

Грађевински факултет
Универзитета у Београду
ОДСЕК ЗА ХИДРОТЕХНИКУ И ВОДНОЕКОЛОШКО ИНЖЕЊЕРСТВО

ДИПЛОМСКИ РАД

ПЛОЧАСТИ МЕШАЧ ТОКА КАО КОНДИЦИОНЕР
СТРУЈАЊА У ЦЕВИМА ПОД ПРИТИСКОМ

Ментор:
Проф.др. Душан Продановић

Кандидат:
Тијана Јовановић 302/04

Београд, 2012

Садржај

1. Увод.....	1
2. Преглед кондиционера струјања у цевоводима.....	2
3. Плочасти мешач тока.....	4
3.1 Начин рада.....	4
3.1.1 Радијални усмеривачи.....	4
3.1.2 Плочасти мешачи.....	5
3.2 Конструкција.....	6
4. Метод испитивања и опис инсталације.....	8
5. Обрада података са резултатима и дискусијом.....	13
5.1 Обрада податка.....	13
5.1.1 Теоријски профил брзина.....	14
5.1.2 Фуријеова трансформација и спектрална анализа.....	16
5.2 Резултати и дискусија.....	19
5.2.1 Утицај сонде на профил брзина.....	19
5.2.2 Профил брзина.....	20
5.2.3 Бочна (тангенцијална) компонента брзине.....	21
5.2.4 Турбулентне карактеристике тока.....	21
6. Закључак.....	27
Захвалност.....	27
Литература.....	28

Списак слика у раду

Слика 1. Типови кондиционера струјања	2
Слика 2. Принцип рада радијалних усмеривача	4
Слика 3. Принцип рада плочастих мешача.....	5
Слика 4. Плочасти мешач тока	6
Слика 5. Попречни пресек плочастиг мешача тока са детаљнијим погледом на плочице.....	6
Слика 6. Кружни уметак у цеви пречника 250mm.....	7
Слика 7. Плочасти мешач тока направљен као кружни уметак.....	7
Слика 8. Постављена цев са плочастим мешачем тока на инсталацији.....	7
Слика 9. Логер, појачивач излазног сигнала сонде и акумулатор.....	8
Слика 10. Електормагнетна сонда, положај у цеви вертикални одозго.....	8
Слика 11. Зоне утицаја на мерење профила брзина.....	9
Слика 12. Лабораторијска инсталација са приказом позиције кондиционера протока, мерног места и начином увлачења сонде у цев	10
Слика 13. Уводница са кугластим вентилом и монтираном сондом.....	10
Слика 14. Узрок деформације струјне слике, прво колено	11
Слика 15. Узроци деформације струјне слике. Друго колено и лептирасти затварач након кога је цев у коме се смешта плочасти мешач тока	11
Слика 16. Испитна линија, поглед са низводне стране ка узводној	12
Слика 17. Пример функције написане у програмском језику „Mathematica“	13
Слика 18. Упоредивање течења у ламинарном и турбулентном режиму	14
Слика 19. Добијање теоријског профила брзина.....	16
Слика 20. Корекција профила брзина у Зони III	16
Слика 21. Основни принцип Фуријеове трансформације	17
Слика 22. Дијаграм профила брзина за различите начине увлачења сонде у цев, са плочастим мешачем тока у цеви.....	19
Слика 23. Корекциони фактори за сваку од тачака.....	20
Слика 24. . Дијаграми коригованог профила брзина за различите начине увлачења сонде у цев (уклоњен утицај увучености сонде)	20
Слика 25. Средње вредности бочне компоненте брзине.....	21
Слика 26. Стандардне девијације бочне компоненте брзине.....	21
Слика 27. Анализа турбуленције у тачки $X/D=0.34$ за правац ХД.....	22
Слика 28. Тачка снимана приликом хоризонталног увлачења сонде из два правца, хоризонтално са леве и хоризонтално са десне стране.....	23
Слика 29. Упоредивање брзина у фреквентном домену за случајеве када плочасти мешач тока јесте у цеви и када није у цеви, у три различите тачке. Положај увлачења сонде хоризонтално са десне стране.....	24
Слика 30. Упоредивање брзина у фреквентном домену за случајеве када плочасти мешач тока јесте у цеви и када није у цеви, у три различите тачке. Положај увлачења сонде хоризонтално са леве стране.....	25
Слика 31. Упоредивање брзина у фреквентном домену за случајеве када плочасти мешач тока јесте у цеви и када није у цеви, у три различите тачке. Положај увлачења сонде вертикално одозго	26

1. Увод

Проток је, поред притиска и нивоа воде у резервоару, једна од основних величина у хидротехници па је његову вредност потребно познавати са што већом тачношћу. То је од посебног значаја ако је намена мерења протока наплата протекле количине воде.

Постоје разни уређаји који су кроз време пројектовани за ову сврху. Старије и једноставније конструкције мерила протока су самим својим присуством изазивале значајну локалну промену структуре тока, па су биле мање осетљиве на услове струјања. У системима под притиском су се некада користили вентуријеви водомери и сужења са блендом где се преко промене притиска одређује проток. Нове конструкције мерила се развијају тако да што мање ремете ток и да мере неку од компоненти брзина струјања воде. Оне затим посредно рачунају проток на основу измерене брзине, површине протицајног профила и претпоставке да је распоред брзина идеално оносиметричан.

Основни услов за постизање декларисане тачности мерила протока на цевоводима под притиском је постојање праволинијског струјања на месту уградње. У таквим условима се врши и калибрација мерила код произвођача.

Уградња мерила протока на место где струјна слика одступа од приближно идеалне, добијају се мерења смањење тачности, изван класе за уграђено мерило. До поремећаја струјне слике долази услед било какве нагле промене правца цеви (колена, рачве) или постављањем препрека флуидној струји (затварачи). Те неправилности, које се као последица оваквих промена јављају, а значајно утичу на мерења, су завојно струјање и неравномеран распоред брзина по профили.

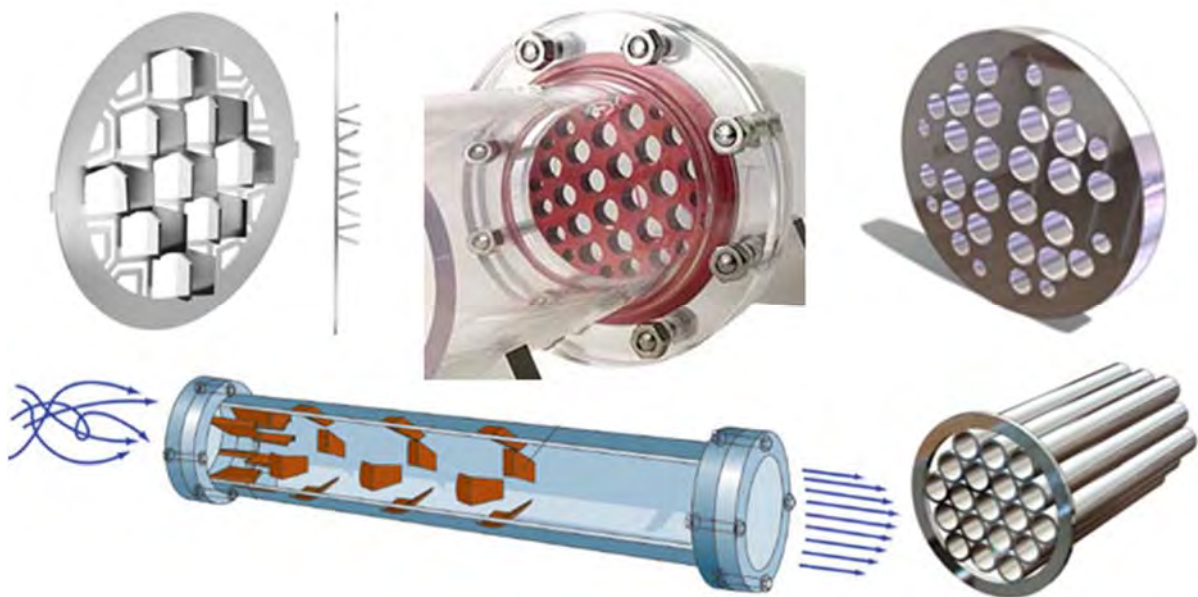
Неправилности у току ће се умањити или потпуно нестати на дугачким деоницама правих цеви као резултат дифузије и турбулентног мешања. Како у реалним радним условима дугачке деонице правих цеви середко могу наћи, потребно је проблем адекватно решити. У литератури се могу наћи разни начини за решавање проблема несиметричног поља брзина у зони мерног места [1, 2] а као један од економичнијих наводи се коришћење кондиционера струјања.

Предмет истраживања овог рада је одабир најповољнијег кондиционера струјања за испитну линију која постоји у Лабораторији за Хидротехнику Грађевинског факултета Београд, његова израда и монтажа, и провера рада кондиционера у лабораторијским условима.

2. Преглед кондиционера струјања у цевоводима

Постоји више типова кондиционера (Слика 1) са различитим утицајима на различите флуиде. Њихова примена [5, 10] зависи од мноштва фактора: типа флуида, мерне опреме и захтеваних услова у којима опрема достиже одговарајућу тачност, конфигурације цеви, проблема у струјном пољу који треба уклонити, итд. У литератури се могу наћи опште смернице за избор најповољнијег кондиционера тока:

- Турбулентне решетке (слика 1, горњи ред), разних типова, се препоручују ако се као флуид користи природан гас или било који чист гас или течност. Једноставне су за уградњу, не захтевају посебан комад цеви али су скопне запушавању ако се користе флуиди са примесима чврстих честица. Веома су ефикасне за „исправљање“ било каквих неправилности у току али је зато на њима велики пад притиска.
- Цевасти и слични ламинатори (слика 1, доле десно) се препоручују ако је потребно уклонити завојно струјање, ефикасни су и у гасовима и у течностима али се не препоручују ако је потребно исправити профил брзина.
- Плочасти мешачи тока (слика 1, доле лево) се препоручују и за чисте гасове и течности као и оне са различитим примесима јер нису склоне зачепљивању због свог специфичног дизајна. Обезбеђују одлично попречно мешање ради уклањања завојног струјања и исправљања профила брзина, такође могуће их је постављати и у коленима. Додатна повољност је мали пад притиска у зони мешача.



Слика 1. Типови кондиционера струјања (први ред: кондиционери типа турбулентних решетки, други ред са лева на десно: плочасти мешач тока, цеваста ламинатор)

Као што се из препорука види, најповољнији за уклањање завојног струјања и исправљање профила брзина, потребних за исправно функционисање мерила протока јесте плочасти мешач тока. Конструкција изабраног кондиционера се базира на производу компаније “Vortab” чије су препоруке за израду, једним делом, дате на интернет страници компаније [11] док су остали подаци током пројектовања и израде усвојени интуитивно.

3. Плочасти мешач тока

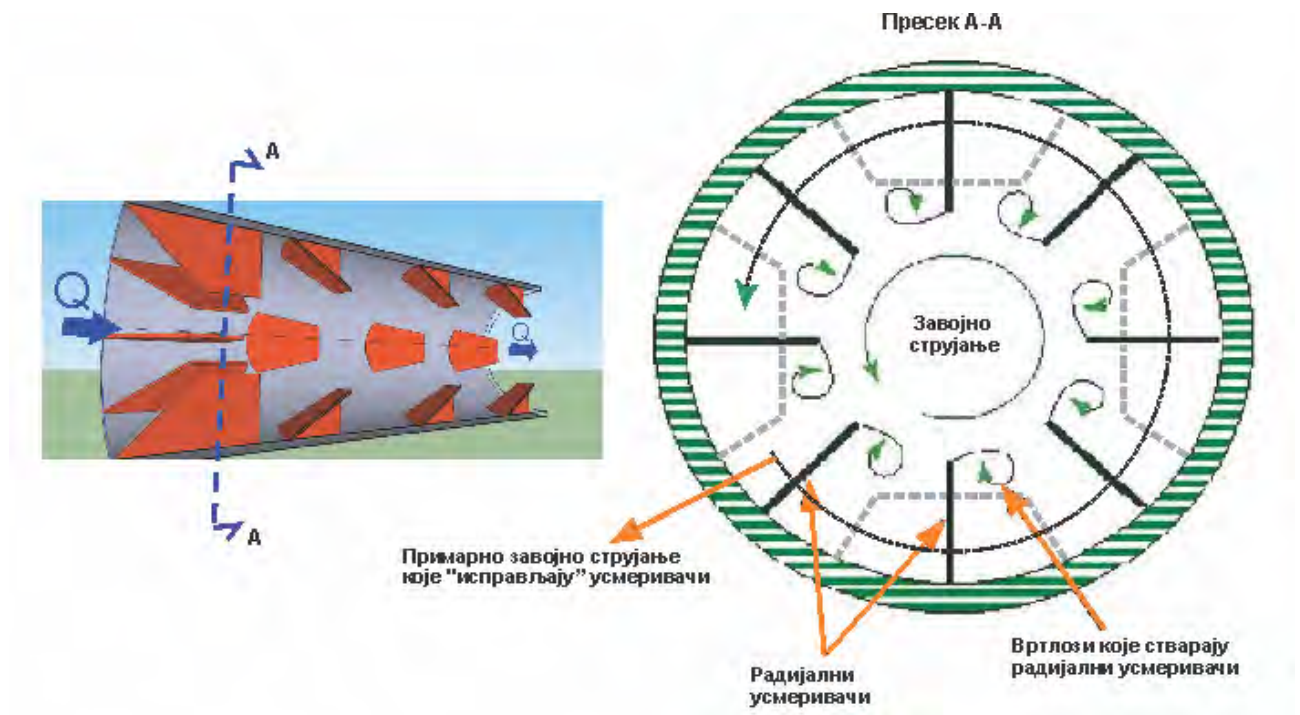
Принцип рада плочастиг мешача тока је да се помоћу низа препрека, плочица постављених на зид цеви, прво поништи завојно струјање а затим уз помоћ изазване секундарне турбуленције утиче на формирање стабилнијег, развијеног турбулентног профила брзина. Тиме се на много краћем растојању постиже стабилизација профила брзина него ако се то препусти самој флуидној струји. Једна од значајних предности овакве конструкције је и мали пад притиска у зони кондиционера као и непостојање препреке која у потпуности затвара профил цеви, као што је то случај са разним турбулентним решеткама или ламинаторима.

3.1 Начин рада

Принцип рада [8] је, као што је већ напоменуто, заснован на систему плочица уграђених у цев. Користе се два типа плочица: 1) радијални усмеривачи и 2) плочасти мешачи

3.1.1 Радијални усмеривачи

Радијални усмеривачи имају улогу да смање завојно струјање. Има укупно осам усмеривача који су равномерно распоређени по обиму цеви на узводном крају кондиционера, тако да су управљени дуж осе цеви (Слика 2).



Слика 2. Принцип рада радијалних усмеривача

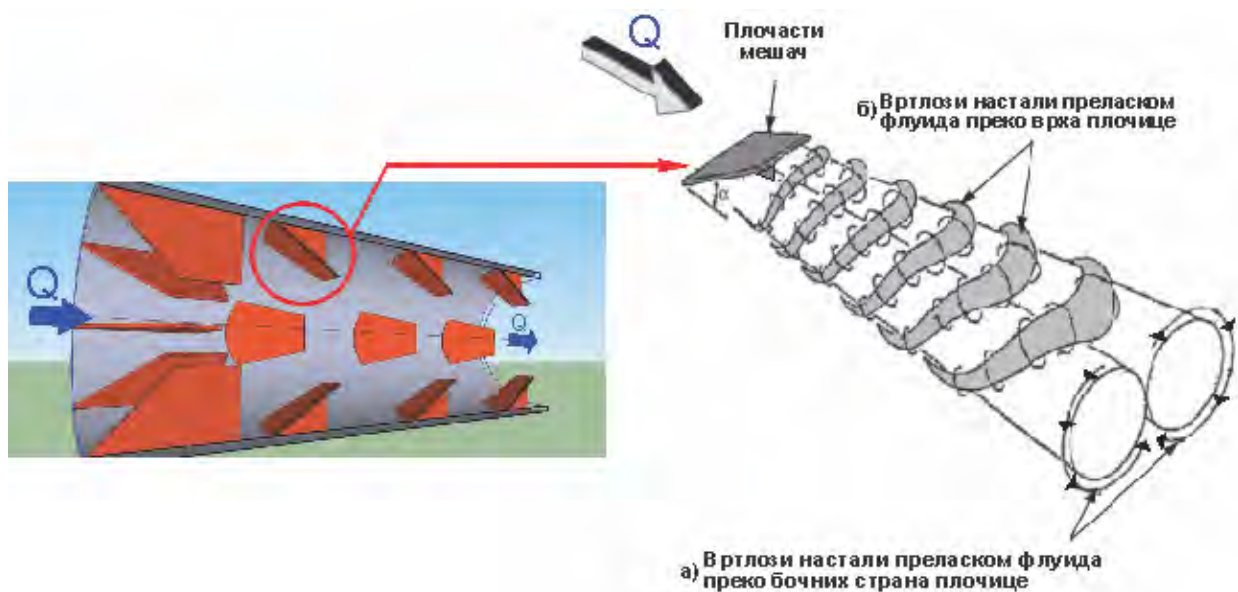
Примарни задатак усмеривача је да улазно завојно струјање флуида „исправи“. Такође, завојно струјање проузрокује генерисање појединачних вртлога на свакој од осам усмеривача са смером ротације супротним од смера ротације главног тока (Слика 2), што доводи до њиховог међусобног поништавања.

3.1.2 Плочасти мешачи

Низводно од радијалних усмеривача постављају се плочасти мешачи. Они својим изгледом и функцијом подсећају на крило авиона. Постављени су у правцу струјања флуида, под одређеним углом на унутрашњи зид цеви, тако да је доња ивица заварена на зид цеви док су бочне и горња ивица „уроњене“ у флуид. Оваквом диспозицијом се обезбеђује двоструко дејство плочастих мешача на флуидну струју:

а) Приликом преласка флуида преко бочних страница плочастог мешача (плочице) генеришу се два вртлога са супротним смером ротације, са сваке стране плочице по један. Оса око које вртлози ротирају је паралелна оси цеви (Слика 3)

б) Приликом преласка флуида преко горње странице (врха) плочастог мешача низводно се стварају тзв. „hairpin“ вртлози (Слика 3). Њихова улога је да флуид који се налази изнад плочице, у непо ремећеној струји, увлаче у зону турбулентног мешања описаног под а) и тако обезбеђују турбулентно мешање по читавом профилу цеви.



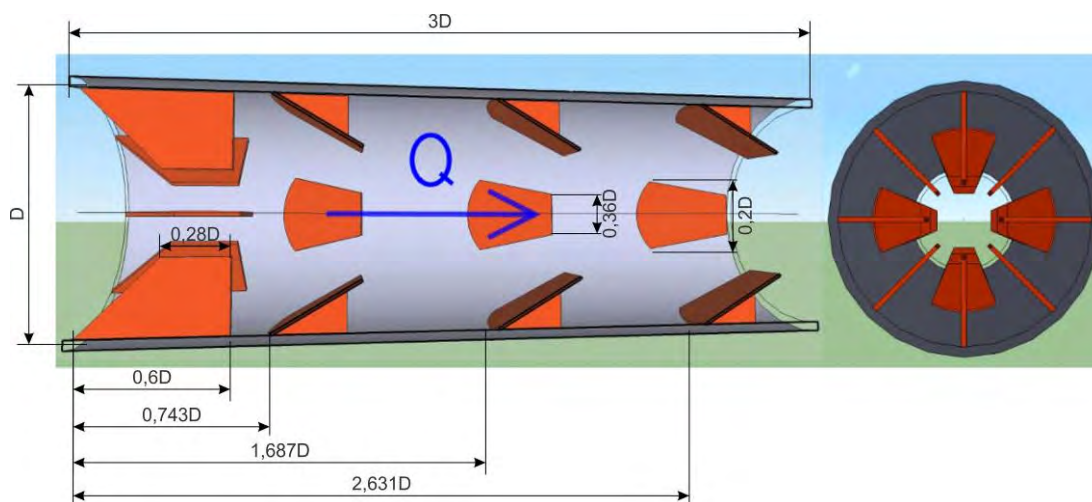
Слика 3. Принцип рада плочастих мешача

Поспешено турбулентно мешање по читавом пресеку цевовода значајно убрзава процес развоја турбулентног, теоријског профила брзина. Зоне мањих брзина се на овај начин мешају са зонама већих брзина што доводи до убрзавања флуида у зонама мањих брзина, односно успоравања флуида у зонама већих брзина.

Коначни резултат дејства плочастог мешача тока, када се комбинује дејство радијалних усмеривача и плочастих мешача, је развијен и симетричан профил брзина без завојног струјања. Тиме се повећава тачност и поновљивост мерног уређаја постављеног низводно од мешача уз минималан пад притиска.

3.2 Конструкција

Плочасти мешач тока се може релативно лако направити у сопственој режији. Могућа су два начина његовог конструисања. Први је да се направе само плочице и усмеривачи, а затим се директно заваре на већ постојећу цев. Ова варијанта се препоручује само ако је цев довољно великог пречника, ради лакшег маневрисања у процесу варења и ако кондиционер треба да трајно остане у цеви. Други начин конструисања је да се направи кружни уметак на који се потом заваре делови кондиционера, што касније омогућава лакше уклањање из цеви без њеног оштећивања. За потребе лабораторијског испитивања направљен је мешач тока као уметак, пречника $D=250\text{ mm}$.

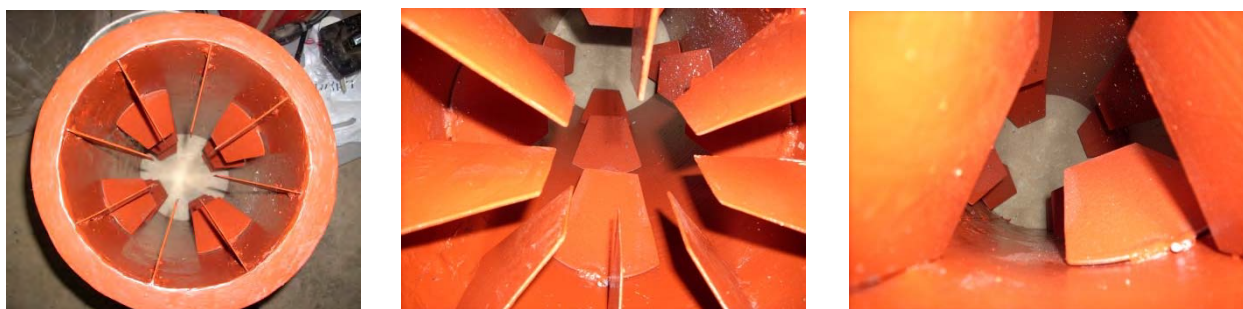


Слика 4. Плочасти мешач тока

Као што је наведено у делу 2.1.1 радијалних усмеривача има укупно осам и равномерно су распоређени по обиму цеви на узводном крају кондиционера. Након њих постављају се, на одређеним растојањима, плочасти мешачи и то у 3 пресека по 4 симетрично распоређена мешача (Слика 4).

Ради лакше визуелизације током конструисања, направљен је прво модел дела плочастог мешача тока у размери 1:1 од картона. Направљен је из практичних разлога, да би се проверили релативни односи димензија плочица а и да би мајстори у радионици видели како треба да изгледа крајњи производ. Направљени су шаблони за сваку плочицу, по којима се секло, да би се избегла неслагања и грешке у димензијама.

Уметак је направљен од лима дебљине 2 mm који је пресом савијен у одговарајући кружни облик, на кога су, на одређеним растојањима, варене плочице. Фотографије плочатог мешача тока у фази израде се могу видети на следећим сликама (Слика 5, Слика 6, Слика 7, Слика 8).



Слика 5. Попречни пресек плочастог мешача тока са детаљнијим погледом на плочице



Слика 7. Плочасти мешач тока направљен као кружни уметак



Слика 6. Кружни уметак у цеви пречника 250mm



Слика 8. Постављена цев са плочастим мешачем тока на инсталацији

4. Метод испитивања и опис инсталације

Испитивања плочастог мешача тока извршена су на лабораторијској инсталацији у Институту за хидротехнику Грађевинског факултета Универзитета у Београду. За потребе експеримента формирана је нова испитна линија.

Мерења профила брзина су подељена у две серије, прва без кондиционера и друга са њим. Мерења су вршена електромагнетном сондом „Логомер 18” (Свет Инструмената, Београд) (Слика 10), пречника $\varnothing 18\text{mm}$, базна дужина 1000 mm . Сонда мери брзину флуида у тачки (односно, у релативно малој мерној запремини) уз осредњавање од 4 секунде. Бележење очитаних брзина вршено је логером DT 800 (DataTacker [13]) (Слика 9), снимањем резултата мерења на пола секунде.



Слика 9. Логер, појачивач излазног сигнала сонде и акумулатор

Поред записивања података логером, вршено је и њихово ручно записивање ради касније провере. Записивано је време када је снимање покренуто и када је прекинуто, максимална као и минимална очитана вредност брзине за сваку серију снимања.

Електромагнетна сонда је увођена у цев кроз уводнице са кугластим вентилима, у 3 правца. Гледајући низ цев у правцу тока воде, увођење је вршено: хоризонтално са леве стране (ознака на каснијим дијаграмима ХЛ), хоризонтално са десне стране (ознака на дијаграмима ХД) и вертикално одозго (ознака на дијаграмима ВО).



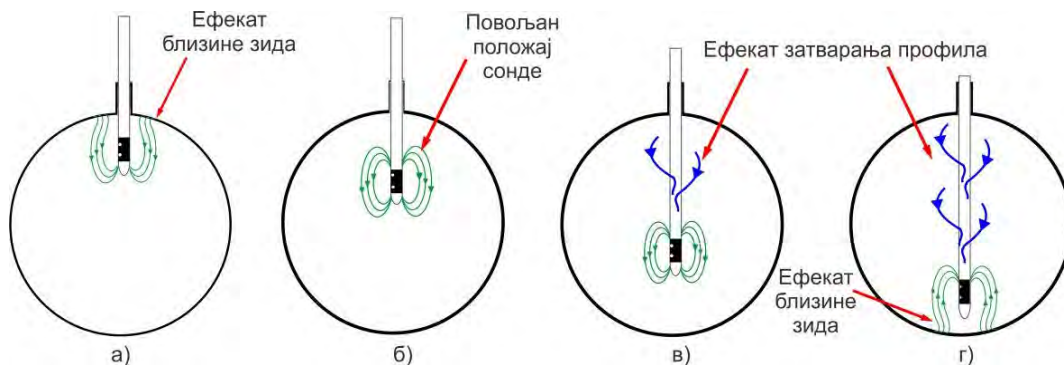
Слика 10. Електромагнетна сонда, положај у цеви вертикални одозго

Мерење у сваком од праваца је вршено при протоку од 70 l/s, у више тачака дуж линије увођења сонде; првих 11 тачака на по 1cm, затим 6 тачака на 2 cm и још 7 тачака по 1cm, укупно у 24 тачке (за сваки од положаја, мерен је распоред брзина сондом од зида до зида цеви). У хоризонталном правцу је, намерно, мерена иста брзина из два правца (са леве и са десне стране) да би се установио и утицај присуства саме сонде на распоред брзина.

У свакој тачки снимане су две компоненте брзине, брзина у правцу осе цеви и брзина нормална на њу (бочна или тангенцијална компонента). Да би се снимила бочна компонента брзине, сонда, која је једнодимензионална, је у свакој тачки ротирана за 90 степени.

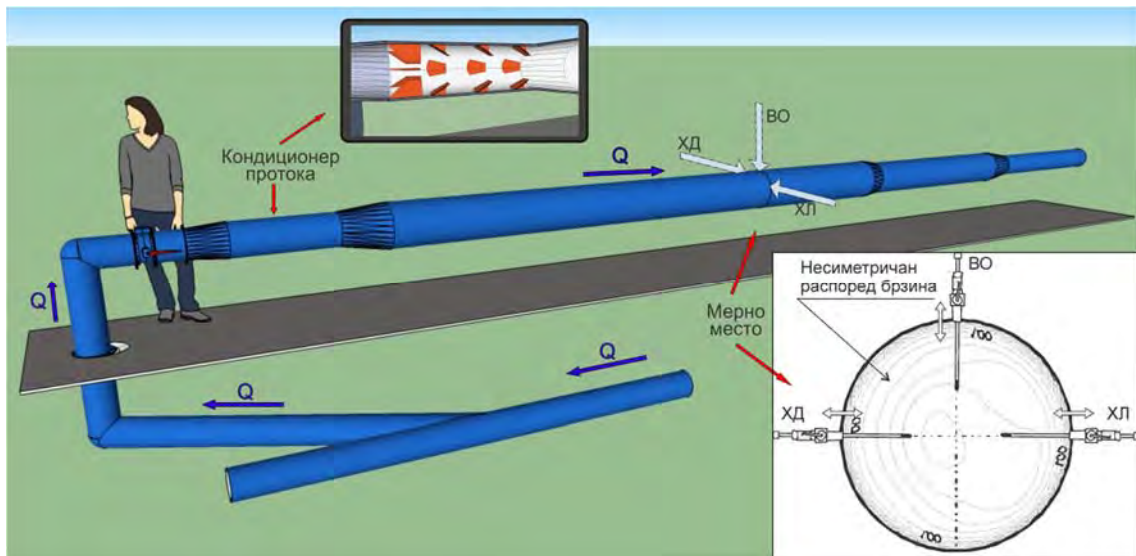
Ранијим испитивањима је утврђено да постоје два ефекта утицаја коришћених електромагнетних сонди на резултате мерења профила брзина у челичним цевоводима: утицај самог зида цевовода на рад сонде и утицај присуства сонде пречника 18 mm на профил брзина [6].

1. Утицај присуства челичног цевовода – близина зида. Док је сонда релативно „плитко“ увучена у цев, она својим присуством не ремети много брзине. Међутим, код челичних цевовода долази до ефекта „крађе“ дела магнетног поља саме сонде (Слика 11-а), које се затвара кроз цевовод и тиме смањује осетљивост сонде. Резултат је да за исту брзину, сонда у близини зида од магнетичног материјала показује мање брзине. Ефекат „крађе“ се одвија и када сонду потпуно увучемо у цев где сада имамо ефекат зида са супротне стране (Слика 11-г).
2. Утицај електромагнетне сонде на мерене брзине – затварање профила. Када се сонда „увуче“ дубље од половине профила, она својим присуством (цилиндар пречника 18 mm) почиње значајно да смањује мерни профил и изазива локално повећање брзина (Слика 11-в и 5-г). Те промене нису директно повезане само са локалним смањењем протицајног пресека цевовода.



Слика 11. Зоне утицаја на мерење профила брзина

На Слика 11 су приказане четири зоне утицаја ЕМ сонда/зид цевовода/профил брзина. Прва зона: значајан утицај зида (Слика 11 5а), очекује се да ће резултати подбацити теоријске вредности. Друга зона: зона повољног положаја (Слика 11б), сонда је довољно удаљена од зида, не ремети се њено магнетно поље и нема значајнијег затварања профила цеви подужним пресеком сонде. Тећа зона: почиње да се осећа утицај затварања профила (Слика 11в). Око сонде постоји локално повећање брзина, услед чега се очекује да ће резултати пребацити теоријске вредности. Четврта зона је и најнеповољнија (Слика 11г) где се мешају утицаји близине зида и затварања профила.

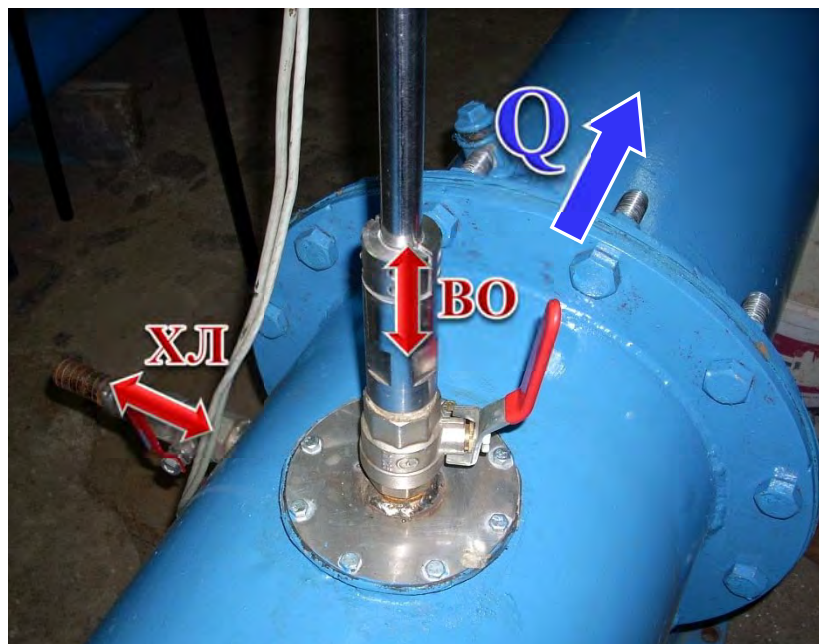


Слика 12. Лабораторијска инсталација са приказом позиције кондиционера протока, мерног места и начином увлачења сонде у цев

На слици 12 приказана је испитна линија. Могу се уочити узроци деформације струјне слике: узводна рачва, два колена и лептирасти вентил DN200. Претходна испитивања мерила на сличној испитној линији указала су да ове 4 везане опструкције току воде стварају поремећај довољног интензитета да утичу на правилно мерење. Посебно у условима када се притвори лептирасти вентил.

Низводно од лептирастог вентила и дифузора налази се комад цеви DN250 у коме се монтира уметак са плочастим мешачем тока. Низводно следи опет дифузор и прелазак на цевовод DN350 на коме се налази мерно место (Слика 12), удаљен $16.4D$ од кондиционера (апсолутно удаљење 4.1 m).

Фотографије лабораторијског модела могу се видети на следећим сликама (Слика 13, Слика 14, Слика 15, Слика 16)



Слика 13. Уводница са кугластим вентилом и монтираном сондом



Слика 14. Узрок деформације струјне слике, прво колено



Слика 15. Узроци деформације струјне слике. Друго колено и лептирасти затварач након кога је цев у коме се смешта плочасти мешач тока



Слика 16. Испитна линија, поглед са низводне стране ка узводној

5. Обрада података са резултатима и дискусијом

Мерењем распореда брзина у изабраним тачкама је добијена велика количина података. Подсећања ради, при увођењу сонде из једног од праваца, снимано је у 24 тачке, у свакој тачки је вршена аквизиција 2min са записивањем података на пола секунде, што значи да је по тачки прикупљено око 240 података а по пролазу скоро 6000 података. Било је потребно направити адекватан алат, тј. написати програм за ефикасну систематизацију и обраду података.

5.1 Обрада податка

Приликом обраде података коришћен је програм „Mathematica“ [13]. На Грађевинском факултету се на студијама учи и примењује програм „MatLab“, који омогућава ефикасну обраду података, међутим што се тиче ефикасне визуализације великог броја података и дијаграма као и њихове систематизације нема повољне ни једноставне функције. Програм као и програмски језик „Mathematica“ је одабран управо због својих невероватних могућности у том домену.

Написана је серија програма, прво за систематизацију података а затим њихову обраду и коначни приказ. За сваки пролаз снимања логер је брзине памтио у једном континуалном низу. Ради анализе било је потребно написати програм који раздваја податке за сваку од тачака као и разврстати брзине по компонентама, тј компоненту у правцу осе цеви и нормалну на њу тј. бочну компоненту. Након систематизације података приступљено је њиховој обради. Написана је функција (Слика 17) која проналази средњу вредност, стандардну девијацију, минималну и максималну вредност као и коефицијент асиметрије за сваки низ.

```
Obrada[uobrada_] :=  
  Module[{srvr, stdev, min, max, koefasimetrije},  
    {srvr = Table[Mean[uobrada[[i]]], {i, 1, Length[uobrada]}],  
    stdev = Table[StandardDeviation[uobrada[[i]]], {i, 1, Length[uobrada]}],  
    min = Table[Min[uobrada[[i]]], {i, 1, Length[uobrada]}],  
    max = Table[Max[uobrada[[i]]], {i, 1, Length[uobrada]}],  
    koefasimetrije = Table[Skewness[uobrada[[i]]], {i, 1, Length[uobrada]}]}
```

Слика 17. Пример функције написане у програмском језику „Mathematica“

Приликом обраде прво су прегледане средње вредности брзина у тачкама. Било је потребно утврдити колико се добро измерене вредности слажу са теоријским профилем. Такође требало је установити потребан степен утицаја коришћене сонде и мерног принципа на брзине у цеви (описано у поглављу 4) пре него што се могло приступити анализи података. Потребне корекције брзине су извршене на основу теоријског профила брзина који је узет као референтни, а поређењем измерених брзина у истим мерним тачкама, при чему им се приступа сондом из два различита правца.

5.1.1 Теоријски профил брзина

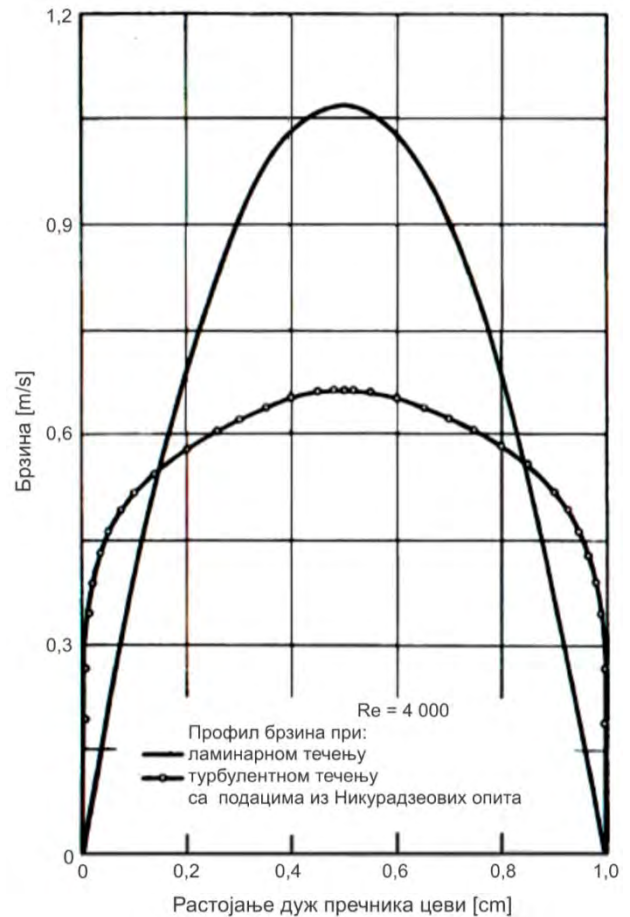
Турбулентно течење се најчешће јавља у пракси и током година је интензивно проучавано, чему су допринела истраживања Никурадзеа, Стентона, Рајхарда и других [4].

Распоред брзина у турбулентном току [4] се веома разликује од распореда брзина у ламинарном току. Поређење ова два типа течења може се видети на слици 18. Тачке означене кружићима на линији турбулентног профила означавају експерименталне податке који су добијени Никурадзеовим лабораторијским истраживањима у цеви пречника 10 mm. Разлика у распоредима је очигледна иако је просечна брзина при једном и другом течењу иста и износи $0,55 \text{ m/s}^1$ при Рејнолдсовом броју 4000. Разлика у односу максималне и средње брзине тока, која у ламинарном течењу износи 0,5 у турбулентном је функција Рејнолдсовог броја и може достићи вредност и преко 0,8.

Облик линије распореда брзина у ламинарном току је издуженији, у односу на распоред у турбулентном току, услед вискозних сила између слојева флуида. Утицај вискозних сила, у ламинарном току, опада како се приближавамо центру попречног пресека цеви и проузрокује да се брзина значајно мења. Међутим када постоји турбуленција, већи део промене брзине се дешава уз сам зид цеви где флуид до неке мере задржава праволинијско паралелно течење. Профил у самом центру је скоро раван, то је област где је течење изразито турбулентно због великих инерцијалних сила које имају утицај на већи део попречног пресека.

Поред опсежних истраживања ни данас није нађена универзална формула која би, као у случају ламинарног течења, могла теоретски добро да опише цео профил брзина. Највећи допринос развоју јединствених формула дао је Прантл.

Прантл је попречни пресек поделио на три зоне утицаја. Предпоставио је да су непосредно уз зид цеви брзине флуида једнаке нули и да у танкој зони уз зид постоји подслој у којем се остварује ламинарно течење. Постојање подслоја је у широкој мери прихваћено мада стварно присуство никада



Слика 18. Упоредба течења у ламинарном и турбулентном режиму

¹ Слика и податак о средњој брзини су преузети из литературе. У ламинарном режиму, у кружној цеви, треба да буде максимална брзина два пута већа од средње брзине, што се са слике баш и не види.

није са довољном поузданошћу доказано. Подела на зоне је следећа: зона I, зона ламинарног подслоја у којој важе услови ламинарног течења, зона II или зона турбулентног течења и зона III или зона „дефицита брзина“ која је и најпроблематичнија, где се вредности коригују према Никурадзеовим експериментално добијеним вредностима.

Течење у ламинарном подслоју (Зона I) прати логаритамски закон расподеле који гласи:

$$u = \frac{u^*}{K} \ln x + c \quad (5.1)$$

Где је:

u - брзина флуида у тачки на неком x растојању од зида

K - коефицијент који су утврдили Прантл и Никурадзе и износи 0,36

u^* - смичућа брзина дефинисана као количник тангенцијалног напона и густине:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (5.2)$$

Формула за течење у турбулентном токум, по Прантлу, је:

$$\frac{u}{u_{max}} = c \left(\frac{x}{D} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (5.3)$$

Где је:

u - брзина флуида у тачки на неком x растојању од зида

u_{max} - максимална брзина у профилу

c - константа

D - пречник цеви

Према [5] дата је препорука универзалне формуле која добро апроксимира цео профил брзина осим у зони „дефицита“ брзина где су вредности кориговане према Никурадзеовим експерименталним вредностима. Формула је изведена за турбулентно течење у глатким цевима али се успешно користи при апроксимацији брзина у храпавим цевима.

$$\frac{V_x}{V_{sr}} = \left(\frac{2x}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{(n+1)(2n+1)}{2n^2} \quad (5.4)$$

Где је:

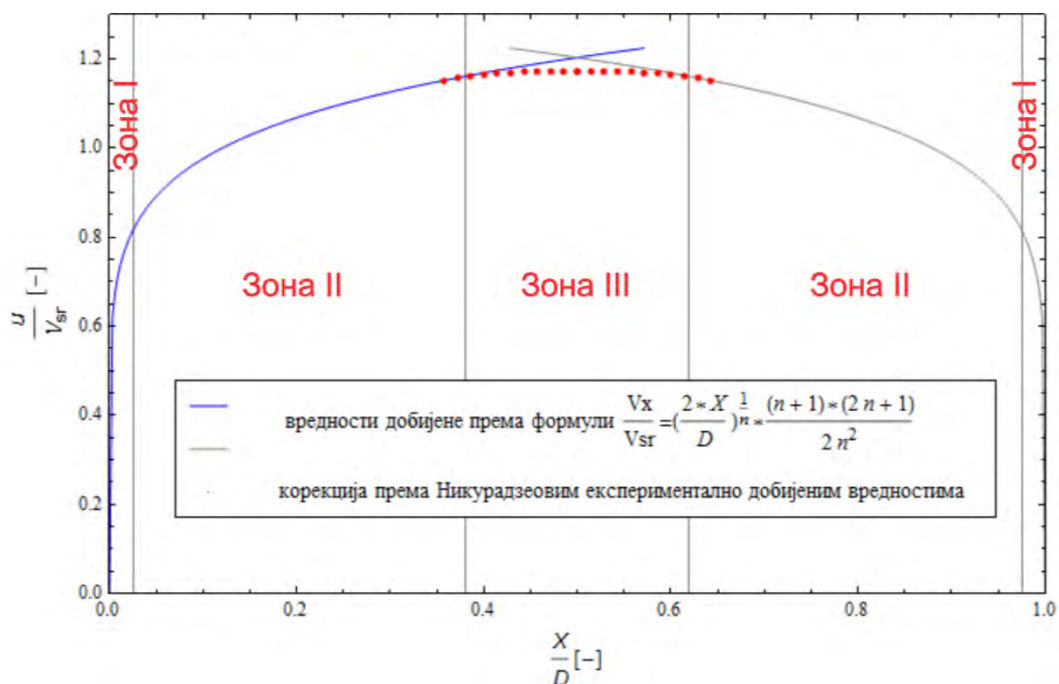
V_x - брзина флуида у тачки на неком x растојању од зида

V_{sr} - средња брзина у профилу, добијена из $V_{sr} = \frac{Q}{A}$

D - пречник цеви

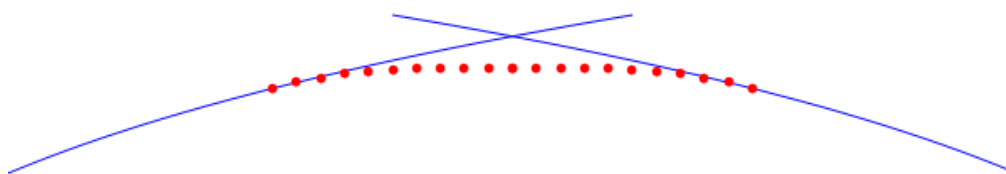
n - константа која зависи од Рејнолдсовог броја Re

Примена формуле може се видети на слици 19.



Слика 19. Добијање теоријског профила брзина

На слици 19, плава пуна линија представља теоријски профил брзина добијен по формули 5.4, док је сива пуна линија одраз у огледалу плаве линије, ако је огледало постављено на оси цеви. Црвене тачке представљају корекцију према Никурадзеовим експерименталним вредностима. На слици 20 може се јасније видети зашто је у зони III потребна корекција профил брзина. Слика представља увећан детаљ слике 19 у централној зони пресека. Према једначини 5.4 како се крива приближава половини попречног пресека формира се свод, као резултат недовољно брзог опадања првог извода криве због чега је потребна корекција у тој зони. Почетак корекције зависи од Рејнолдсовог броја, за веће Рејнолдсове бројеве корекција ће започети раније и обратно.



Слика 20. Корекција профила брзина у Зони III

5.1.2 Фуријеова трансформација и спектрална анализа

Интересантно питање је шта се догађа са снимљеним подацима ако не гледамо само њихове средње вредности већ за сваку тачку гледамо цео снимљени сигнал у времену? Очекивано је да ће у сигналу бити изражен шум, што ће отежати било какву анализу сигнала у временском домену, због тога се разматра и анализа у фреквентном домену. Трансформација сигнала из једног у други домен обавља се преко Фуријеове трансформације.

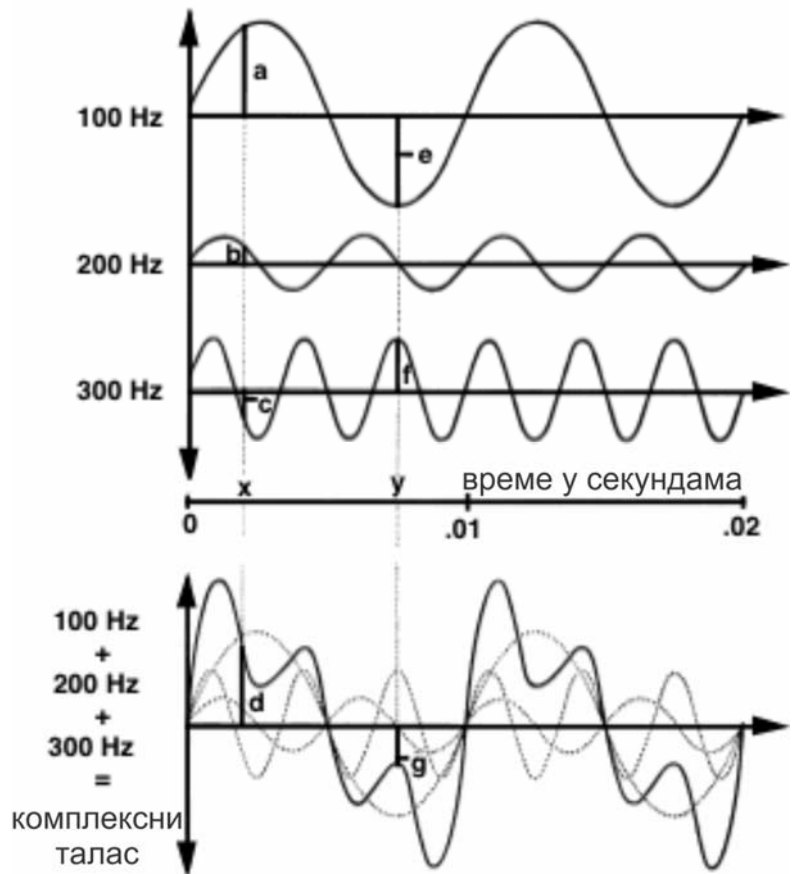
Жозеф Фурије био је француски математичар који је проучавао трансфер топлоте и осцилације. Тврдио је да било који континуални периодични сигнал може бити представљен преко суме

одређених синусоида (синусних или косинусних функција) као што је то приказано на слици 21. Ова тврдња је заснована на самој особини синусоида, односно синусних таласа која се огледа у следећем: ако је улаз у неки систем било каква синусоида, излаз из система ће такође бити синусоида исте фреквенције и облика таласа али различите амплитуде и фазе. Фуријеова тврдња је касније доказана и даље развијана.

Фуријеова трансформација је од великог значаја јер декомпоније сложени сигнал на његове саставне, основне сигнале и приказује у коликој мери сваки од основних сигнала учествује у сложеном сигналу. Учешће сигнала се мери његовом амплитудом и фреквенцијом, односно колико је основни сигнал јак и колико се пута понавља у јединичном временском интервалу у оквиру сложеног сигнала.

Ако се предпостави да је турбулентни ток збир вртлога различитих периода, који путују кроз цев средњом брзином, и ако континуално меримо брзину у једној тачки, тада Фуријеовом трансформацијом мерене брзине кроз време разлажемо ту брзину на основне турбулентне вртлоге који га сачињавају.

Снимљене брзине у једној тачки, кроз време, имају изражен стохастички карактер. Фуријеова трансформација оваквих сигнала је процес који је веома сложен и превазилази опсег дипломског рада, тако да овде неће бити детаљније обрађиван. Поступак је одлично описан у литератури [7] а за потребе рада је коришћена функција „Fourier“ у програму „Mathematica“. Да би се користила ова функција, обављена је припрема сигнала за трансформацију према следећем:



Слика 21. Основни принцип Фуријеове трансформације

- Обрађиване су само флукутације брзина, односно све измерене вредности су умањене за средњу вредност низа
- Да би се уклонио утицај апсолутних вредности брзина, односно да би се упоредиле саме релативне вредности интензитета флукутација без и са ламином, флукутације брзина су нормиране, односно, подељене са средњом брзином.
- Како се користи FFT (Fast Fourier Transformation) који захтева да број улазних величина буде 2^n , измерена серија је допуњена са нулама са леве и десне стране, симетрично. Пре тога, примењен је и косинусни филтер, којим се „заобљавају“ почетак и крај временске серије.

Резултат свих ових припремних радњи је смањење утицаја „коначности“ временске серије на резултате фуријеове трансформације.

- Након примене FFT-а, израчуната је само магнитуда комплексног резултата, као и одбачена друга половина серије која је једнака првој половини (у огледалу).
- Добијена серија је осредњена, предпостављајући да је процес ергодичан.
- На крају, израчуната је средња снага сигнала тако што су апсолутне вредности добијених фреквенција квадриране.

5.2 Резултати и дискусија

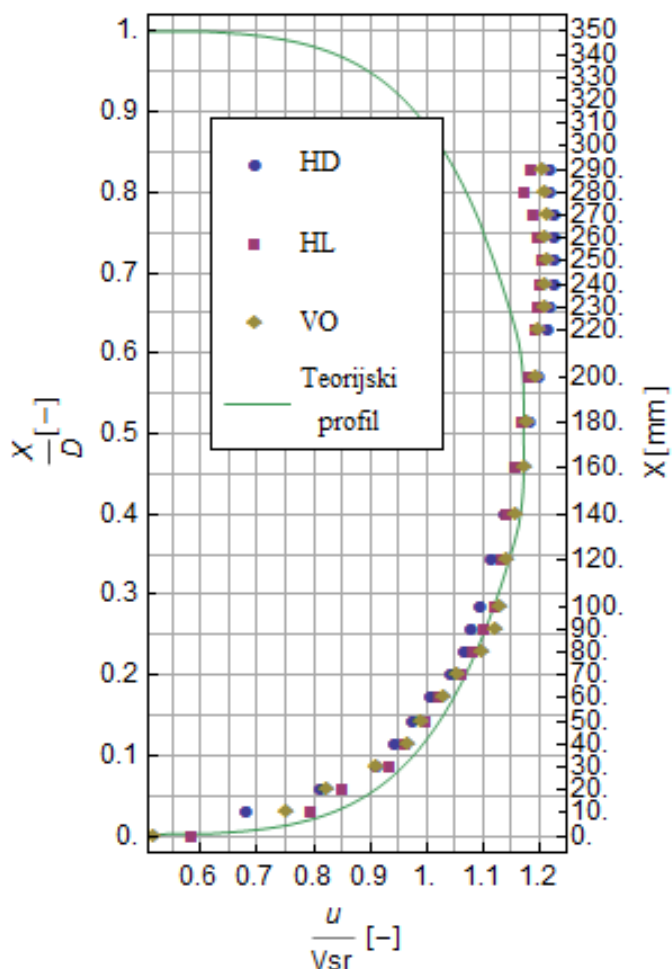
5.2.1 Утицај сонде на профил брзина

Добијени „сирови“ резултати (без уклањања ефеката сонде) дати су на слици 22. На дијаграмима су представљене средње вредности брзина очитаних у појединим тачкама при различитим начинима увлачења сонде у цев (у делу 4 су објашњене ознаке на дијаграмима). Мерење је извршено са присуством кондиционера тока у цеви када се очекује да је профил брзина симетричан.

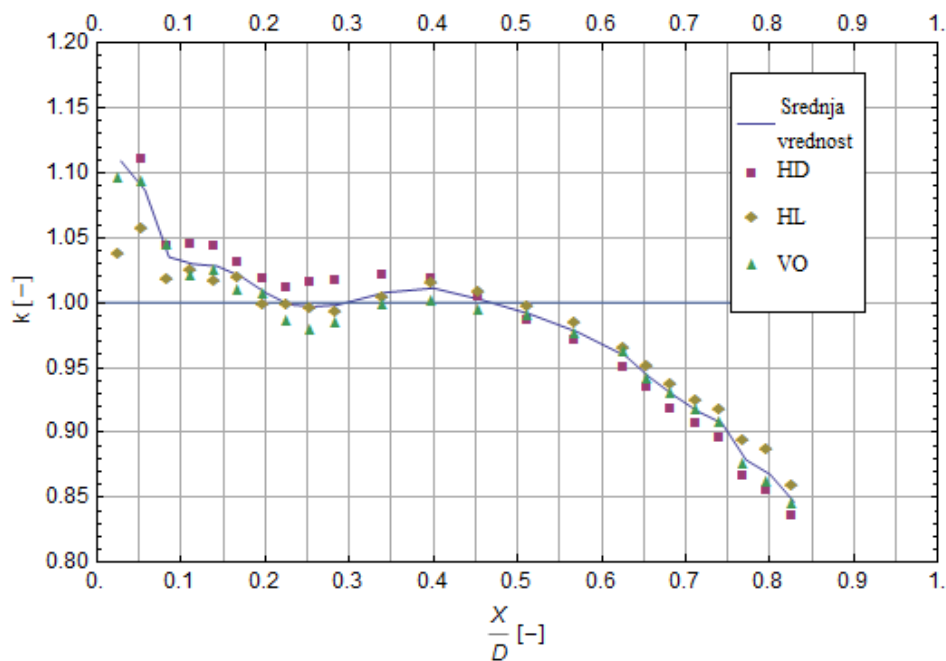
Уочава се јасно да измерене брзине подбацују до неких 30% D , добро прате теоријски профил брзина у зони од 30% D до неких 60% D и затим да до коначно могуће дубине уласка сонде у цевовод имају пребацивање теоријске брзине. Како су се почетне претпоставке о зонама утицаја електромагнетне сонде на мерене вредности брзина потврдиле, може се кориговати профила брзина.

Под претпоставком да важи теоријски распоред брзина, корекција профила брзина је представљена као однос теоријске брзине и осредњене брзине у тачки. Брзине су осредњене по профилу јер на брзине утиче увученост сонде, без обзира са које стране се увлачење изврши, тако да ће се корекције извршити према средњој вредности брзина из свих праваца мерења. Као референтне су узете брзине измерене са присуством плочастог мешача тока у цеви, јер се очекује да су тачније.

Дијаграм корекционих фактора за сваку од тачака дат је на слици 23. Са овим вредностима се множе сирове мерене вредности брзина. Напомиње се да добијени корекциони фактори важе само за испитивани однос пречника цеви и сонде 350mm/18mm.



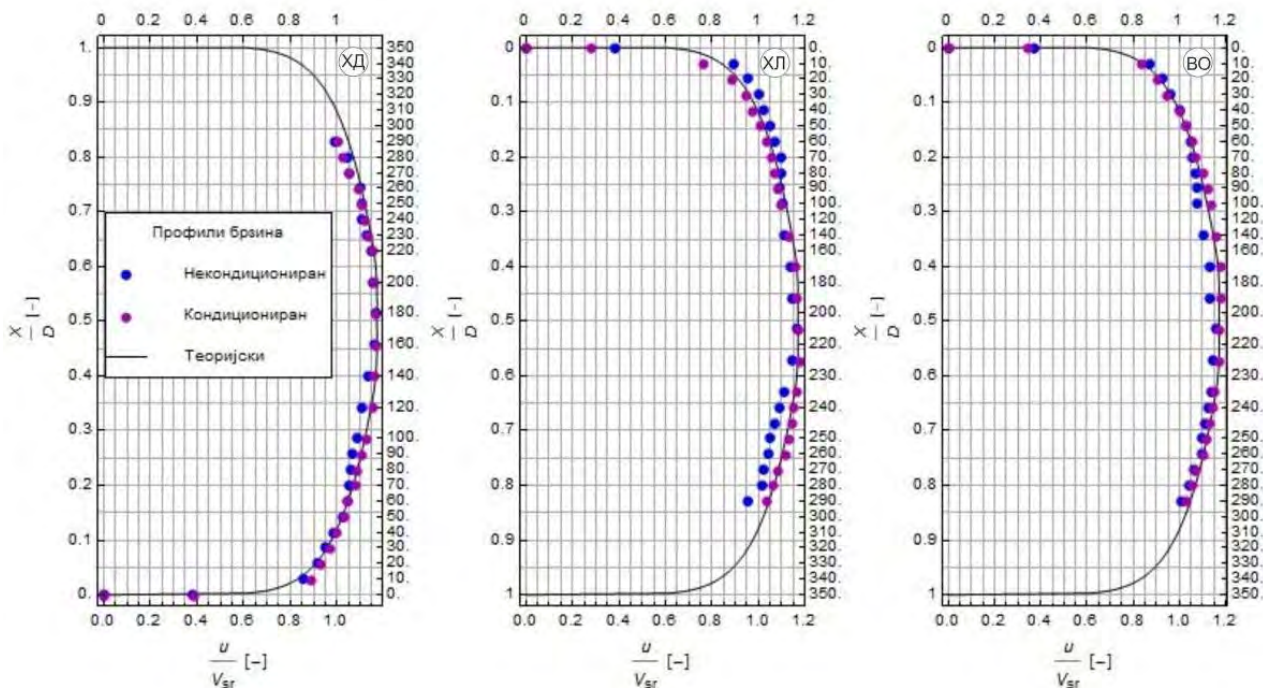
Слика 22. Дијаграм профила брзина за различите начине увлачења сонде у цев, са плочастим мешачем тока у цеви



Слика 23. Корекциони фактори за сваку од тачака, за однос пречника цеви и сонде 350mm/18mm

5.2.2 Профил брзина

Након одређивања корекционних фактора приступљено је корекцији измерених резултата. На слици 24 су приказане кориговане вредности брзина. Плаве тачке представљају вредности брзина без присуства кондиционера а љубичасте тачке су брзине са присуством кондиционера у цеви. Пуном линијом је означен теоријски профил брзина.



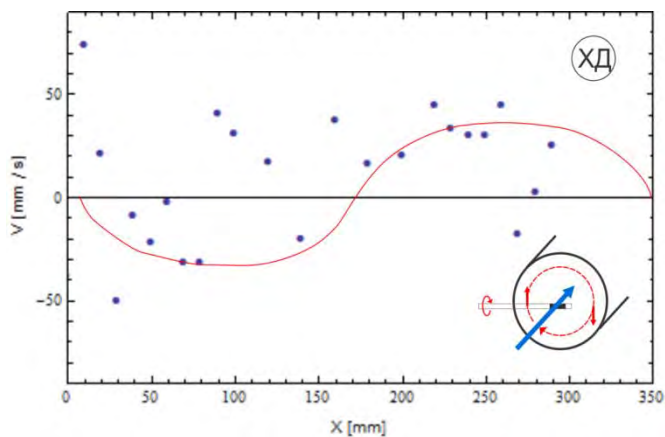
Слика 24. . Дијаграми коригованог профила брзина за различите начине увлачења сонде у цев (уклоњен утицај увучености сонде)

Може се видети да брзине са кондиционером много боље прате теоријски распоред брзина док брзине без кондиционера негде пребацују а негде подбацују вредности теорисјких брзина.

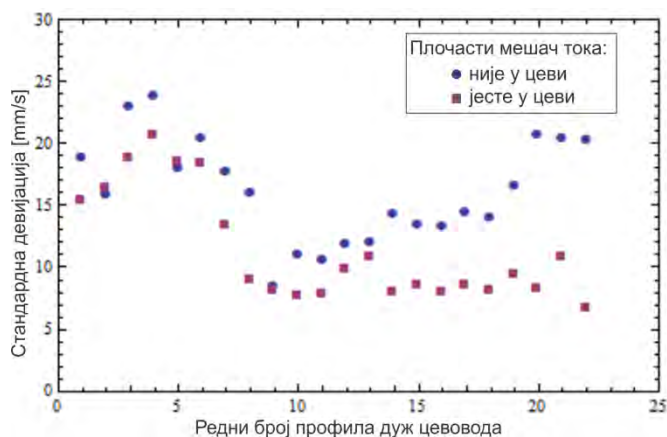
5.2.3 Бочна (тангенцијална) компонента брзине

Добијени резултати мерења бочне (тангенцијалне) компоненте брзине се могу видети на слици 25. Плаве тачке представљају средње вредности брзина снимљене у тачки попречног пресека (без присуства кондиционера тока), док је пуном црвеном линијом означена претпоставка како би требало да изгледа распоред бочне компоненте брзине услед присуства завојног струјања. Очекивано је да ће до половине попречног пресека брзине бити углавном негативне док ће са друге стране бити позитивне, због саме природе завојног струјања (Слика 25, детаљ у доњем десном углу). Измерени подаци се не слажу баш најбоље са претпоставком (црвена линија на слици) јер бочне компоненте брзине имају мале вредности (око 30 - 40 mm/s) па измерени сигнал има доста шума.

На слици 26 је приказана стандардна девијација бочне компоненте без кондиционера и са кондиционером приликом увлачења сонде хоризонтално са десне стране. Очигледно је смањење одступања бочних брзина након уградње кондиционера што указује на смањење вртложног тока, а тиме и на побољшање општих услова струјања низводно од кондиционера. Било би добро да се посвети посебна пажња овој врсти мерења, како би се још боље сагледао утицај кондиционера.



Слика 25. Средње вредности бочне компоненте брзине, снимљена приликом увлачења сонде ХД

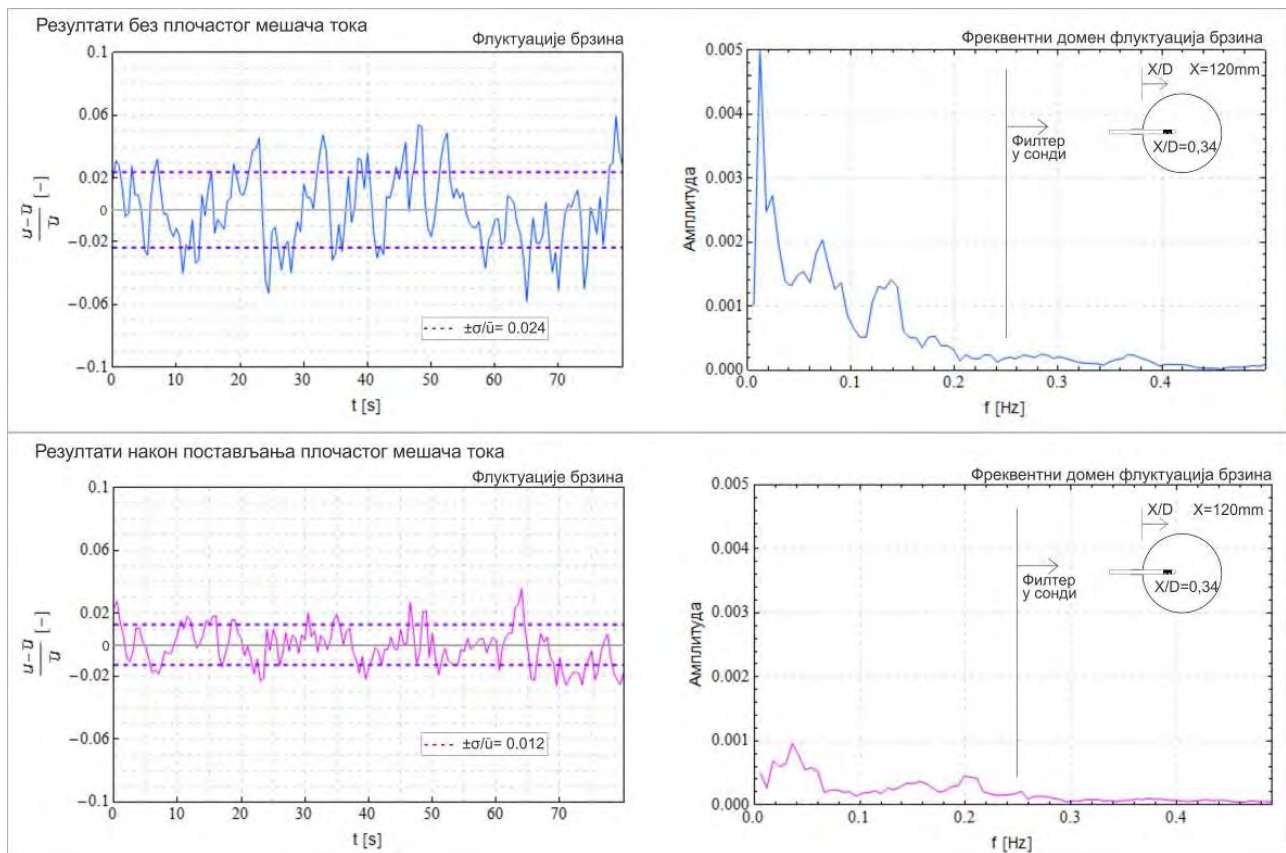


Слика 26. Стандардне девијације бочне компоненте брзине, снимљена приликом увлачења сонде ХД

5.2.4 Турбулентне карактеристике тока

За потребе анализе турбулентних карактеристика тока анализирани су временске серије измерених величина. На почетку је примећено неколико серија, које нису даље узете у разматрање, на којима су присутна велика и нагла одступања од средње вредности. То је уочено код података снимљених у вертикалном правцу при самом врху цеви и вероватно је проузроковано увученим ваздухом. .

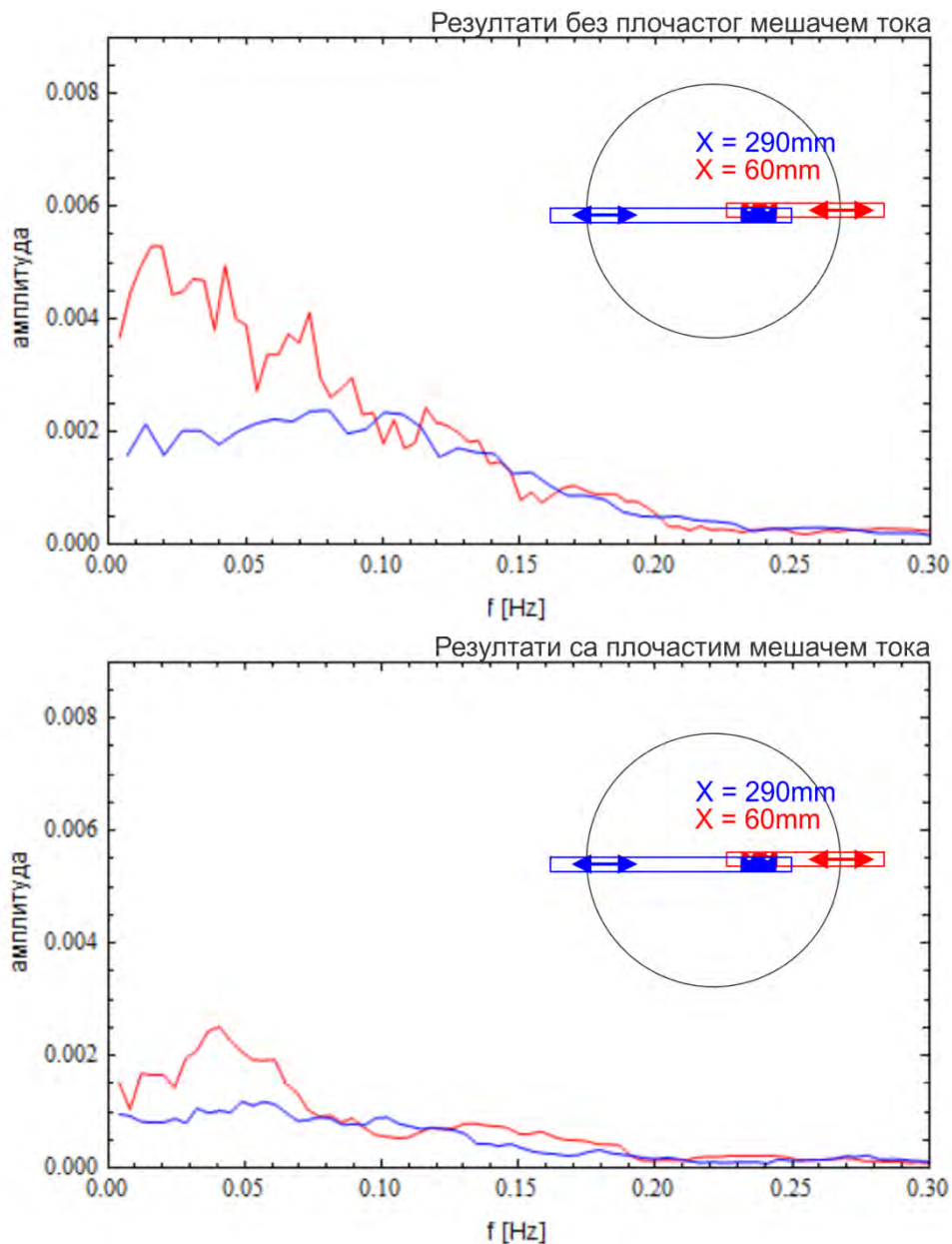
Ефекат кондиционера се може видети на слици 27, где су приказане две временске серије флукуација брзина снимљене у истим тачкама, са и без кондиционера (леви део слике). У случају без кондиционера, види се да постоји нешто већи однос „Peak-to-Peak“ као и постојање нешто нижих фреквенција у сигналу. Стандардна девијација (ниво турбуленције) је нижа са кондиционером.



Слика 27. Анализа турбуленције у тачки $X/D=0.34$ за правац ХД

На слици 27 десно, приказане су фреквентне карактеристике временске серије, односно расподела енергије тока по величини вртлога, за једну мерну тачку. У случају без кондиционера (Слика 27, десно, горе), види се постојање значајнијих већих вртлога (опсег ниже фреквенције на дијаграму). Стављањем кондиционера, примећује се (Слика 27, десно, доле) да је плочасти мешач извршио прераспodelу вртложених карактеристика тока у зону виших фреквенција поделом већих вртлога на већи број мањих вртлога.

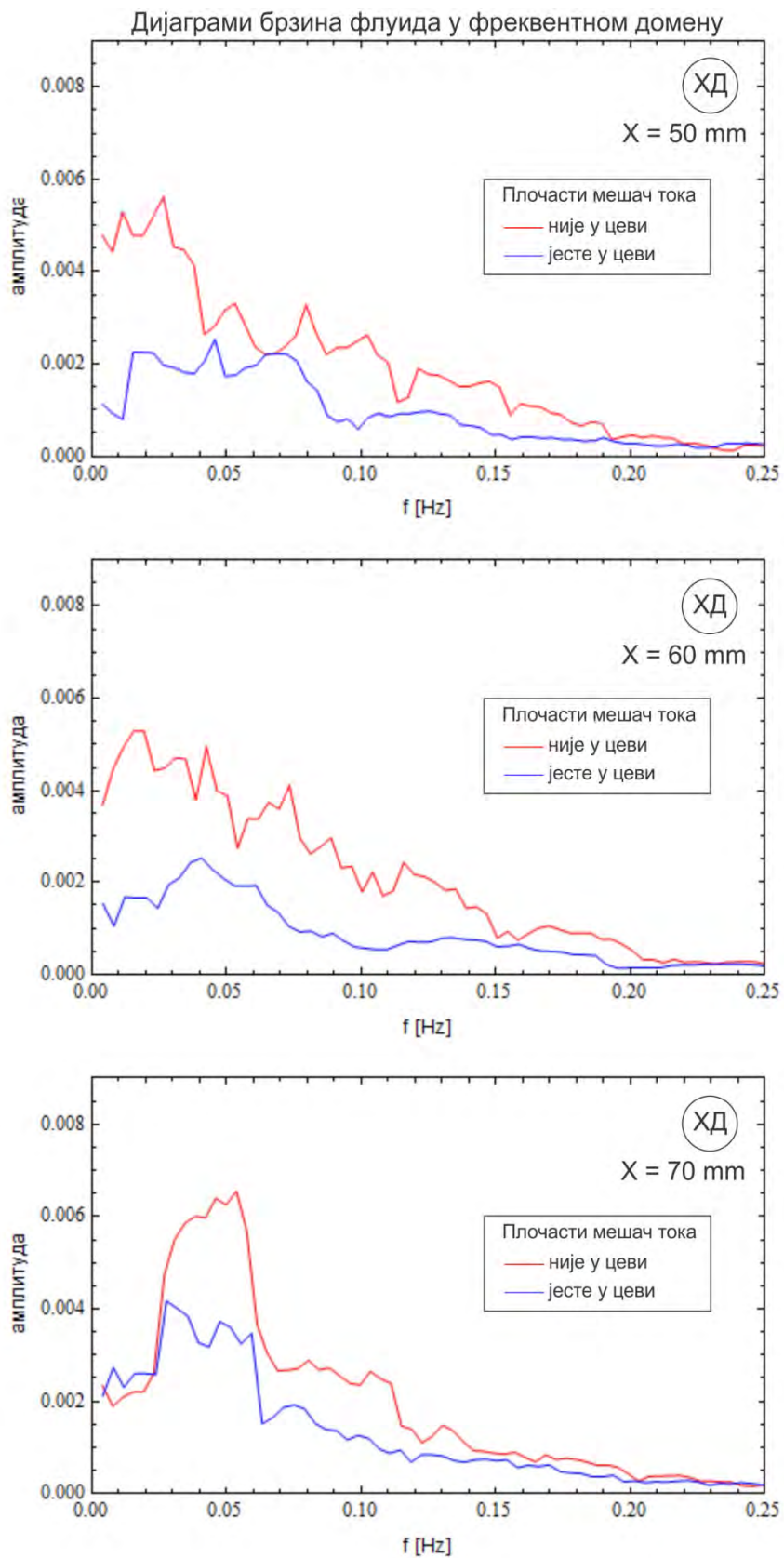
Анализирајући дијаграме (Слика 27), треба имати на уму да сама коришћена електромагнетна сонда има уграђен филтер нископропусник са временском константом од 4 секунде. Због тога на спектралним дијаграмима и није могуће видети мање вртлоге. У даљем приказу података у фреквентном домену, фреквенције ће бити приказиване до вредности од 0,25-0,30 Hz.



Слика 28. Тачка снимана приликом хоризонталног увлачења сонде из два правца, хоризонтално са леве и хоризонтално са десне стране

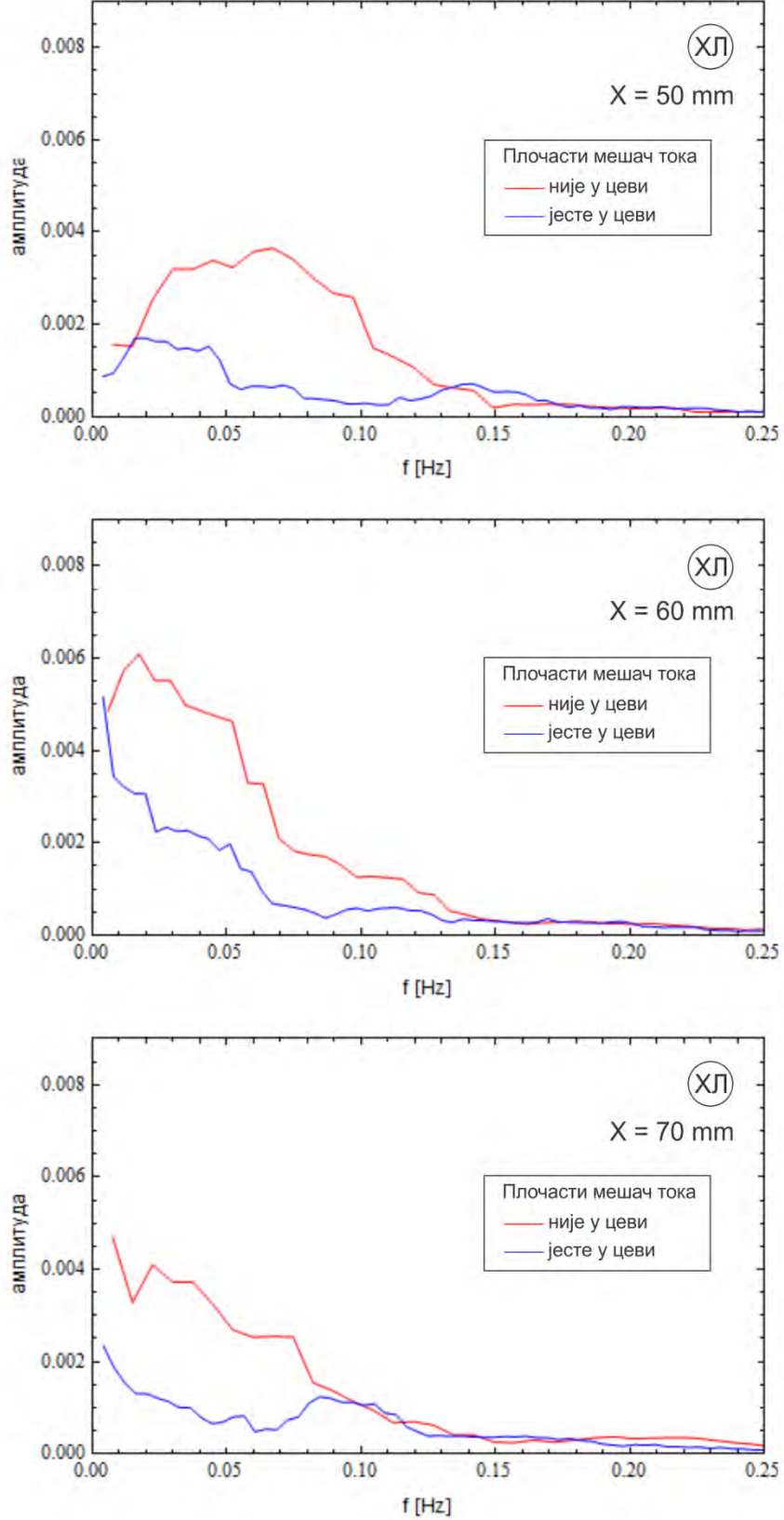
У хоризонталном правцу, приликом увлачења са леве и са десне стране, измерене су брзине у неколико тачака које се преклапају. На Слика 28 могу се видети резултати снимања у тачки измереној за увученост сонде $X = 60 \text{ mm}$ са десне стране (црвена линија на дијаграму) и $X = 290 \text{ mm}$ са леве стране (плава линија на дијаграму). На дијаграмима се примећује да сама сонда својим присуством у цеви приликом већих увучености ремети течење и разбија део вртлога, иста ситуација је и са плочастим мешачем тока у цеви.

На следећим сликама (Слика 29, Слика 30, Слика 31) приказан је ефекат кондиционера у три тачке за сва три правца увлачења сонде, редом хоризонтално са десне стране, хоризонтално са леве стране и вертикално одозгоре. Тачке су одабране тако да је сонда довољно удаљена од зида и довољно плитко увучена да би се њен утицај свео на минимум.



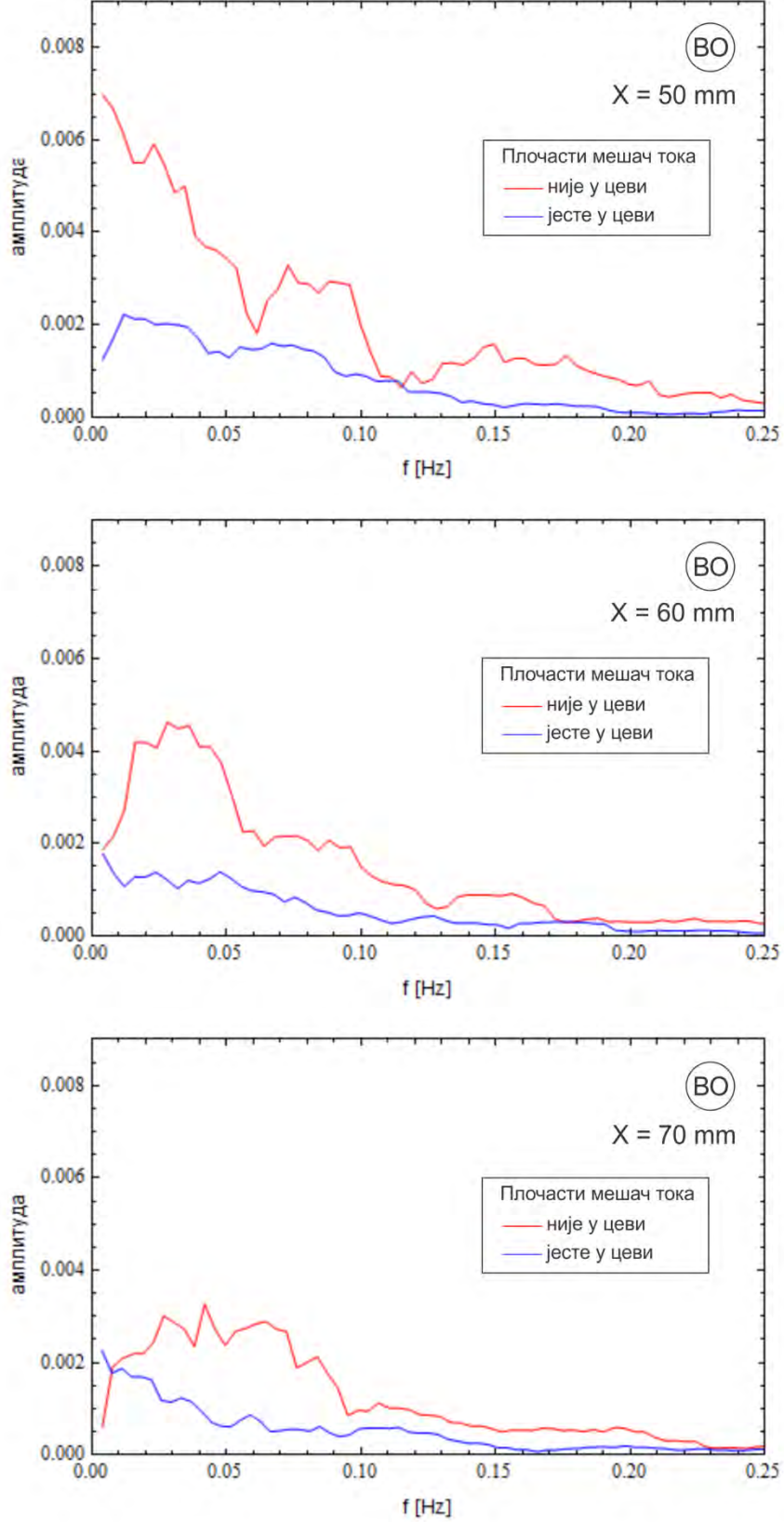
Слика 29. Упоредивање брзина у фреквентном домену за случајеве када плочасти мешач тока јесте у цеви и када није у цеви, у три различите тачке. Положај увлачења сонде хоризонтално са десне стране

Дијаграми брзина флуида у фреквентном домену



Слика 30. Упоредивање брзина у фреквентном домену за случајеве када плочасти мешач тока јесте у цеви и када није у цеви, у три различите тачке. Положај увлачења сонде хоризонтално са леве стране

Дијаграми брзина флуида у фреквентном домену



Слика 31. Упоредивање брзина у фреквентном домену за случајеве када плочасти мешач тока јесте у цеви и када није у цеви, у три различите тачке. Положај увлачења сонде вертикално одозго

6. Закључак

На основу претходно приказаних резултата и њиховог разматрања, недвосмислено се потврђује да плочасти мешач флуида, као кондиционер струјања, има способност да умири поремећену струјну слику са израженим великим вртлогом. То подразумева да се добије струјање које карактерише приближно стабилан развијен профил брзина у турбулентном режиму течења и то на краћој дужини цевовода него да се умирење препусти самом току. Тиме се омогућава да се мерење протока и на неповољним позицијама врши мерним методама и мерним уређајима који, иако у нижој ценовној категорији, постижу захтевану тачност мерења.

Неколико важних закључака се може донети из испитивања на лабораторијској инсталацији:

- Изабрана мерна деоница која је 16.4 D удаљена од поремећаја је „релативно“ добра и без кондиционера, па нису добијени довољно упечатљиви резултати. Боље би било да су мерења извршена у попречном профилу ближем поремећају.
- Утицај коришћене сонде на струјно поље је било истог или нешто већег реда величине као ефекат кондиционера на струјно поље. Из обављених мерења је добијено да су брзине у мерном профилу „симетричније“ и да више одговарају теоријском профилу, али није могуће са већом поузданошћу то квантификовати.
- Измерена бочна компонента је квалитативно указала на постојање завојног струјања и повољан утицај кондиционера на ток. Због утицаја саме сонде и њених карактеристика, није могуће добијене резултате квантификовати. За даља истраживања потребно је обратити посебну пажњу на мерења мањих брзина.
- Коришћена сонда не може да мери флукуације брзина испод 4 секунда, те не омогућава увид у садржај енергије малих вртлога.

На жалост, осим одабира ближе локације за нека будућа мерења, Институту за хидротехнику и водносколошко инжењерство, на Грађевинском факултету Универзитета у Београду не поседује тренутно бољу опрему за мерење распореда брзина у води, без поремећаја тока. Ако се укаже могућност да се мерења обаве применом ласер доплер технике или PIV (Particle Image Velocimetry), биће могуће унапредити ова мерења и обавити јасну квантификацију ефеката кондиционера на струјање.

Захвалност

Аутори се захваљују Министарству просвете и науке, под чијим се финансирањем одвија научни пројекат TR37010, Системи за одвођење кишних вода као део урбане и саобраћајне инфраструктуре”, у оквиру кога је извршено истраживање приказано у овом раду.

Литература

1. R.W. Miller (1983.) Flow Measurement Handbook, McGrawHill Book Company.
2. Д.Продановић, Мерења у хидротехници, скрипте са предавања, расположиве на Интернет локацији
3. http://www.hikom.grf.bg.ac.rs/web_stranice/KatZaHidr/Predmeti/Merenja/Literatura/Skripta/Tekst/Skripta.html
4. J.G. Kundsten, D.L. Katz (1958) Fluid DYNAMIC and Heat Transfer, Mc Graw-Hill, New York
5. C.J. Bernard (1988), Handbook of fluid flowmetering, The Trade and Tehnical Press Limited, England
6. Д.Продановић (2007.) Механика флуида за студенте грађевинског факултета, Грађевински факултет Универзитета у Београду
7. S. W. Smith (), The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing
8. P. D. Baker (2007.) Effect of Flow Conditioning on Liquid Measurement, Class #2120, предавање на Оклахома универзитету, САД, у оквиру International School of Hydrocarbon Measurements, pdf датотека, Интернет.
9. Д.Илић (1999.) Експериментално истраживање профила брзина у приближно идеалним мерним условима, дипломски рад, Грађевински факултет Универзитета у Београду
10. <http://www.ceasiamag.com/article/flow-conditioners/2007>, Интернет линк ка часопису Control Engineering Asia, China, чланак Flow Conditioners, аутор Don Lundberg, октобар 2006.
11. <http://www.vortab.com>, Интернет адреса компаније Vortab, произвођача кондиционера тока.
12. http://www.lontek.com.au/datataker/data_loggers/datataker_dt800_data_logger.htm, Интернет линк ка спецификацијама коришћеног логера
13. <http://www.wolfram.com/>, Интернет линк ка званичној страници програма „Mathematica“