР<sup>2</sup>,  
Никола МЛАДЕНОВИЋ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Енергопројект-Хидроинжењеринг, Бул. Михаила Пупина 12, 11070 Београд, milenakolarevic@yahoo.com

<sup>2</sup> Универзитет у Београду – Грађевински факултет, ljdsavic@grf.bg.ac.rs, rkapor@hikom.grf.bg.ac.rs

<sup>3</sup> Универзитет у Београду – Машински факултет, nmladenovic@mas.bg.ac.rs

### РЕЗИМЕ

Анализирано је сложено струјање које настаје у кривини кружног проводника при бурном току. Испитивања су урађена на хидрауличком физичком моделу, као и на нумеричком моделу, заснованом на програмском пакету ANSYS (Fluent). Приказани су резултати добијени на поменути два модела, са коментарима и препорукама за њихову примену. Предложене су једноставне зависности којима се описује утицај закривљености, скретног угла и прилазних услова течења (дубина и Фрудов број узводно од кривине) на разматрано течење.

**Кључне речи:** бурно течење, хоризонтална кривина, затворени проводник, физички модел, нумерички модел

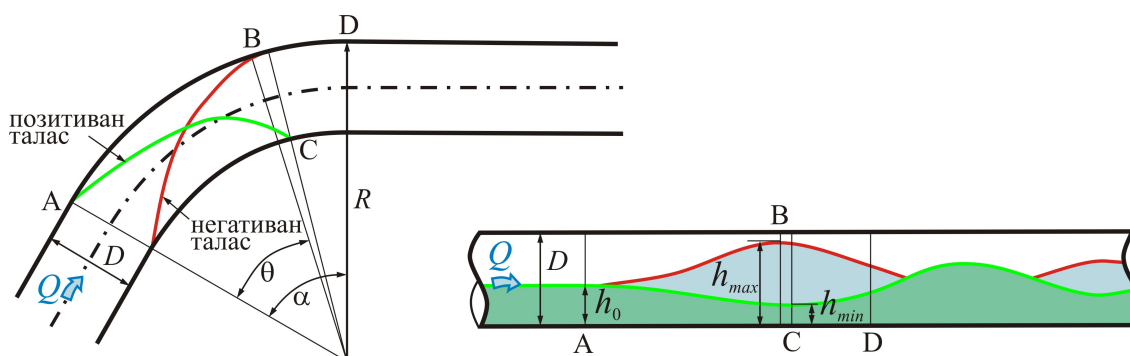
### 1 УВОД

Промена правца чврсте границе у хоризонталној равни при бурном течењу изазива нагле поремећаје дубине и брзине тока, који се простиру низводно, у

виду косих (стојећих) стрмих таласа. На спољној (конкавној) страни кривине настаје позитивни, а на унутрашњој (конвексној) негативни талас.

Промене дубине и брзине су подложне законима рефлексије и интерференције. Таласни поремећаји се простиру низводно и одбијају од чврсте границе, услед чега се на зидовима проводника (брзотока или тунела) наизменично јављају позитивне и негативне осцилације нивоа.

Код затворених проводника (тунела) може да настане сложено, хеликоидно течење, као последица „ломљења“ таласа низводно од кривине. При великој запуњености пресека, долази до загушења, чиме се прекида проток ваздуха изнад водене површине, па течење са слободном површином прелази у течење под притиском. Ова појава може имати и периодични карактер, где се наизменично смењују течење под притиском и са слободном површином, што доводи до смањења капацитета тунела, уз опасност од вибрација и других штетних последица.



Слика 1. Простирање позитивног и негативног таласа дуж проводника

У пракси се разматрано бурно течење у затвореним проводницима може јавити код евакуационих објеката брана (темељних испуста и тунелских прелива [2], [3]), као и у колекторима за кишну канализацију. Због недовољног познавања особености бурног тока у кривинама, најчешће се избегавају криволинијске деонице код евакуационих објеката, иако то доводи до знатног увећања трошкова изградње.

У овом раду је проучавано бурно течења у кривини кружног проводника на хидрауличком и нумеричком моделу, са циљем да се одреде услови при којима долази до настанка хеликоидног течења, као и загушења тока. Испитан је широк опсег вредности скретног угла и закривљености кривине,  $D/R$ , а у зависности од услова течења узводно од кривине (дубине и Фрудовог броја).

Хидраулички модел је направљен у лабораторији Грађевинског факултета у Београду. Резултати добијени на физичком моделу су коришћени за калибрацију и верификацију нумеричког. На основу резултата и извршене анализе предложене су зависности, којима се описује утицај наведених кључних фактора на бурно течење у кружном проводнику. Резултати ове анализе су упоређени са расположивим резултатима из литературе.

Анализом бурног течења при промени правца контуре бавили су се многи истраживачи. Међутим, већина радова се бави течењем у отворним каналима, док је течење у кривини затворених

проводника обрађено у веома малом броју радова ([3] и [4]).

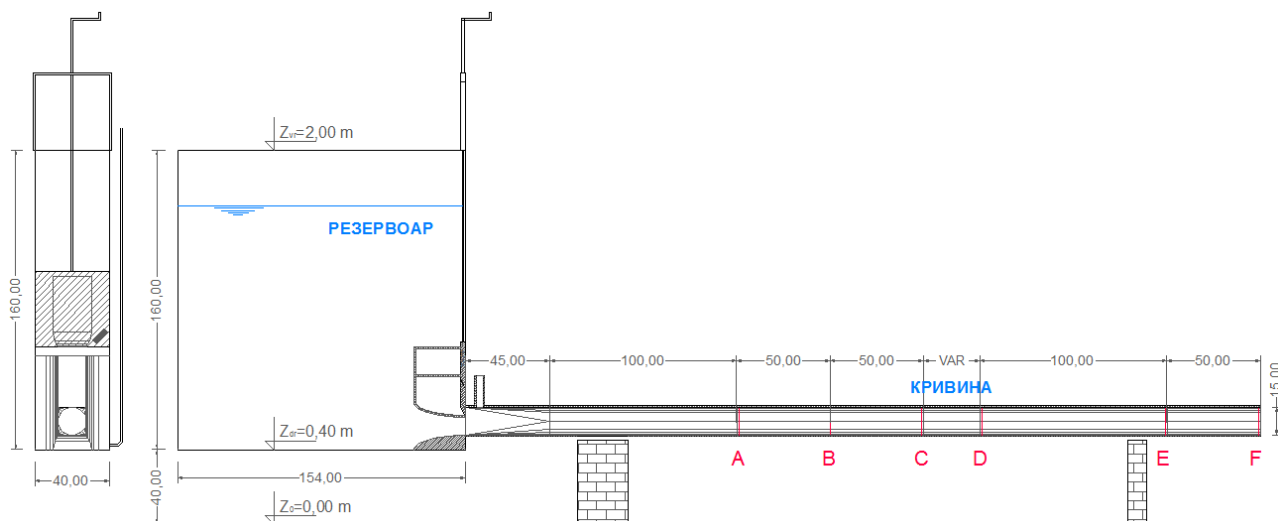
У раду [3] анализирано је течење у кривини темељног испуста кружног попречног пресека у циљу одређивања услова за настанак хеликоидног течења. Испитивања су обављена на хидрауличком моделу пречника цеви од 24 cm, са скретним углом од  $45^\circ$ , за закривљеност од  $D/R = 1/3$ . Испуњеност проводника узводно од кривине је била 60% ( $h_0/D = 0,6$ ), са опсегом Фрудових бројева од  $1,4 \div 4,2$  ( $Fr_0 = v/\sqrt{gh}$ ). Пошто карактеристике течења у кривини и низводно од ње првенствено зависе од прилазних услова, аутори су у зависности од узводне запуњености и Фрудовог броја дефинисали бездимензиони број загушења  $C$ , на основу кога су одредили границу појаве хеликоидног течења:

$$C = Fr_0 \frac{h_0}{D} \begin{cases} C < 1 & \text{Течење без окретања млаза} \\ C \geq 1 & \text{Хеликоидно течење} \end{cases}$$

## 2 ХИДРАУЛИЧКА МОДЕЛСКА ИСПИТИВАЊА

Експериментална инсталација за испитивање разматраног течења се састоји од (сл. 3 и 4):

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



Слика 3. Подужни пресек експерименталне инсталације



Обликован улаз у проводник

Прелазна деоница и аерациона цев

Изглед експерименталне инсталације

Излазни део

Слика 4. Фотографије експерименталне инсталације

Проток се мери пре уласка у узводни резервоар на Томсоновом преливу. 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 са бокова и по дну (слике 3. и 4.). Уз то, изнад горње ивице табласте уставе је постављена маска, прилагођена облику горње ивице млаза.

Са квадратног попречног пресека уставе (који је повољнији за затварање отвора), 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. Проводник је целом дужином хоризонталан. Жељени услови течења (прилазна дубина и Фрудов

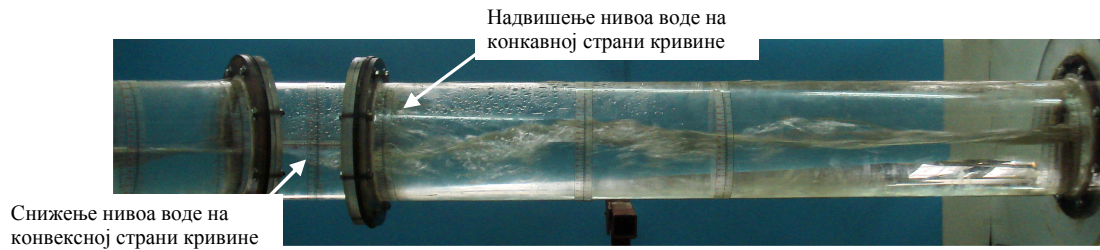
број) се постижу променом дубине воде у резервоару и висине отвора уставе.

Испитани су утицаји три закривљености кривине ( $D/R = 1/2, 1/3, 1/4$ ) и четири скретна угла ( $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  и  $60^\circ$ ). Анализа је проширена и на веће скретне углове ( $75^\circ$  и  $90^\circ$ ), али само за закривљеност  $D/R = 1/3$ , што укупно чини 14 случајева.

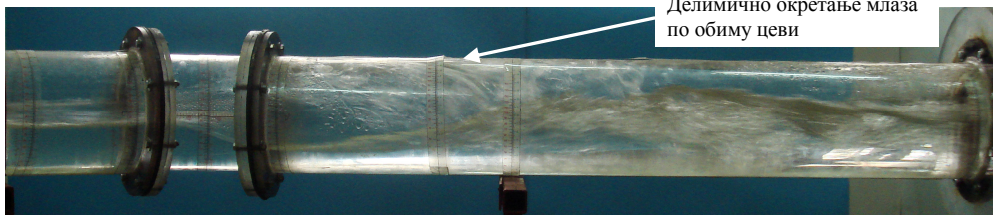
### 3 АНАЛИЗА МОДЕЛСКИХ ИСПИТИВАЊА

Течење на моделу се класификује у један од четири усвојена типа (сл. 5):

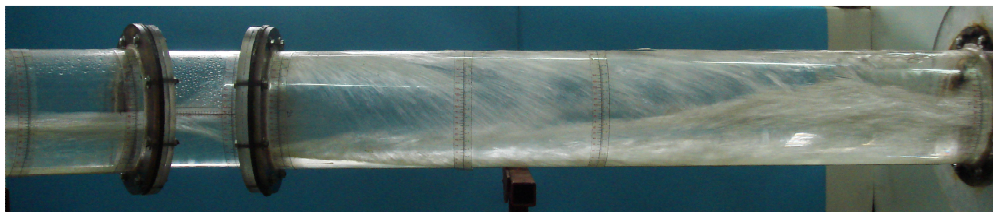
- 1) Течење без окретања млаза – *линијско течење*,
- 2) *Прелазно течење*, код кога долази до делимичног окретања млаза,
- 3) *Хеликоидно течење*, код кога се млаз потпуно окренуо, али не долази до загушења тока,
- 4) Течење са *загушењем тока*, код кога је цео пресек испуњен мешавином воде и ваздуха.



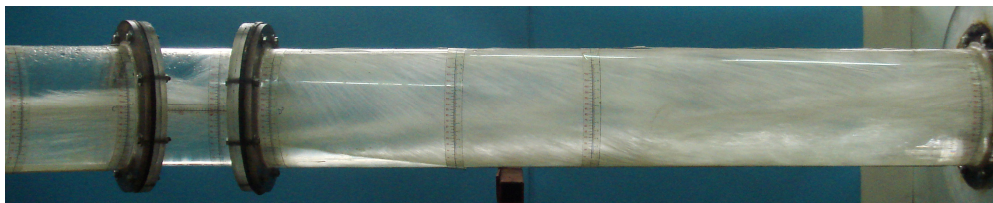
Слика 5а. Линијско течење, без окретања млаза



Слика 5б. Прелазно течење код кога долази до делимичног окретања млаза



Слика 5ц. Хеликоидно течење код кога се млаз потпуно окренуо, али не долази до загушења тока



Слика 5д. Хеликоидно течење са загушењем тока

Слика 5. Типичне струјне слике при бурном течењу у кривини проводника кружног попречног пресека.

За сваки од 14 испитаних случајева (који су дефинисани комбинацијом скретног угла и закривљености кривине), одређене су границе *настанка хеликоидног течења* и *границе загушења*. Обухваћено је укупно 182 мерења. Обухваћен је опсег релативних прилазних дубина,  $h_0/D$ , од  $0,23 \div 0,84$  и опсег Фрудових бројева,  $Fr_0 = v/\sqrt{gh}$ , од  $1,5 \div 4,5$ . При мерењима са релативним дубинама мањим од  $0,3 \div 0,35$ , јављају се стојећи таласи на правој деоници узводно од кривине, што отежава поуздано одређивање прилазних услова течења (дубина, брзина), а поред тога, утиче и на течење у самој кривини и низводно од ње. Због тога, за

релативне прилазне дубине мање од 0,3, резултате треба узети са резервом.

У зависности од типа течења мерене су различите величине. За течење без потпуног окретања млаза мерена је максимална и минимална дубина воде на конкавној и конвексној страни кривине и место њиховог настанка, као и други минимум и максимум, који се јављају низводно од кривине. При хеликоидном течењу мерено је место на коме окренути млаз дотиче калоту цеви у кривини. Код течења са загушењем мерена је и дужина потеза низводно од кривине на којој почиње загушење тока.

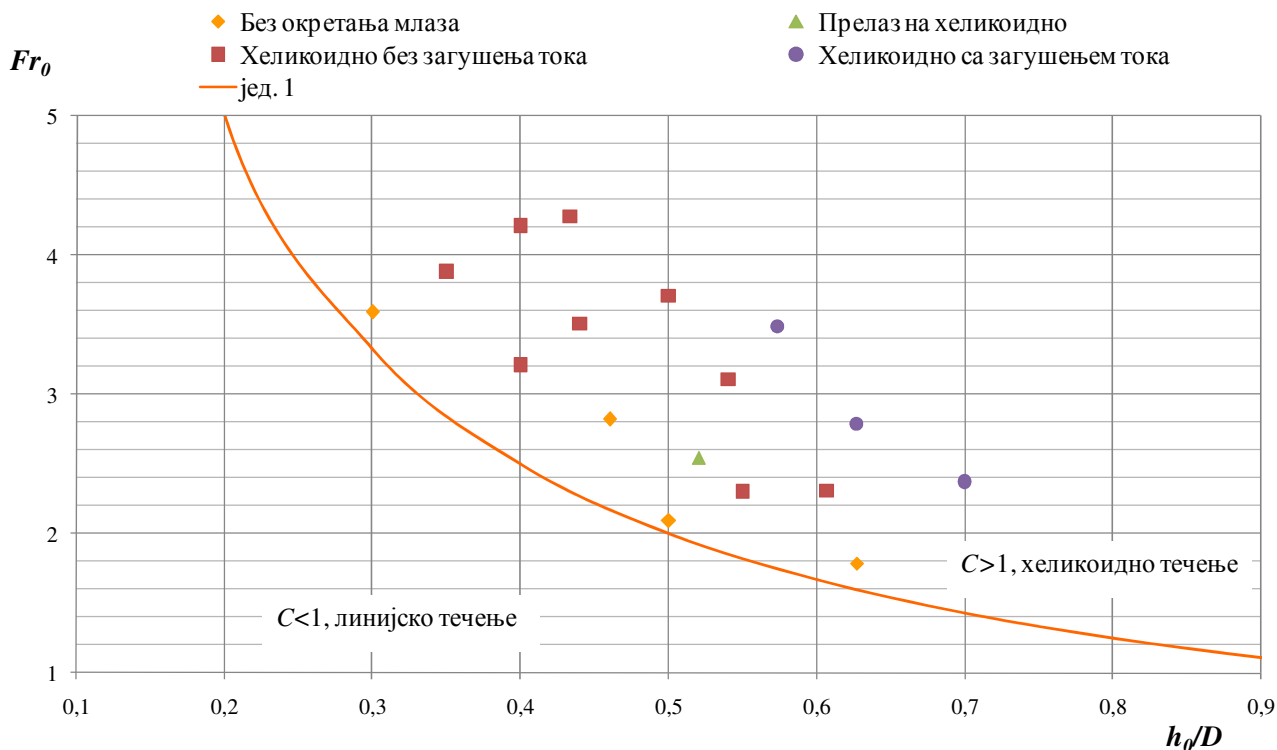
У наставку су приказани резултати мерења за свих 14 случајева. Детаљан поступак одређивања границе хеликоидног течења и границе загушења показан је на примеру диспозиције проводника са закривљеношћу  $D/R = 1/3$  и скретним углом кривине од  $45^\circ$ .

### 3.1 Анализа резултата мерења са закривљеношћу $D/R = 1/3$ и скретним углом кривине од $45^\circ$

На овом моделу је извршено 14 мерења. Обухваћен је опсег релативних прилазних дубина,  $h_0/D$ , од  $0,35 \div 0,70$  и Фрудових бројева узводно од кривине,  $Fr_0 = v/\sqrt{gh}$ , од  $1,78 \div 4,28$ . Течење је класификовано у складу са напред изнетом поделом. На слици 6. приказана је зависност типа течења од релативне дубине и Фрудовог броја. Приказана је и граница између линијског течења (без окретања млаза) и хеликоидног течења према јед. (1) (литература [3]).

Граница између линијског и хеликоидног течења добијена према једначини (1), прати резултате мерења на моделу. Међутим, сви резултати мерења налазе се, према јед. (1), у зони где је  $C > 1$  (где се очекује појава хеликоидног течења), иако су мерењима обухваћени и случајеви када не долази до окретања млаза и хеликоидног течења. Треба приметити да у литератури [3] нису приказане величине измерене на моделу, а на основу којих је изведена емпиријска једначина (1). Ово наводи на претпоставку да су аутори преко јед. (1) желели да обезбеде значајну меру сигурности за будуће кориснике.

На основу мерења на хидрауличком моделу, конструисана је граница између линијског и хеликоидног течења, као и граница настанка загушења тока. Ове границе су приказане на слици 7., а у наставку су приказани емпиријски изрази који их описују.



Слика 6. Тип течења у зависности од релативне прилазне дубине и Фрудовог броја за закривљеност  $D/R = 1/3$  и скретни угао од  $45^\circ$

Граница појаве хеликоидног течења (једначина 3) је, као и у једначини (1), изражена у функцији релативне дубине,  $h_0/D$ , и Фрудовог броја улазног млаза,  $Fr_0$ :

$$C_H^{3D,45^\circ} = \frac{1}{1,1} Fr_0 \left( \frac{h_0}{D} \right)^{1,15} \begin{cases} < 0,95 & \text{нема окретања млаза} \\ \geq 1,05 & \text{хеликоидно течење} \\ = 0,95 - 1,05 & \text{прелазно течење} \end{cases} \quad (3)$$

где је  $C_H^{3D,45^\circ}$  – број хеликоидног течења за кривину са  $D/R = 1/3$  (односно  $R = 3D$ ) и скретним углом од  $45^\circ$ .

Граница између хеликоидног течења са и без загушења тока:

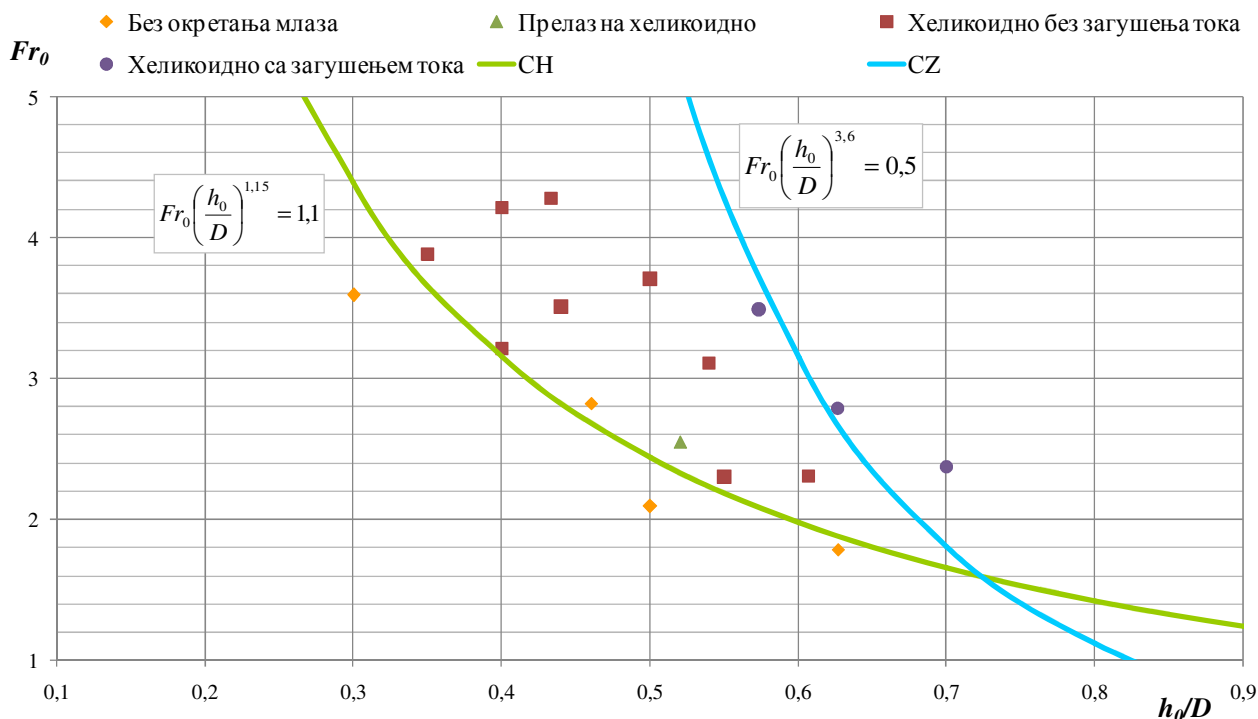
$$C_Z^{3D,45^\circ} = \frac{1}{0,5} Fr_0 \left( \frac{h_0}{D} \right)^{3,6} \begin{cases} < 1 & \text{нема загушења тока} \\ \geq 1 & \text{ток је загушен низводно од кривине} \end{cases} \quad (4)$$

где је  $C_Z^{3D,45^\circ}$  – број загушења за кривину са  $D/R = 1/3$  и скретни угао од  $45^\circ$ .

### 3.2 Утицај увлачења ваздуха у ток

На хидрауличком моделу је мерен проток воде кроз експерименталну инсталацију и дубина тока узводно од кривине, па је брзина тока рачуната из једначине континуитета, а на основу ње и Фрудов број улазног млаза. С обзиром да је кроз експерименталну инсталацију најчешће текла мешавина воде и ваздуха, а не чиста вода, брзине и Фрудови бројеви улазног млаза су на овај начин потцењени.

Да би се тачније одредиле стварне брзине у проводнику, процењена је количина увученог ваздуха у ток, на основу израза из литературе [1], па



Слика 7. Границе између линијског и хеликоидног течења и граница загушења тока за закривљеност  $D/R = 1/3$  и скретни угао од  $45^\circ$

је брзина мешавине узводно од кривине одређена из једначине континуитета.

$$\bar{C} = 0,05 Fr_0 - \frac{W \sqrt{\sin \varphi}}{63 Fr_0} \quad (5)$$

$$V_{mes} = \frac{Q}{A(1-\bar{C})} \quad (6)$$

где је:  $\bar{C}$  – средња концентрација ваздуха у мешавини,  $W = \frac{v}{\sqrt{\sigma/(\rho y_e)}}$  – Веберов број,  $V$  –

средња брзина,  $\sigma$  – површински напон,  $y_e = A/B$  – ефективна дубина тока,  $\varphi$  – угао између проводника и хоризонтале,  $V_{mes}$  – брзина мешавине и  $A$  – измерена површина попречног пресека тока.

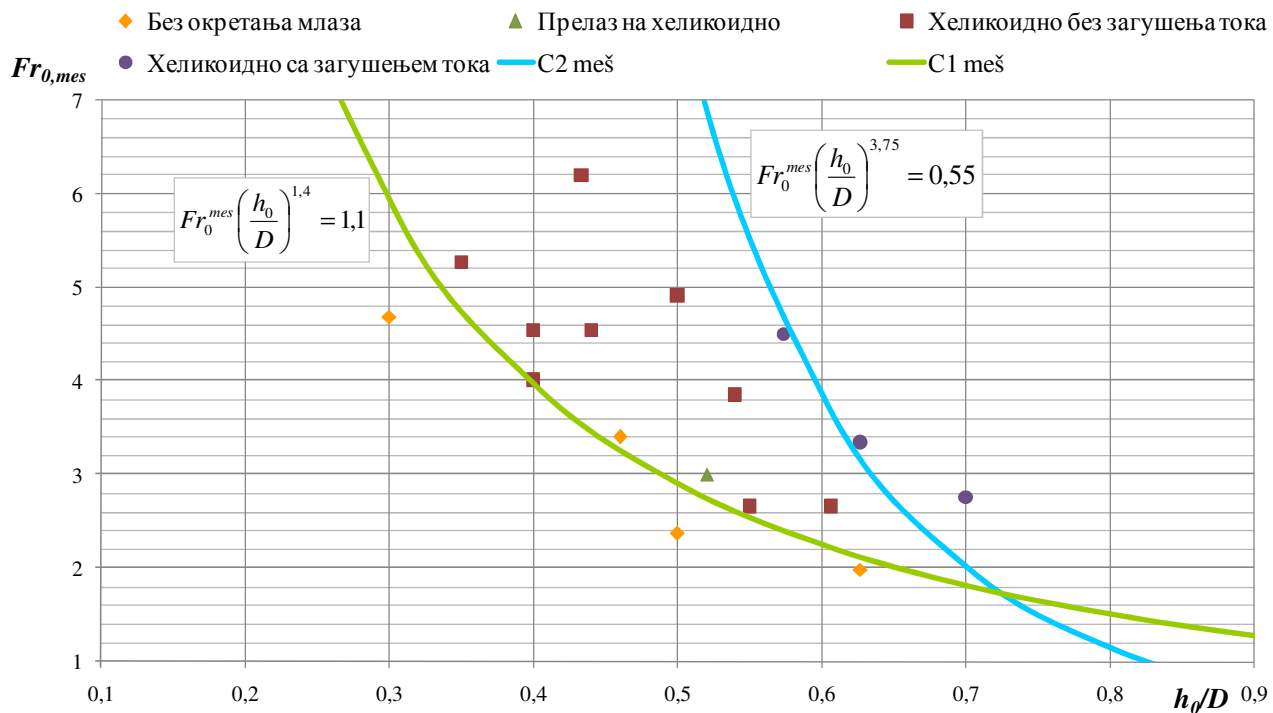
На слици 8. је приказана граница настанка хеликоидног течења и граница загушења тока, зависно од релативне прилазне дубине и Фрудовог броја, који је одређени са брзином мешавине,  $V_{mes}$ .

Корекција Фрудовог броја због увлачења ваздуха у ток, не утиче на међусобни положај кривих, па су и закључци поређења исти. У наставку су, ради прегледности, приказана само поређења граница хеликоидног течења и загушења са корекцијом Фрудовог броја услед увлачења ваздуха у ток.

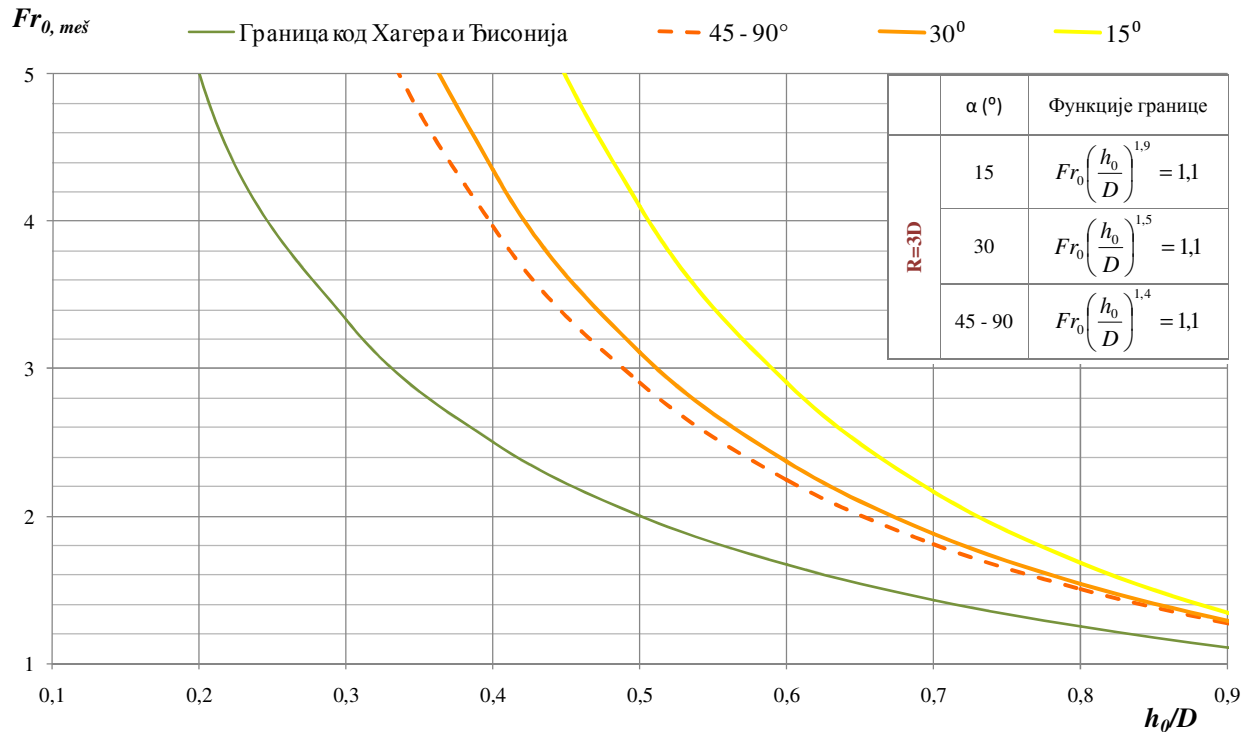
### 3.3 Утицај скретног угла на тип течења

Приказане су границе између линијског и хеликоидног течења у зависности од скретног угла кривине, за закривљеност проводника од  $D/R = 1/3$ . Сличан облик зависности остварен је и за остале разматране закривљености.

На слици 9 запажа се да вредност скретног угла практично нема утицаја на појаву хеликоидног течења за углове веће од  $30^\circ$ . Уочено је да нагиб узлазне путање млаза дуж конкавне стране кривине не зависи од скретног угла, већ само од закривљености цеви и брзине. Зато се у готово свим



Слика 8. Границе настанка хеликоидног течења и граница загушења тока за мешавину воде и ваздуха (закривљеност  $D/R = 1/3$  и скретни угао кривине од  $45^\circ$ )



Слика 9. Границе појаве хеликоидног течења у проводнику за мешавину воде и ваздуха (закривљеност  $D/R = 1/3$  и различити скретни углови кривине)

испитаним случајевима за углове од  $45^\circ - 90^\circ$ , млаз окренуо по обиму цеви у првих  $40^\circ$  кривине, а само у два случаја низводно од тог места, и то при малим прилазним дубинама. Одавде је очигледно да су услови за настанак хеликоидног течења исти за скретне углове од  $45^\circ - 90^\circ$ .

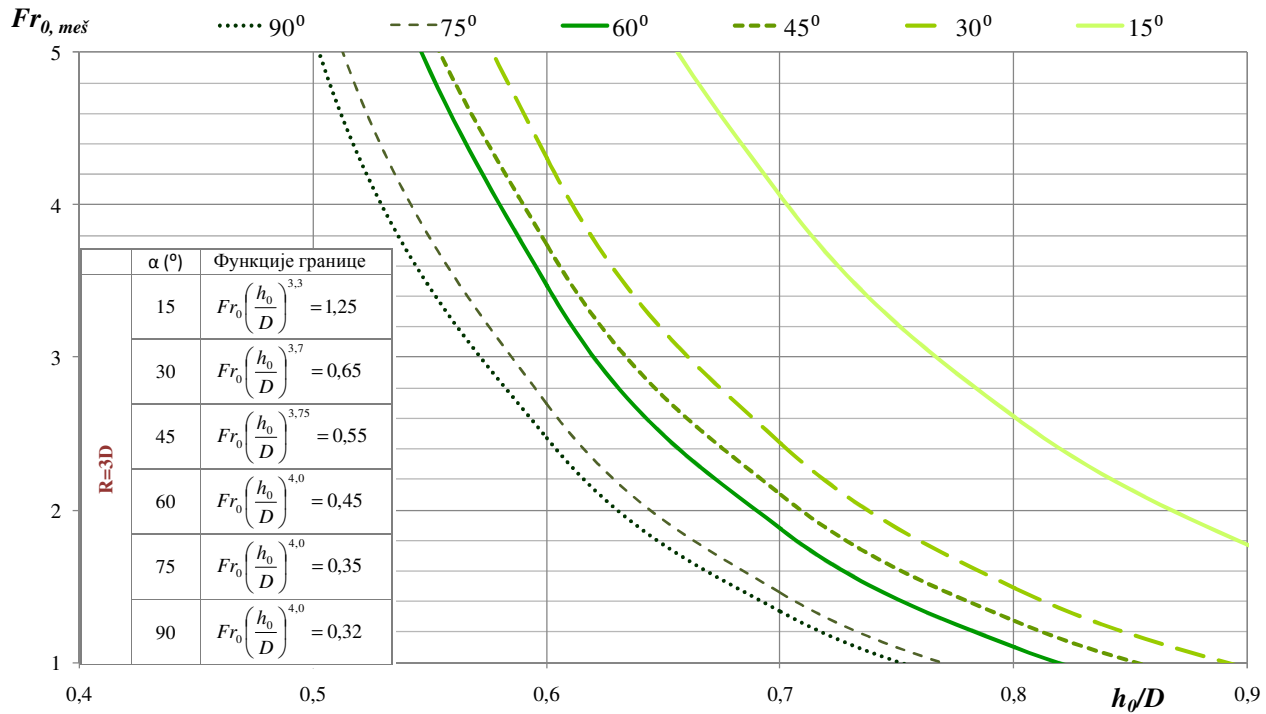
С друге стране, крива за скретни угао од  $15^\circ$  се налази знатно изнад осталих. С обзиром да нагиб узлазне путање постаје блажи чим млаз изађе из кривине и пређе на праву деоницу, окретање млаза по обиму цеви се догоди на већој удаљености од почетка кривине него при већим скретним угловима, или се уопште не догоди. У скоро свим случајевима у којима је дошло до хеликоидног течења са углом од  $15^\circ$ , окретање млаза се остварило на правој деоници низводно од кривине. Ово значи да ће при истим условима узводно од кривине, доћи до појаве хеликоидног течења код већих скретних углова, док ће се за угао од  $15^\circ$  остварити течење без окретања млаза.

Са порастом улазне дубине (узводно од кривине), ниво воде је ближи темену цеви, па се млаз „лакше“ окрене по обиму, него у случају са мањом дубином. Уз то, положај окретања млаза се помера узводно ка почетку кривине, па су разлике између граница хеликоидног течења за разматране скретне углове мање него при мањим улазним дубинама.

Све криве добијене на основу резултата описаних испитивања су истог облика као и крива дефинисана једначином (1) [3], али су у односу на ову померене навише, ка већим вредностима Фрудовог броја. С обзиром да у литератури [3] нису приказане измерене вредности, већ је само дата емпиријска једначина (1), може се претпоставити да су аутори желели да будућим корисницима пруже зависност веће сигурности.

На слици 10 пореде се границе загушења тока код проводника са различитим скретним угловима, а за закривљеност проводника од  $D/R = 1/3$ .





Слика 10. Границе загушења тока за мешавину воде и ваздуха (закривљеност  $D/R = 1/3$  и различити скретни углови кривине)

За разлику од настанка хеликоидног течења, скретни угао кривине значајно утиче на појаву загушења тока. Смањењем скретног угла кривине, граница загушења се помера на више, ка већим улазним дубинама и Фрудовим бројевима. Као и код хеликоидног течења, опасност од загушења расте са повећањем улазне дубине и Фрудовог броја.

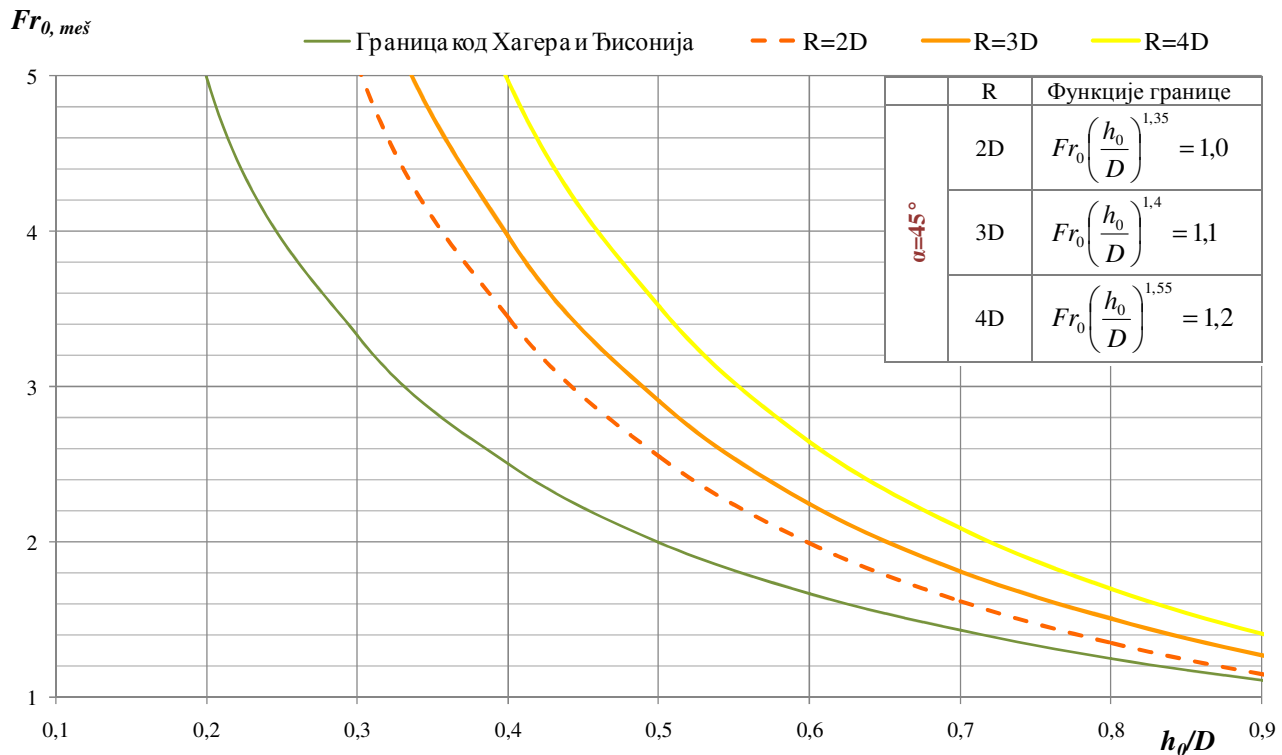
### 3.4 Утицај закривљености на карактеристике течења

Утицај закривљености на тип течења у кривини је приказан на примеру скретног угла од  $45^\circ$ .

На слици 11 су приказане границе између линијског и хеликоидног течења за скретни угао кривине од  $45^\circ$ . Уочава се да закривљеност кривине битно утиче

на настанак хеликоидног течења у проводнику. Са повећањем закривљености (а при истим узводним условима), нагиб узлазне путање млаза расте, па се положај окретања помера узводно (слика 12а), а граница настанка хеликоидног течења на ниже. Супротно томе, са смањењем закривљености, место окретања се помера низводно, или окретање изостаје, у случају када млаз не досегне до темена цеви због благог нагиба узлазне путање (слика 12б).

На слици 13 пореде се границе загушења тока код проводника са различитим закривљеностима, а при истом скретном углу кривине од  $45^\circ$ . За сваку испитану закривљеност кривине конструисана је крива којом се описује граница загушења. Њихов међусобни положај је сличан као и у случају хеликоидног течења, па су и закључци исти.



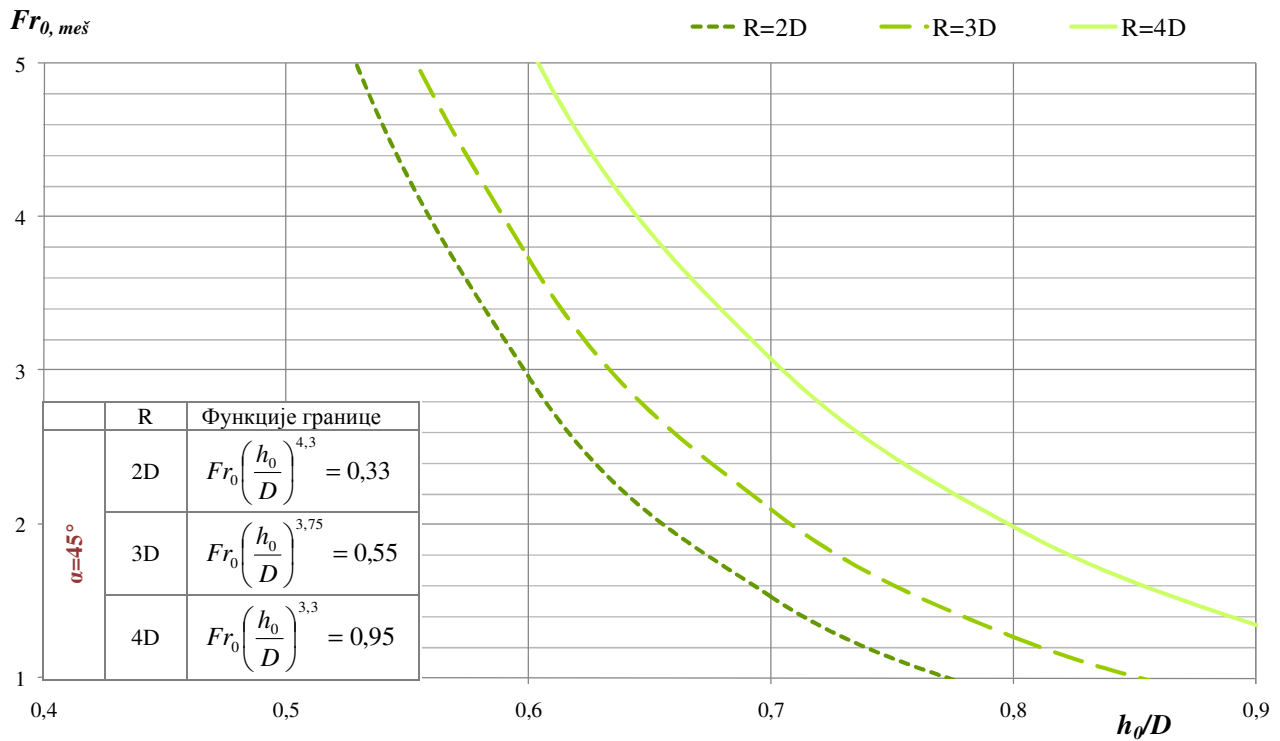
Слика 11. Границе појаве хеликоидног течења у проводнику за мешавину воде и ваздуха (скретни угао кривине од  $45^\circ$  и различите закривљености)



а. Хеликоидно течење за  $R=2D$

б. Течење без окретања млаза за  $R=4D$

Слика 12. Облик путање узлазног млаза на конкавној страни кривине за различите закривљености, скретни угао од  $45^\circ$  и исте узводне услове



Слика 13. Границе загушења тока за мешавину воде и ваздуха (скретни угао кривине од 45° и различите закривљености)

#### 4 НУМЕРИЧКИ МОДЕЛ ТЕЧЕЊА У КРИВИНИ

Нумерички модели се у последње време успешно користе за моделирање течења у хидротехничким објектима ([6]). Нумерички модел се заснива на решавању Навије – Стоксових једначина просторног струјања воде и ваздуха. Примењен је комерцијални програмски пакет Fluent (ANSYS – Fluid Dynamic), који користи метод коначних запремина.

С обзиром да се разматра устаљено течење нестишљивог флуида, једначине имају упрошћен облик:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{7}$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i \tag{8}$$

Тренутне вредности величина се раздвајају на временски осредњену вредност и флукуациону компоненту, која даје Рејнолдсов напон ( $\rho u_i \overline{u_j}$ ).

С обзиром да при разматраном течењу долази до интензивног мешања воде и ваздуха, и нумеричка симулација је такође урађена за двофазно течење, тако што се за сваку фазу задаје запремински удео у рачунском елементу.

Ако се усвоји да је запремински удео  $q$ -те фазе у контролној запремини  $\alpha_q$ , постоје три сценарија :

- $\alpha_q = 0$  контролна запремина је празна (нема  $q$ -те фазе)
- $\alpha_q = 1$  контролна запремина је пуна ( $q$ -том фазом)
- $0 < \alpha_q < 1$  у контролној запремини се налази граница између фаза

Једначина континуитета за другу фазу се трансформише у облик који омогућава праћење граничне површине између фаза.

$$\nabla(\alpha_q v_q) = \rho_q \sum_{p=1}^n (m_{qp} - m_{pq}) \quad (9)$$

где је  $(-m_{pq})$  – транспорт масе из фазе  $p$  у фазу  $q$ , а  $m_{qp}$  – транспорт масе из фазе  $q$  у фазу  $p$ .

За одређивање запреминских удела ваздуха и воде у елементима мреже коришћена је имплицитна QUICK метода, којом се коригује једначина континуитета за течење мешавине.

Рачунска област се састоји од 1.800.000 хексагоналних елемената, а прогушћена је у зони кривине и низводне од ње, као и у близини чврсте границе. Једначина одржања количине кретања је дискретизована методом другог реда тачности. За одређивање запреминских удела ваздуха и воде у елементима мреже је такође коришћена метода другог реда тачности (QUICK). На узводном крају цеви је задат ниво воде и масени проток воде и ваздуха, док је на низводном крају задато слободно истицање. Апсолутна хрававост цеви износи 0,001 mm.

#### 4.1 Поређење резултата физичког и нумеричког модела

У наставку је приказано поређење резултата добијених на физичком и нумеричком моделу за три

карактеристична типа течења: течење без окретања млаза, хеликоидно течење без загушења и течење са загушењем тока, а за модел са скретним углом од  $45^\circ$  и са закривљеношћу  $D/R = 1/3$ . На нумеричком моделу задати су исти прилазни услови течења као што је остварено на физичком моделу.

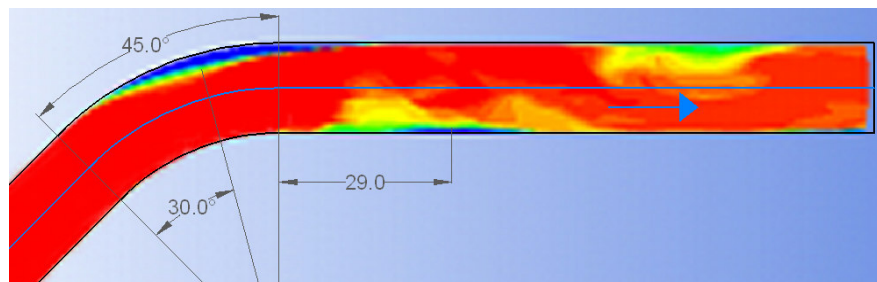
##### ❖ Течење без окретања млаза

Проток воде је 14,04 l/s, а дубина воде узводно од кривине 7,5 cm. На физичком моделу је забележено да се први максимум остварује на  $27^\circ$  од почетка кривине и износи 13,7 cm (конкавна страна), док се први минимум (конвексна страна) остварује на  $31^\circ$  и износи 3,9 cm. Други максимум (конвексна страна) се јавио на 22 cm низводно од краја кривине и износио је 11,2 cm.

У наставку си приказане фотографије са хидрауличког модела, а затим и графичка представа резултата нумеричке симулације.

На резултатима са нумеричког модела је црвеном бојом приказан чист ваздух, а плавом чиста вода. Осталим бојама су представљене мешавине различитих концентрација. С обзиром да се на горњој површини проводника углавном налази ваздух (чист или са великим учешћем у мешавини), очигледно је да није дошло до окретања млаза по обиму.

Место настанка максимума и минимума, као и њихова величина, зависе од концентрације ваздуха у



Слика 14. Течење без окретања млаза на хидрауличком и нумеричком моделу

мешавини. Са повећањем учешћа ваздуха у мешавини, место настанка екстремума се помера узводно. Уколико се усвоји да је меродавна концентрација ваздуха у мешавини 50% (што одговара мерењима на физичком моделу), први максимум се остварује на око  $30^\circ$  и износи 13,3 cm, што се веома добро слаже са резултатима физичког модела.

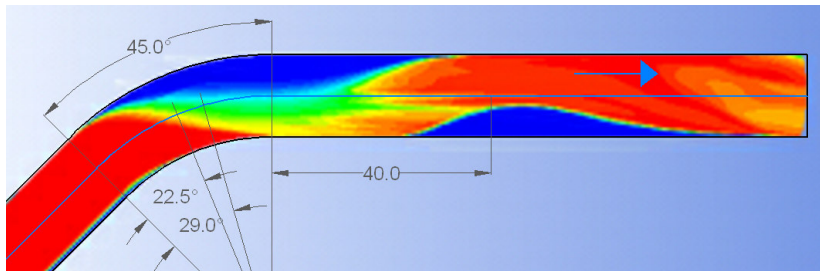
Слично, први минимум на нумеричком моделу се остварује на око  $32^\circ$  и износи 3,5 cm, чиме се потврђује добро слагања физичког и нумеричког модела.

На оба модела се уочава интензивно увлачење ваздуха у ток на конвексној страни у зони низводно

од кривине, где се јавља други максимум. На нумеричком моделу се други максимум остварује на око 29 cm низводно од краја кривине и износи 10,2 cm за концентрацију ваздуха у мешавини од 50%.

#### ❖ Хеликоидно течење без загушења

Хеликоидно течење без загушења се остварило при протоку од 22,4 l/s и дубини узводно од кривине од 9,1 cm, па је за тај случај урађено поређење резултата. На физичком моделу је измерено да млаз дотиче теме проводника на  $22,5^\circ$  од почетка кривине, а затим клизи по калоти до места удаљеног 45 cm низводно од кривине.



Слика 15. Хеликоидно течење на хидрауличком и нумеричком моделу

На нумеричком моделу се види да је дошло до окретања млаза по обиму цеви. Место на коме окренути млаз дотиче врх (теме) проводника, зависи од усвојене концентрације ваздуха у мешавини. Измереном месту окретања млаза на хидрауличком моделу, одговара концентрација ваздуха у мешавини од 70% на нумеричком. Ако се усвоји да је меродавна концентрација ваздуха у мешавини 50%, место окретања млаза се помера низводније и млаз дотиче теме на  $29^\circ$ . Треба напоменути да при окретању млаза долази до значајног увлачења ваздуха у ток, па је тешко прецизно одредити (проценити) колико је учешће ваздуха у мешавини на меродавном мерном месту.

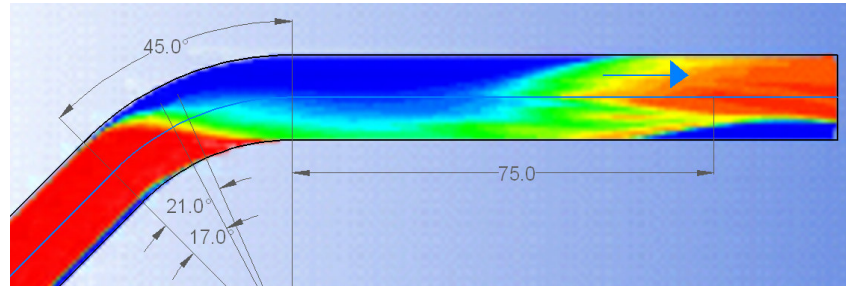
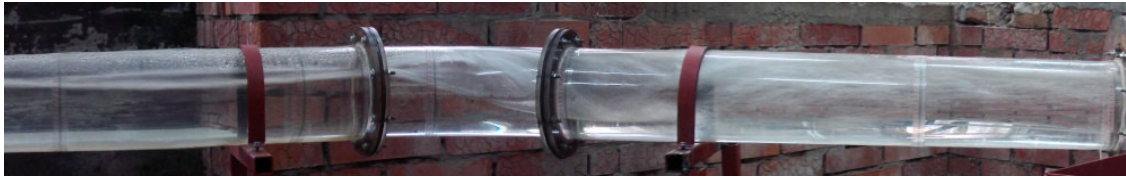
На оба модела се уочава да млаз клизи по обиму проводника дуж кривине и да се спаја са током на

супротној (конвексној) страни на њеном низводном крају. Максимум који се јавља низводно се јасно уочава на оба модела, с тим што се на физичком моделу остварило веће увлачење ваздуха него на нумеричком.

Рачунски је добијено да окренути млаз клизи по калоти на дужини од око 40cm низводно од кривине, што се добро слаже са мерењима на моделу.

#### ❖ Течење са загушењем тока

Течење са загушењем тока је настало при протоку воде од 30,43 l/s и узводној дубини од 10,5 cm. На хидрауличком моделу је измерено да млаз дотиче теме цеви на  $15^\circ$  и да тако окренут, клизи по калоти на дужини до 75 cm низводно од кривине.



Слика 16. Течење са загушењем на хидрауличком и нумеричком моделу

Слично као и на претходном примеру и овде се види да место окретања млаза зависи од усвојене концентрације ваздуха у мешавини. Окретање млаза на нумеричком моделу се остварило нешто низводније него на физичком, па тако за усвојену концентрацију ваздуха у мешавини од 50%, млаз дотиче теме проводника на  $21^\circ$  од почетка кривине. Са повећањем меродавне концентрације ваздуха у мешавини, резултати нумеричког модела су све ближи мерењима са физичког, па се за усвојену концентрацију ваздуха у мешавини од 70% млаз окрене на  $17^\circ$  од почетка кривине.

Рачунски добијена дужина на којој млаз клизи по калоти, одговара мерењима на хидрауличком моделу.

## 5 ЗАКЉУЧЦИ

Проучавано је бурно течење, у проводнику кружног попречног пресека, са кривином у хоризонталној равни.

- 1) Изведени су закључци о утицају закривљености проводника, скретног угла кривине и прилазних услова на настанак хеликоидног течења и загушења тока.
- 2) На основу резултата испитивања на физичком моделу одређене су емпијске зависности за оцену границе настанка хеликоидног течења и загушења.
- 3) Емпиријски израз из литературе, добијени на основу ограниченог броја испитиваних

случајева, дају конзервативну процену границе хеликоидног течења.

- 4) Поређење резултата физичког и нумеричког модела је показало добро слагање.

## 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] Falvey, H., (1980), *Air Water Flow in Hydraulic Structures*, Engineering Monograph, No. 41, pp 37–54.
- [2] Савић, Љ., Капор, Р., Кузмановић, В., Миловановић, Б., (2012), *Одређивање димензија шахтног прелива емпиријским једначинама*, Водoprивреда бр. 258-260, стр. 141-155.
- [3] Gisonni, C., Hager, W., H., (2000), *Bend Flow in Bottom Outlets*, материјал са интернета.
- [4] Giudice, G., Gisonni, C., Hager, W.H., (2000), *Supercritical Flow in Bend Manhole*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 48.
- [5] Kolarević M, Savić Lj, Kapor R, Mladenović N., (2013), *Supercritical Flow in Circular Closed-conduit Bends*, *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International*

- Congress of Serbian Society of Mechanics, Vrnjačka Banja, pp. 267–272.*
- [6] ANSYS Academic Research, Release 14.0, Help System, ANSYS Fluent Theory Guide, ANSYS, Inc.
- [7] Зиндовић, Б., Јовановић, М., Капор, Р., Продановић, Д., Ђорђевић, Д., (2010), *Нумеричка симулација струјног поља у близини водозахвата*, Водопривреда бр. 246-248, ст. 157-165.

## SUPERCritical FLOW IN CIRCULAR-CONDUIT BENDS

by

Milena KOLAREVIĆ, Ljubodrag SAVIĆ, Radomir KAPOR, Nikola MLADENOVIC

### Summary

Complex flow pattern occurring in a circular conduit bend with supercritical flow is analyzed. The research was done by a scale (physical hydraulic) model, and a numerical model developed in ANSYS (Fluent) surrounding. The results obtained by physical (scale) and numerical models are presented, with comments and recommendations for their application. Simple

empirical relationships were developed, describing the effects of the bend curvature, bend deflection angle and approaching flow conditions (depth and Froude number upstream from the bend) on the considered flow.

Keywords: supercritical flow, horizontal bend, closed conduit, scale model, numerical model

Redigovano 18.07.2013.