

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření proudového pole za překážkou pomocí laserové anemometrie
(metodou PIV)

Autor: **Michal Tomášek**
Vedoucí práce: **Ing. David Lávička, Ph.D.**

Akademický rok 2014/2015

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Davidovi Lávičkovi Ph.D. za podněty, ochotu a trpělivost. Současně děkuji své rodině, která mě podporuje při studiu.

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne 20.6.2015

.....

Obsah

1 Úvod	1
1.1 Motivace	1
2 Deformace a materiály distanční mřížky	2
2.1 Jaderný reaktor	2
2.2 Distanční mřížka	2
2.2.1 Deformace palivové tyče	3
2.2.2 Materiál mřížky	5
2.2.3 Slitina zirkonia (zircalloy-4)	5
2.2.4 Inconel	6
2.2.5 Korozi-vzdorná ocel	7
3 Distanční mřížky	8
3.1 Vznik turbulentního proudění	8
3.2 Distanční mřížky	8
3.2.1 Mřížka s mísící lopatkou	8
3.2.2 Vajíčková distanční mřížka	9
3.2.3 Distanční mřížka ve tvaru vajíčka s mísícími lopatkami	9
3.2.4 Mřížka s vodorovnými pásy	10
3.2.5 Distanční mřížka U.S 4726926	10
3.3 Návrh distanční mřížky	11
3.4 Výroba distanční mřížky s mísícími lopatkami a otvory	12
3.5 Výrobní problémy distančních mřížek	13
4 Experimentální měření	15
4.1 Základní princip metody PIV	15
4.1.1 Záznam PIV	15
4.2 Experimentální zařízení a příprava	16
4.2.1 Nastavení stativu pro kameru	17
4.2.2 Ustavení laseru	17
4.2.3 Eliminace odlesku	18
4.2.4 Zakrytování	18
4.2.5 Sycení vody	18
4.2.6 Ustavení palivové tyče	19
4.3 Použitá aparatura	20
4.3.1 FlowSense 4M snímač	20
4.3.2 Laser Solo - 200TX	20
4.3.3 Podmínky při experimentálním měření	21
4.4 DynamicStudio	21

4.4.1	Kalibrace kamery a zaostření	21
4.4.2	Měření	22
4.5	Limity PIV	24
4.5.1	Ztracené páry	24
4.5.2	Rychlostní gradienty	24
5	Výsledky	26
5.1	Vyvinutí profilu po délce palivové tyče, pozice 1	27
5.1.1	Distanční mřížka (VAR 1)	27
5.1.2	Distanční mřížka s lopatkami (VAR 2)	28
5.1.3	Distanční mřížka s lopatkami a otvory (VAR 3)	28
5.2	Vyvinutí profilu po délce palivové tyče, pozice 2	29
5.2.1	Distanční mřížka (VAR 1)	29
5.2.2	Distanční mřížka s lopatkami (VAR 2)	29
5.2.3	Distanční mřížka s lopatkami a otvory (VAR 3)	31
5.3	Vzájemné porovnání distančních mřížek	31
5.3.1	Porovnání distančních mřížek, pozice 1	31
5.3.2	Porovnání distančních mřížek, pozice 2	32
5.4	Výsledné zhodnocení	33
6	Závěr	34
6.1	Závěrečné shrnutí	34
A	Seznam použitých zkratk	38
B	Výrobní výkresy	39
C	DynamicStudio	43
D	Experimentální zařízení a rychlostní profily	45
E	Obsah přiloženého CD	52

Seznam obrázků

1	Konstrukce distanční mřížky k zamezení pootáčení [8]	4
2	Mřížka s mísíci lopatkami Westinghouse [10]	8
3	Vajíčková distanční mřížka [7]	9
4	Půdorys distanční mřížky zamezující pootáčení [8]	10
5	Distanční mřížka [9]	11
6	Skličidlo pro výrobu distanční mřížky	12
7	Distanční mřížky v rozvinutém stavu	13
8	Distanční mřížka s mísíci lopatkami po pájení	14
9	Základní uspořádání [12]	15
10	Schéma uložení laseru v pomocném rámu	17
11	Ustavení kamery a laseru	18
12	Vzájemné uložení palivové tyče s distanční mřížkou v trubici	19
13	CCD senzor [12]	20
14	Kalibrace kamery s CCD čipem	22
15	Aplikace funkce "maska" na pořízený snímek	23
16	Nastavení adaptivní korelace	24
17	Rychlostní pole distanční mřížky v pozici 2	25
18	Měřicí roviny	26
19	Rychlostní profily VAR 1 pro pozici 1	27
20	Rychlostní profily VAR 2 pro pozici 1	28
21	Rychlostní profily VAR 3 pro pozici 1	29
22	Rychlostní profily VAR 1 pro pozici 2	30
23	Rychlostní profily VAR 2 pro pozici 2	30
24	Rychlostní profily VAR 3 pro pozici 2	31
25	Rychlostní profily pro pozici 1	32
26	Rychlostní profily pro pozici 2	33
27	Úvodní okno	44
28	Nastavení pro vykreslení proudového pole	44
29	Experimentální zařízení	45
30	Vodní trať experimentálního zařízení	46
31	Vzájemné uložení palivové tyče s distanční mřížkou v trubici	47
32	Jednotlivé varianty navržených distančních mřížek	48
33	Měřicí roviny	48
34	Rychlostní profil VAR 1 pro pozici 1 a pozici 2	49
35	Rychlostní profil VAR 2 pro pozici 1 a pozici 2	49
36	Rychlostní profil VAR 3 pro pozici 1 a pozici 2	50
37	Rychlostní profil pozice 1, složka u	50
38	Rychlostní profil pozice 2, složka u	51

39 Obsah přiloženého CD 52

Seznam tabulek

1	Pohltivost neutronů	5
2	Fyzikální vlastnosti Zircalloy-4 [3]	6
3	Chemické složení Inconel [4]	6
4	Fyzikální vlastnosti Inconel [4]	7
5	Chemické složení korozivzdorná ocel [5]	7
6	Podmínky při měření	21

Kapitola 1

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá možným zvýšením součinitele přestupu tepla mezi palivovou tyčí, ve které je umístěno palivo, a chladící vodou (moderátorem). V první části bakalářské práce jsou uvedeny funkční požadavky, které jsou kladeny na správnou funkci distanční mřížky, která je umístěna v aktivní zóně jaderného reaktoru. Dále pak srovnávám vhodné materiály pro výrobu distančních mřížek s jejich klady a zápory z hlediska provozu. První část je ukončena přehledem patentovaných distančních mřížek, které popisují nynější stav techniky v dané oblasti. Druhá část práce je zaměřena na samotnou výrobu distanční mřížky a experimentální měření proudového pole za navrženými distančními mřížkami. Experimentální měření je provedeno pomocí laserové anemometrie metodou PIV. Poslední část práce je zaměřena na vyhodnocení výsledků z experimentálního měření a zhodnocení přínosů a poznatků na navržených distančních mřížkách.

Práce obsahuje přehled použitých zkratk viz příloha A, výrobní výkresy navržených distančních mřížek viz příloha B, práce se softwarem DynamicStudio viz příloha C a rychlostní profily viz příloha D.

1.1 Motivace

Elektrická energie vyráběná například v uhelných, fotovoltaických a jaderných elektrárnách je využívána každým člověkem na této zemi. Spotřeba elektrické energie stále roste a lidé jsou na ni více a více závislí. Proto je nutná modernizace stávajících elektráren, případně výstavba nových elektráren. V prostředí ČR připadá výroba elektrické energie z více jak 50% na uhelné elektrárny a z 32,9% na jaderné elektrárny. Dojde-li však k vyčerpání zásob uhlí, nebude uspokojena poptávka po elektrické energii.

Proto když mi bylo nabídnuto téma zabývající se měřením proudového pole, které je ovlivněno distanční mřížkou fungující jako podpora palivových tyčí v jaderném reaktoru. Neváhal jsem a zpracoval téma do bakalářské práce.

Kapitola 2

Deformace a materiály distanční mřížky

2.1 Jaderný reaktor

Jaderný reaktor se skládá z mnoha komponentů umožňujících štěpnou reakci. Mezi základní patří reaktorová nádoba, palivo, řídicí orgány, moderátor, chladivo a další konstrukční prvky. Reaktorová nádoba slouží jako obálka ochranná aktivní zónu. V aktivní zóně se nachází svazky palivových tyčí, které obsahují štěpitelné palivo ve formě palivových pelet. Palivové proutky jsou uloženy v mnoha tubusech, které jsou uloženy v aktivní zóně. V tomto místě musí být uloženy po celý průběh štěpné reakce až do vyhoření paliva. Předepsaná poloha palivových tyčí je zajištěna pomocí distančních mřížek, které jsou součástí mnoha tubusů uložených v aktivní zóně, skrz které proudí chladivo. Zde dochází ke štěpné reakci, která je založena na působení neutronu na radioaktivní prvek. Tato reakce, způsobí rozpad nestabilního radioaktivního prvku. Prvek se rozpadne na jiný prvek s nižším atomovým číslem a vysokou rychlostí. Vzniklý štěpek s vysokou kinetickou energií způsobuje vznik velkého množství tepelné energie, která se dále využívá pro přeměnu na jiný druh využitelné energie. Přeměna kinetické energie na tepelnou spočívá v nárazech štěpky rozpadlého atomu na překážky. Tím dochází ke snížení kinetické energie, která se přemění na tepelnou. Vzniklá tepelná energie se je předávána chladivu, které proudí kolem palivových tyčí. Na rozhraní těchto dvou prostředí dochází k přestupu tepla. Tento přestup musí být co neúčinnější z následujících důvodů:

- chlazení palivové tyče,
- účinnější ohřev vody.

Jako sekundární prvek vzniká při štěpení neutron. Podle použitého paliva vzniká při štěpení různý počet neutronů. Tento počet neutronů vznikající při chemické reakci je experimentálně zjištěný. V případě uranu ^{235}U vzniká 2,5 neutronu. Tento údaj je statistický. V aktivní zóně dochází ke ztrátám neutronů, které se rozptýlí do okolního prostředí. Velké množství pohltí použitý moderátor a konstrukční materiály použité v reaktoru. Mezi materiály pohlcující neutrony patří i distanční mřížka.

Při návrhu distanční mřížky je nutné brát zřetel na uvedené nároky na distanční mřížky použité v jaderném reaktoru. Tento problém bude rozveden detailněji v následujícím textu.

2.2 Distanční mřížka

Zkoumané distanční mřížky se používají v různých typech jaderných reaktorů. Mezi hlavní patří tlakovodní reaktor (PWR) a varný reaktor (BWR). Uvedené jaderné reaktory, které

se liší v podmínkách provozu, kladou na mřížku takové požadavky, které zajistí bezpečný provoz reaktoru.

V aktivní zóně jaderného reaktoru jsou uloženy palivové tyče s palivem ve formě kazet. V palivových tyčích probíhá chemická reakce, kde se radioaktivní prvek štěpí. Kolem palivových tyčí je umístěno několik distančních mřížek, které jsou rozmístěny v předepsaných intervalech po celé délce palivové tyče. Toto rozmístění zajistí přesnou polohu palivových tyčí v jaderném reaktoru s předepsanou vzdáleností mezi jednotlivými tyčemi a současně zajistí dobré axiální vedení palivových proutků. Hlavní funkce distanční mřížky jsou:

- přesně definované uložení palivových tyčí,
- dobré axiální vedení,
- zamezení deformace,
- zamezení vibracím,
- zamezení pootáčení tyče,
- zajištění přestupu tepla,
- nepohlcovat neutrony.

Z funkčních důvodů nesmí být mřížka pevně připevněna k palivovým tyčím, ani k vnitřnímu povrchu tubusu, kterým je svazek tyčí obklopen. První důvod je tepelná roztažnost materiálu. Dle patentu U.S (4740350A) Westinghouse electric corp. 1988, [1] jsou na mřížce vytvořeny pružiny, které jsou připevněny v rozích distanční mřížky nebo na protilehlých stranách. Tyto pružiny zajišťují konstantní sílu, která je vyvíjena na stěnu potrubí, tím je zajištěno přesné umístění distanční mřížky v tubusu a je určena přesná poloha uložených palivových tyčí. Použitím pružin se dosáhlo ke zlepšení bezpečnostních podmínek provozu reaktoru. Jako příklad lze uvést zvýšení bezpečnosti při seismické aktivitě. Pružiny zde slouží jako tlumící prvek při vibracích. Vibrace však vznikají i při samotném proudění chladicího média, kdy se při správné činnosti distanční mřížky vytváří turbulentní proudění, které zvyšuje součinitel přestupu tepla.

2.2.1 Deformace palivové tyče

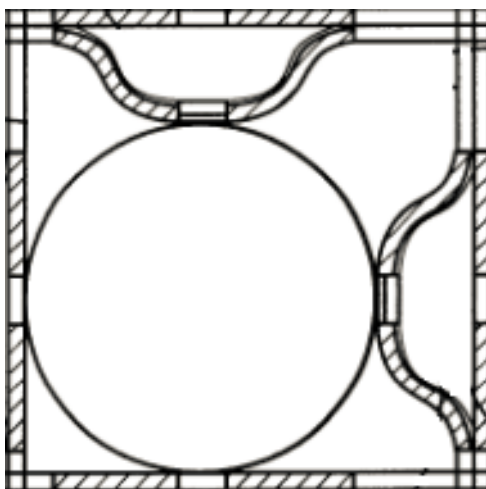
Konstrukční materiál distanční mřížky musí plnit následující požadavky, které jsou:

- vysoká hodnota tečení (creep),
- vhodná tepelná roztažnost materiálu.

Použitá distanční mřížka musí působit konstantní přítlačnou silou na palivovou tyč pro přesné udržení palivové tyče v předepsané poloze a současně musí zajistit dobré axiální vedení. V případě pevného spojení mezi distanční mřížkou a palivovou tyčí by došlo k zamezení axiálního posunutí, které způsobuje tepelná roztažnost materiálu. To by zapříčinilo vyklenutí palivové tyče. Vzniklý průhyb by byl závislý na vzdálenosti uložení distančních mřížek, teplotě uvnitř palivové tyče a součiniteli tepelné roztažnosti použitého materiálu palivové tyče. Distanční mřížky by působily jako podpory. V tomto případě by se z palivové tyče stal nosník vetknutý z obou stran.

Vzniklá ohybová deformace je negativní jev, neboť způsobený ohyb palivové tyče v jaderném reaktoru může zapříčinit jeho havárii. Při nutnosti přerušení štěpné reakce je zapotřebí zasunout palivové tyče. Při vzniklém ohybu palivových tyčí by regulační tyče nebylo možné úplně zasunout do reaktoru a štěpná reakce by nešla zcela zastavit. Tento uvedený problém souvisí i s regulací štěpné reakce při samotném provozu, kdy jsou regulační tyče obsahující absorpční látku, či jsou již vyrobeny z borové oceli, používány pro krátkodobé změny výkonu. Pro dlouhodobé změny je používána kyselina boritá, která se přimíchává do chladiva dle požadovaných podmínek. V průběhu vyhořívání paliva se koncentrace kyseliny borité snižuje, aby bylo stále dosaženo kritického stavu.

Jelikož síla působící od distanční mřížky nesmí způsobit pevné spojení, ale musí zajistit dobré axiální vedení, lze tuto deformaci z důvodu možného axiálního prodloužení zanedbat.



Obrázek 1: Konstrukce distanční mřížky k zamezení pootáčení [8]

Další možná deformace může vznikat při malém pootáčení palivové tyče, které způsobuje dotek čtyř přítlačných pružin distanční mřížky na palivovou tyč. Pootáčení je způsobeno nerovnoměrným nárůstem oxidační vrstvy materiálu distanční mřížky, která způsobí nerovnoměrné vyklenutí přítlačných pružin. Tento fakt způsobí malé pootočení tyče. Patent U.S (09/607038) [8], který je znázorněn na obrázku 1, poukazuje na distanční mřížku, která má dvě horizontální rovné desky, které jsou vůči sobě v pravém úhlu a dvě horizontální desky opatřené pružinami, které přitlačují palivovou tyč k rovným deskám. Tímto je zamezeno nerovnoměrnému vyklenutí pružin, neboť požadované umístění palivových tyčí je zajištěno pomocí dvou rovných destiček, které jsou oproti sobě umístěny v pravém úhlu. Současně je pomocí velkých styčných ploch destiček zajištěno, dostatečné tření mezi distanční mřížkou a palivovou tyčí. Současně s přítlačnou silou zajišťují přesně definovanou polohu.

V případě nemožnosti zamezení pootáčení palivového proutku, by docházelo k otěru dvou materiálu, tím by byla způsobena deformace povrchu obou součástí a komponenty by musely být následně vyměněny.

2.2.2 Materiál mřížky

Vhodná volba materiálu distanční mřížky se odvíjí od výše uvedených omezení, které v aktivní zóně nastávají. V současné době jsou používány tři druhy materiálu:

- slitina zirkonia,
- inconel,
- korozivzdorná ocel.

Mřížka je vytvářena ze složitě tvarovaných pásů, které jsou vyhotoveny dle návrhu. Hlavní kritéria pro správnou volbu materiálu jsou:

- nejmenší objem materiálu,
- pohltivost neutronů,
- korozivzdornost,
- vysoká tepelná vodivost,
- stabilita za provozu.

2.2.3 Slitina zirkonia (zircalloy-4)

Slitina zirkonia je v současné době nejpoužívanějším materiálem distanční mřížky. Konstrukční materiál je slitina zirkonia, která má ve slitině majoritní postavení a je zde obsažena z více než 97% zirkonia. Dalšími příměsovými prvky jsou cín (1,3%), chrom (0,1%), a železo (0,22%). Uvedená slitina zirkonia se používá z důvodu malé pohltivosti tepelných (pomalých) neutronů, pomocí kterých je štěpen obohacený uran ^{235}U . Z tabulky 1

Tabulka 1: Pohltivost neutronů

Zirkonium (Zr)	1
Železo (Fe)	14
Nikl (Ni)	25

je patrné, že čisté železo má čtrnáctkrát vyšší pohltivost a nikl má dokonce dvacet pětkrát vyšší pohltivost tepelných neutronů. Z tohoto důvodu je slitina zirkonia výjimečná. Avšak je důležité odstranit ze slitiny hafnium, které zde může být v maximálním množství 0,01%, neboť hafnium má šest setkrát větší účinný průřez. Účinný průřez vyjadřuje míru pravděpodobnosti, při které dojde k interakci jednoho neutronu s jedním jádrem prvku obsaženým ve slitině. Toto jádro se nachází v tzv. terčové ploše.

Slitina je korozivzdorná, kde se povrch pasivuje malým ochranným povlakem, který zamezuje kontaktu materiálu s okolím. Při kontaktu vody se zirkoniem dochází k chemické reakci, kde jako další produkt vzniká vodík.



Výhody slitiny:

- Vysoká tepelná vodivost, o 30% vyšší než u nerezové oceli.
- Nízká tepelná roztažnost, $\frac{1}{3}$ hodnoty nerezové oceli.
- Výborné vlastnosti za tepla.
- Nízká pohltivost neutronů.

Nevýhody slitiny:

- cena,
- pasivační vrstva,
- změna rozměru.

Jako nevýhody slitiny zirkonia lze považovat vzniklou pasivační vrstvu, která vytvoří pnutí pod vzniklou vrstvou, tím materiál nepatrně nabude na rozměrech. [2]

Tabulka 2: Fyzikální vlastnosti Zircalloy-4 [3]

Teplota tání	T_t	1850°C
Hustota	ρ	6.56 g/cm ³
Mez pevnosti	σ_p	514MPa
Mez kluzu	σ_k	381MPa
Tvrдость	H	89 HRC

2.2.4 Inconel

Inconel je slitina niklu s příměsí chromu a železa.

Tabulka 3: Chemické složení Inconel [4]

	Nikl	Uhlík	Mangan	Chrom	Síra	Křemík	Železo
Max[%]		0,15	1,0	17,0	0,015	0,5	10,0
Min[%]	72,0			14,0			6,0

Antikorozní slitinu lze používat v širokém pásmu teplot, od teplot kryogenních až do teploty 1098°C. Obsah niklu umožňuje zachovat značnou odolnost za redukčních podmínek. Příměs chromu slouží k ochraně před oxidací a odolává sloučeninám síry. Slitinu je vhodné používat v neutrálních a alkalických roztocích. V kyselých roztocích dochází k poškozování a ztrátě požadovaných mechanických vlastností. Mezi hlavní výhody patří odolnost Inconelu při vysokých teplotách a tlacích. [4]

Výhody slitiny:

- vysoká pevnost, dobrá zpracovatelnost, snadná svařitelnost,
- antikorozní,
- široký rozsah teplot,
- nemagnetická,
- odolnost proti čisté vodě v primárním a sekundárním okruhu.

Nevýhody slitiny:

- Použití pouze v neutrálních a alkalických prostředích.

Tabulka 4: Fyzikální vlastnosti Inconel [4]

Hustota	ρ	8,47 g/cm ³
Mez pevnosti	σ_p	689MPA
Mez kluzu	σ_k	345MPA
Tvrдость	H	170 Hv
Tažnost	A	40%

2.2.5 Korozivzdorná ocel

Nerezová ocel se oproti ostatním použitým materiálům vyznačuje nejnižší pořizovací cenou. Materiál je antikorozní v neutrálních a slabě kyselých a zásaditých roztocích. Vyznačuje se vysokou tepelnou roztažností. Oproti slitině zirkonia má až třikrát vyšší tepelnou roztažnost. Pro distanční mřížku lze zvolit chrom-niklovou austenitickou ocel, která je nemagnetická.(X5CrNi18 10)

Tabulka 5: Chemické složení korozivzdorná ocel [5]

	Uhlík	Křemík	Mangan	Chrom	Molybden	Nikl
Max[%]	0,07	1,0	2,0	19,0		10,5
Min[%]				19,0		8,5

Použití konstrukčního materiálu je vhodné do teploty 450°C, od vyšších teplot může docházet k mezikrystalové korozi, která je nežádoucí. [6]

Výhody:

- levná,
- mnoho provozních prostředí,
- nemagnetická.

Nevýhody:

- vysoká tepelná roztažnost,
- teplotní omezení použití.

Kapitola 3

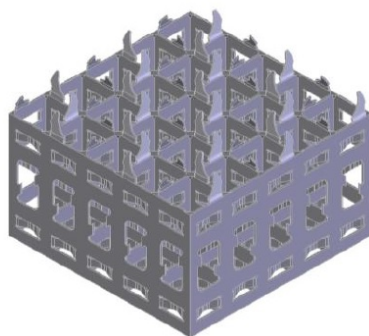
Distanční mřížky

3.1 Vznik turbulentního proudění

Volba vhodné mřížky je nejdůležitější pro přestup tepla, probíhající mezi zahřátou palivovou tyčí a chladičem, které protéká podél tyče. Mřížka zajišťuje vznik turbulentního prostředí, které vzniká po průchodu chladiča mezikružím distanční mřížky. Toto proudění se následně generuje za mřížkou. Proudění je založeno na difúzi proudu, která zvyšuje koeficient přestupu tepla. Přesto je třeba mít na paměti, že turbulentní proudění může způsobit vibrace uvnitř systému a tím může mít negativní vliv na polohu a deformaci palivových tyčí. V neposlední řadě je třeba zamezit poklesu tlaku v systému, i přestože se v turbulentním proudění tlak v každém místě mění.

3.2 Distanční mřížky

3.2.1 Mřížka s mísící lopatkou



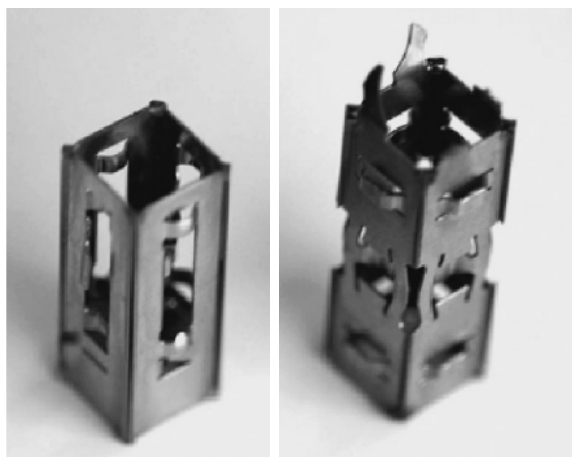
Obrázek 2: Mřížka s mísícími lopatkami Westinghouse [10]

Na obrázku 2 je vyobrazena distanční mřížka o velikosti 5x5, která byla vyvinuta firmou Westinghouse, je používána v tlakovodním jaderném reaktoru. Uvedená mřížka je opatřena mísícími lopatkami pro vznik kvalitnějšího turbulentního proudění, které slouží ke kvalitnějšímu přestupu tepla mezi palivovou tyčí a procházejícím chladičem. Mísící lopatky jsou umístěny v horní části mřížky, kde jsou použity dvě velikosti lopatek, kdy na každou buňku připadají dvě velké a dvě malé lopatky. Rozměrově různé lopatky jsou umístěny naproti sobě. V horní a spodní části mřížky jsou po obvodu vytvořena vyklenutí, směřující dovnitř buňky. Toto vnitřní vyklenutí se nazývá: „pružina“. Pružiny

působící z každé strany čtvercové mřížky, kde zajistí správné držení palivové tyče v předepsané poloze. Ve střední části mřížky jsou vytvořeny obdélníkové otvory se zaoblenými hranami. Svislé hrany otvoru jsou opatřeny dvojicí výstupků, které slouží ke zvýšení fluktuace procházejícího proudu. Hlavní výhodou distanční mřížky spočívá v osazení mísíci lopatkami, které zvyšují velikost turbulentního proudění. [10] Menší nevýhodou mřížky by mohly být pružiny, které působí z každé strany z hlediska tepelné roztažnosti materiálu, kde by na palivovou tyč byla vyvinuta nerovnoměrná působící síla, která by způsobovala natáčení tyče. (Viz:2.2.1 Deformace palivové tyče.)

3.2.2 Vajíčková distanční mřížka

Vajíčková distanční mřížka je velice jednoduchá a používá se jako názorná ukázka účinnosti turbulentního proudění. Jelikož tato distanční mřížka generuje slabé turbulentní proudění, v jaderných reaktorech se nevyskytuje, a používá se spíše jako názorná technická ukázka. Mřížka je válcového tvaru. Ve spodní a horní části distanční mřížky jsou vytvořeny pružiny orientované dovnitř mřížky, zde slouží jako podpora palivových tyčí a současně je udržuje v předepsaném umístění. Po obvodech mřížky jsou vytvořeny obdélníkové otvory. Na svislé hraně jsou vytvořeny malé lopatky, které slouží ke generování turbulentního proudění.



Obrázek 3: Vajíčková distanční mřížka [7]

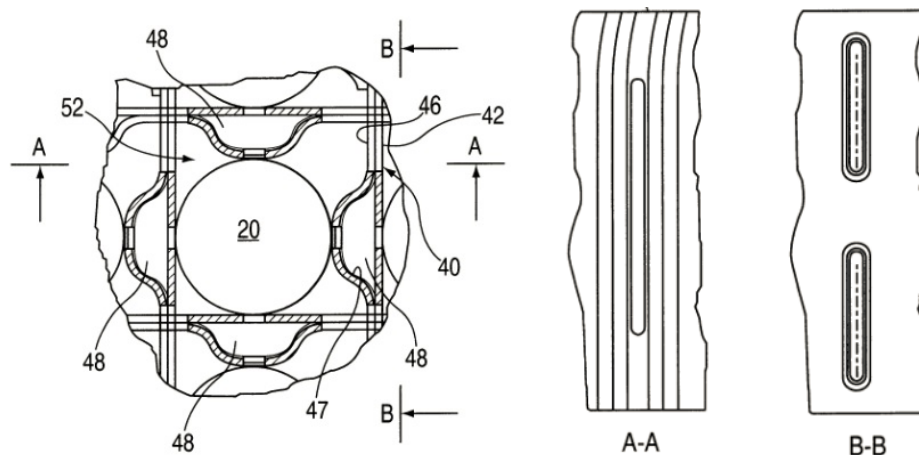
3.2.3 Distanční mřížka ve tvaru vajíčka s mísíci lopatkami

Vajíčková distanční mřížka s mísíci lopatkami je propracovanější mřížka vajíčkové mřížky. V porovnání s obyčejnou vajíčkovou mřížkou generuje kvalitativně lepší turbulentní proudění, které zajistí lepší přenos tepla mezi palivovou tyčí a chladícím médiem. Mřížka je osazena dvojicí mísíci lopatek, které jsou umístěny v horní části mřížky. Tyto mísíci lopatky mají největší vliv na generování silnějšího turbulentního proudění. Ve střední části mřížky jsou umístěny pružiny, které slouží k držení palivových tyčí. V horní a spodní části distanční mřížky jsou vytvořeny pružiny směřující ven, které mají funkci rozrušitelného členu protékajícího média, a tím také zvyšují velikost turbulentního proudění. Experiment provedený mezi touto mřížkou a vajíčkovou distanční mřížkou popsáný v knize Space Grid

Effects during a Reflood in an Annulus Flow Channel [7] názorně ukazuje velikost turbulentního proudění vznikajících na těchto mřížkách. Na distanční mřížce ve tvaru vajíčka s mísícími lopatkami bylo jasně patrné kvalitnější turbulentní proudění než na obyčejné mřížce. [7]

3.2.4 Mřížka s vodorovnými pásy

Uvedená distanční mřížka se od ostatních uváděných mřížek liší v použití vodorovných pásů. Mřížka se skládá vždy z dvojice destiček, z nichž jedna je vyklenutá. Tato vyklenutá destička slouží jako přitlačná pružina palivové tyče. Jak je patrné z obrázku 4, pozice 40 představuje přímou destičku, která slouží jako podpora vyklenuté destičce 46. Toto vyklenutí způsobí, že je mezi dvěma destičkami vytvořen průtokový kanál. Výhoda předloženého patentu U. S (09/607038) [8] spočívá v uložení palivové tyče mezi dvě rovné desky. Použité desky zamezují vyklenutí, a tím zamezují vzniku rotace palivové tyče. Další výhoda se vychází ze styčné plochy, ve které se palivová tyč dotýká distanční mřížky. Tato styčná plocha je téměř v celé délce distanční mřížky. Vytvořené proudící otvory, které jsou vytvořeny na vyklenuté destičce a přímé destičce, slouží k usměrnění protékajícího chladiva, které musí být usměrněno tak, aby nedocházelo ke vzniku točivé síly, generované proudící kapalinou, která by negativně působila na palivovou tyč. Tato mřížka je řešením při použití slitiny zirkonia, která během provozu zvětšuje svůj objem, který je dán výškou pasivační vrstvy. To zapříčiní nerovnoměrné vyklenutí pružin.

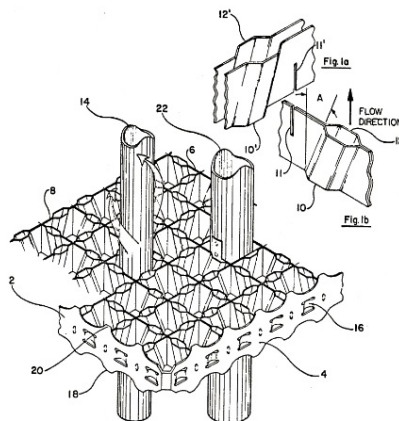


Obrázek 4: Půdorys distanční mřížky zamezující pootáčení [8]

3.2.5 Distanční mřížka U.S 4726926

Uvedená distanční mřížka patří mezi nejstarší ze zde uvedených mřížek. Základem mřížky jsou obvodové pásy, které jsou na obrázku znázorněny pozicemi 4 a 2. Tyto pásy tvoří obvod celé mřížky, do kterých jsou následně zasouvány jednotlivé destičky, které jsou tvarované s vytvořenými zářezy a spojují destičky. To lze vidět v horní části obrázku 5. Vznik turbulentního proudění je generováno pomocí vzniklého otvoru při spojení dvojice tvarovaných pásků. Osa vzniklého otvoru je natočena vůči ose palivové tyče. Běžně se tento úhel pohybuje okolo 10° , záleží však na charakteristice reaktoru, ve kterém je distanční mřížka použita. Pomocí takto vzniklého otvoru dochází k cirkulaci chladícího

média, jak je znázorněno na obrázku 5, kde směru toku je generován podél palivové tyče. Každá sousední palivová tyč má opačný směr než má tyč sousední, tím je zamezeno vzniku točivého momentu. Pružiny vytvořené na obvodovém pásu směřované dovnitř buňky slouží jako podpora palivových tyčí umístěných na okrajích distanční mřížky. V neposlední řadě zahnuté destičky, které jsou umístěny v horní a spodní části obvodových destiček, jsou zde opatřeny pouze z konstrukčního hlediska, které slouží ke snadnější výměně paliva. [9]



Obrázek 5: Distanční mřížka [9]

3.3 Návrh distanční mřížky

Z uvedené rešerše vyplývají následující požadavky, které musí být splněny i při provádění experimentálního měření. Mezi hlavní požadavky patří:

- Vycentrování palivové tyče v transparentní trubici.
- Umístění distanční mřížky v přesné pozici na palivové tyči.

Pomocí měření na experimentálním zařízení se pokusíme ověřit, zda uvedená teorie, zabývající se zvýšením součinitele přestupu tepla pomocí konstrukční úpravy spočívající v přidání mísících lopatek umístěné v horní části distanční mřížky, je platná.

Z tohoto důvodu při experimentu budou měřeny rychlostní profily tří distančních mřížek:

- distanční mřížka,
- distanční mřížka s mísícími lopatkami,
- distanční mřížka s mísícími lopatkami a otvory.

Upravené distanční mřížky vycházejí ze základní mřížky, která vychází z obdélníkového plechu. První typ modifikované distanční mřížky obsahuje mísící lopatky umístěné v horní části ve středu vnějších rádiusů, kde jsou ohnuty pod úhlem 45° směřující k palivové tyči. Velikost úhlu vychází ze získaných poznatků, při vypracovávání rešeršní práce.

Druhý typ distanční mřížky obsahuje oválný otvor umístěný na vnitřním rádiu. Vytvořený otvor narušuje souvislý povrch distanční mřížky. Tyto modifikované mřížky by měly potvrdit vyslovenou teorii.

Dle předpokladů, by nejhodnější mřížkou měla být distanční mřížka s mísíci lopatkami a oválnými otvory, neboť mísící lopatky narušují kapalinu proudící kolem palivové tyče a současně dva podélné otvory umístěné na vnitřních rádiusech rozrušují celistvý povrch. Tato mřížka by se měla vyznačovat možností vytváření silného turbulentního proudění, kde vzniklé turbulence zásadně ovlivňují velikost součinitele přestupu tepla mezi palivovou tyčí a proudícím chladící kapalinou.

3.4 Výroba distanční mřížky s mísíci lopatkami a otvory

Distanční mřížka s mísíci lopatkami a otvory je vyrobena z nerezového plechu, rozměrech 13 x 54 mm a tloušťce 0,4 mm. Z plechu byl vypálen požadovaný tvar pomocí laserového zařízení (dle přiloženého výkresu). Z něhož je patrné, že v horní části distanční mřížky byla vytvořena tři křídélka čtvercového tvaru o velikosti 3,5 x 3 mm, která byla následně sražena 1 x 2 mm od horní plochy, které jsou po vytvarování distanční mřížky ohnuty pod úhlem 45°. Tyto křídélka by dle předpokladu měla generovat lepší turbulentní proudění za mřížkou, než mřížka bez osazení křidélek. Následně mřížka obsahuje dva otvory oválného tvaru o rozměrech 6 x 3 mm, vytvořeny za účelem vytvoření umělé nerovnosti. Tyto otvory jsou z konstrukčních důvodů pouze dva, neboť při následném svařování by výroba třetího otvoru byla problematická. Otvory jsou umístěny symetricky mezi mísíci lopatky tak, aby při následném stočení a vytvarování plechu do požadovaného tvaru mřížky byly umístěny ve středu vnitřního radiusu, tvořící styčnou plochu mezi distanční mřížkou a palivovou tyčí. Vzniklé oválné otvory jsou vůči sobě natočeny o 120°. Distanční mřížku opisuje kružnice o průměru 14,5 mm, která vymezuje oblast vnitřní plochy vnější transparentní trubky, ve které je mřížka uložena při měření. Jako styčné plochy zde jsou tři radiusy uložené pod úhlem 120°.



Obrázek 6: Sklícidlo pro výrobu distanční mřížky

Výroba distanční mřížky byla provedena na speciálně upraveném sklícidle (obrázek 6), do kterého byl vložen připravený zatočený plech, který musel být vložen v požadované pozici, tak, aby mísící lopatky byly ve středu vnějšího radiusu. Po vytvoření požadovaného tvaru byly z technologického hlediska ostříhány přečnívající části plechu pro pájení. Spoj byl pájen pomocí soupravy Bernzomatic TS8000 souprava MAP/US, kde byla jako přídatný materiál použita elektroda s vysokým procentem stříbra. Po svaření byla mřížka následně očištěna od pasivační vrstvy a připravena dle požadovaného tvaru. V samotném

závěru po napájení distančních mřížek na palivovou tyč a očištění, je tento celek nastříkán matnou černou barvou pro snížení vzniklých odlesků, při experimentálním měření.

Uvedený výrobní postup je totožný pro všechny tři navržené distanční mřížky, které mají stejný průřez a liší se pouze v přidání některých prvků ve formě lopatek a oválných otvorů.

3.5 Výrobní problémy distančních mřížek

Při výrobě samotných distančních mřížek docházelo k těmto problémům:

- vystřihnutí tvaru,
- zatočení plechu,
- pájení,
- očištění svaru,
- pájení distanční mřížky na palivovou tyč.

Při výrobě distanční mřížky bez lopatek byl plech vystřiháván ručně pomocí nůžek na plech. Z tohoto důvodu nemohlo být dosaženo přesného tvaru jako v případě distanční mřížky s lopatkou, která byla vypálena pomocí laserového zařízení. Dalším ztížením samotné výroby bylo zatočení připraveného plechu do tvaru s kruhovou podstavou. Zatočení bylo provedeno ručně pomocí měděného čepu s vnějším průměrem totožného s maximálním průměrem na tvaru distanční mřížky. Toto lze vidět na obrázku 6. V případě distanční mřížky s mísíci lopatkami muselo být dosaženo přesného uložení ve sklíčidle pro dosažení pozice mísících lopatek ve středu vnějšího rádiusu. Tento požadavek byl splněn při vytvarování u všech mřížek.



Obrázek 7: Distanční mřížky v rozvinutém stavu

Největší problém nastal po zastřížení vytvarované mřížky před pájením, neboť vznikl problém v pevném ustavení mřížky pro pájení. Příčinou je velikost distanční mřížky, neboť průměr kružnice opisující vnější tvar dosahuje velikosti pouze 14,5 mm. Samotné pájení bylo provedeno opět pouze na měděném čepu.

Posléze jsme museli očistit svar vzniklý pájením. Pro přesné měření na experimentálním zařízení by měla být mřížka kompletně očištěna od vzniklého svaru a pasivační vrstvy, viz. obrázek 8. V případě distanční mřížky s mísíci lopatkami nedošlo k úplnému očištění vzniklého svaru a současně došlo k měření proudového pole v rovině procházejícím tímto svarem. Z tohoto důvodu došlo ke zmenšení šířky proudového pole, neboť vnitřní rádius byl zmenšen o velikost neočištěného svaru. Tento poznatek je uveden a znázorněn v kapitole 5.1.2. Před samotným pájením distanční mřížky na palivovou tyč pomocí pájecí soustavy Bernzomatic TS8000 souprava MAP/US je potřeba zajistit vzájemnou souosost součástí, aby nedošlo na jedné straně ke zmenšení průchozích kanálků a na straně druhé k jejich zvětšení. Je potřeba si uvědomit, že při pájení dochází k tepelné roztažnosti materiálu. Práce s distanční mřížkou je při pájení z hlediska její velikosti velice problematická.



Obrázek 8: Distanční mřížka s mísíci lopatkami po pájení

Uvedené problémy s výrobou distanční mřížky je potřeba co nejvíce eliminovat, neboť jinak dochází k nekorektním výsledkům experimentálního měření. Při požadavku dalšího měření na jiné distanční mřížky je potřeba dbát na uvedené problémy již při výrobě, aby nedocházelo k možnému ovlivňování výsledků z konstrukčního hlediska distanční mřížky.

V příloze na obrázku 32 můžeme vidět tři varianty distančních mřížek použité pro měření. Snímky jsou pořízeny po vyjmutí palivové tyče z experimentálního zařízení. Z pořízených snímků je velice patrné, že proudící médium strhlo matnou černou barvu z distančních mřížek, sloužící k minimalizaci odlesku. Strhnutí by mohlo způsobovat při měření vznik odlesků, které by mohly snižovat kvalitu pořízených záznamů. Pro zamezení strnutí černé barvy by bylo potřeba buď použít jinou formu nástřiku černé barvy na distanční mřížku spojenou s palivovou tyčí, nebo se v zaměřit na místo vzniku počátku strhávání barvy. Toto místo by teoreticky mělo být na spodní ostré hraně distanční mřížky. Při zaoblení ostré hrany by se intenzita strhávání měla snížit.

Kapitola 4

Experimentální měření

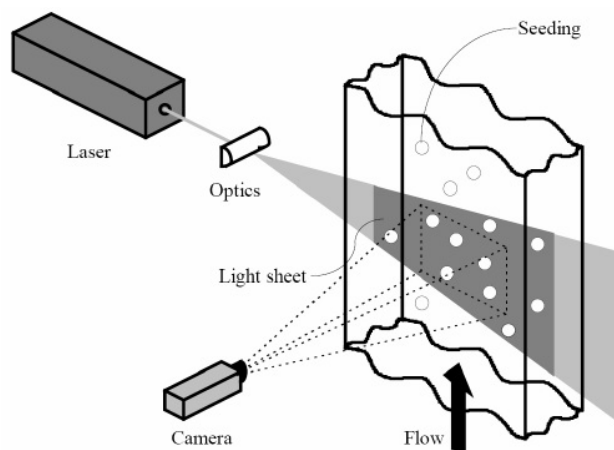
4.1 Základní princip metody PIV

Princip PIV spočívá v měření posuvu malých částic unášených v proudu tekutiny v definovaném místě. Sledované částice jsou osvětleny pomocí pulsujícího laserového paprsku s definovaným časovým intervalem. Tyto částice se zaznamenávají pomocí kamery. Zaznamenaný signál je následně zpracován vhodnou korelační metodou, ze které se určí posun sledované částice. Z výsledného posuvu částice se z rovnice (2) vypočte průměrná rychlost posunutí. V dnešní době je mnoho metod PIV, jako je například 3D PIV, 2D PIV [13]. Experiment, který je součástí bakalářské práce, je měřen metodou 2D PIV.

$$v = \frac{s}{\Delta t} \quad (2)$$

4.1.1 Záznam PIV

Základní uspořádání je uvedeno na obrázku 9.



Obrázek 9: Základní uspořádání [12]

Laser vytvářející kruhový paprsek je pomocí válcové čočky přetransformován do laserového řezu, někdy je také uváděn jako laserový list (nazýváno "laser sheet"). Laserový list definuje světelnou rovinu v proudovém poli, ve kterém jsou unášeny skleněné částice. Částice odrážející světlo unášené v proudovém poli jsou při průchodu laserovým řezem ozářeny laserovým paprskem, jsou snímány kamerou, která je umístěna kolmo k laserovému listu. Částice rozptylující světlo v objektové rovině jsou snímány do obrazové roviny objektivu

kamery. Skleněné částice se jeví jako světlé tečky na tmavém pozadí. Pro správné měření se nejčastěji používají pulsní lasery z důvodu rychlého osvětlení proudících částic tak, aby částice za dobu pulsu zůstala ve stejném místě (zmražené). Tento předpoklad je velmi důležitý z hlediska ostrosti záznamu a přesnosti při výpočtu posunutí. Pro určení vzdálenosti posunu částic je nutno pořídít alespoň dva snímky, které jsou pořizeny v daném časovém intervalu. První záznam obsahuje informaci o počáteční poloze částice a druhý záznam o koncové poloze částice. Ze zjištěných poloh, tedy lze zjistit vektor posunutí částice v definované rovině.

4.2 Experimentální zařízení a příprava

Měření bylo provedeno na experimentálním zařízení, které je umístěné na katedře energetických strojů a zařízení, Fakulty strojní, Západočeské univerzity v Plzni. Zařízení se skládá z oběhového čerpadla typu Grundfols Magna 32-100 N, vstupní a výstupní hlavice, vodní trati, transparentní trubice obsahující transparentní kvádr (přechodový člen) a nádrže na vodu o objemu cca 200l.

Měření rychlostního pole je prováděno v oblasti přechodového členu z důvodu lomu světla na rozhraní dvou prostředí. Problém nastává mezi prostředím vzduch-plexisklo. Pomocí přechodového členu došlo k eliminaci lomu světla a tím i k eliminaci možných chybných výsledků. [11]

Před samotným měřením proudového pole za distanční mřížkou muselo být provedeno zprovoznění experimentálního zařízení a současně byla provedena nezbytná příprava aparatury pro měření pomocí PIV. Zprovoznění experimentálního zařízení bylo časově náročné, neboť během příprav bylo zjištěno, že některé součásti potřebné k měření chybí. Z tohoto důvodu musely být chybějící součásti dokoupené a některé se musely nechat vyrobit. Samotná příprava spočívala v následujících krocích:

- podložení experimentálního zařízení gumovými podložkami,
- naplnění nádrže vodou,
- ustavení transparentní trubice mezi vstupní a výstupní hlavu,
- ustavení palivové tyče,
- utěsnění transparentní trubice,
- zkouška těsnosti,
- sestavení pomocného rámu pro laserové zařízení.

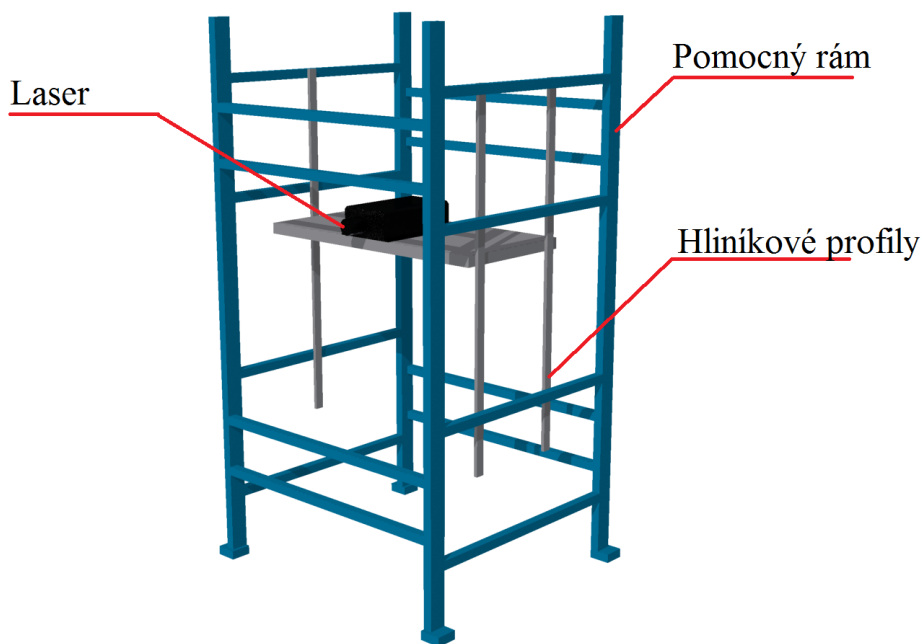
Pro měření pomocí laserové anemometrie pomocí metody PIV, musely být provedeny tyto kroky:

- ustavení stativu kamery,
- ustavení laseru,
- eliminace odlesku,
- zakrytování,
- sycení vody.

4.2.1 Nastavení stativu pro kameru

Pro uložení měřicí kamery byl použit stativ s panoramatickou hlavou, slouží jako traverze, na kterou byla připevněna snímací kamera. V prvním kroku bylo potřeba nastavit upínací hlavu stativu na požadovanou výšku vůči přechodovému členu pro snímání požadované oblasti. Požadovaná výška pro uložení kamery byla nastavena díky možnosti plynulé regulace výšky stativu. Současně musela být hlava pro upnutí kamery vyrovnána pomocí vestavěné vodováhy do roviny. V posledním kroku bylo provedení ustavení stativu s kamerou a objektivem v požadované vzdálenosti 120mm od pozorované roviny transparentní krychličky, neboť pro měření byl využit objektiv MELLES GRIOT MACRO INVARIANTAR 2x P/N 43280 - A4 s pevnou ohniskovou vzdáleností 120 mm. Tento objektiv byl vypůjčen z ČVUT v Praze, Fakulty strojní, Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky od Ing. Jana Novotného, Ph.D. [13], kterému bych chtěl tímto poděkovat za zapůjčení objektivu.

Pohyb ve vodorovném směru byl zajištěn pomocí úložné hlavy pro snímací kameru, který obsahoval mikrometrový šroub pro jemný posuv z důvodu velmi malé vyhodnocované oblasti, která má velikost několika milimetrů.



Obrázek 10: Schéma uložení laseru v pomocném rámu

4.2.2 Ustavení laseru

Laserové zařízení bylo ustavováno v pomocném rámu odděleného od samotného experimentální zařízení. Výškové nastavení bylo provedeno pomocí svislých hliníkových profilů, které byly pomocí šroubů spojené s rámem. Na svislé hliníkové profily byl přimontován čtvercový hliníkový profil, spojený z několika profilů současně. Na čtvercový profil byla přidělána dřevotřísková deska tvořící podstavu pro laser. Laser byl uložen v požadované výšce, kdy optika laseru směřovala proti středu transparentního čtyřstěnu. Podélná korekce byla provedena tak, aby vytvořený laserový list byl totožný s podélnou osou palivové

tyče. Poslední krok bylo vyrovnání podstavy laseru do roviny pomocí digitální vodováhy. Společné ustavení kamery a laserového zařízení je možné vidět na obrázku 11.

4.2.3 Eliminace odlesku

Při měření je potřeba docílit kvalitního záznamu. Proto je potřeba eliminovat odlesky vzniklé od laserové paprsku dopadající na sledovanou oblast. Odlesky vytvářející bílou plochu na pořízeném záznamu, mohou vnikat při dopadu na nerezovou palivovou tyč či na transparentní trubici. V případě, kdy by nebylo možné vzniklé odlesky eliminovat, docházelo by k chybnému měření. Skleněné částice, které se jeví jako bílé tečky na černém pozadí, by byly pohlceny v bílé ploše. Proto bychom nemohli správně vyhodnotit vzniklé proudové pole z důvodu ztráty informací o posunutí sledované částice.

Odlesky byly eliminovány pomocí černé pásky, kterou byl přechodový člen oblepován. Tímto způsobem byly vzniklé odlesky potlačeny. S uvedenými odlesky byl při experimentu velký problém, neboť jsme nemohli zjistit, která část transparentní trubice způsobuje vzniklý odlesk.



Obrázek 11: Ustavení kamery a laseru

4.2.4 Zakrytování

Samotné zakrytování bylo provedeno pomocí černých látek, byl tak zamezen možný únik laserového záření mimo experimentální zařízení a zabráněno možnému poškození zraku. Tímto způsobem vznikla uzavřená oblast mezi laserovým zařízením, kamerou a transparentní trubicí ve které byla uložena palivová tyč s distanční mřížkou.

4.2.5 Sycení vody

Pro sycení proudu byly použity skleněné částice HGS, Hollow Glass Spheres, HGS-10 s průměrem částice o velikosti $10\mu m$ od firmy Dantec Dynamics, které byly přimíchány do nádrže s vodou. Tyto části jsou vhodné díky svému rozptylu světelných paprsků, použít při měření v kapalném médiu.

Hlavním kritériem skleněných částic je velikost a rozptyl laserového paprsku. Skleněné částice, které jsou ozářené laserovým paprskem, musí rozptýlit dopadající světlo do stran.

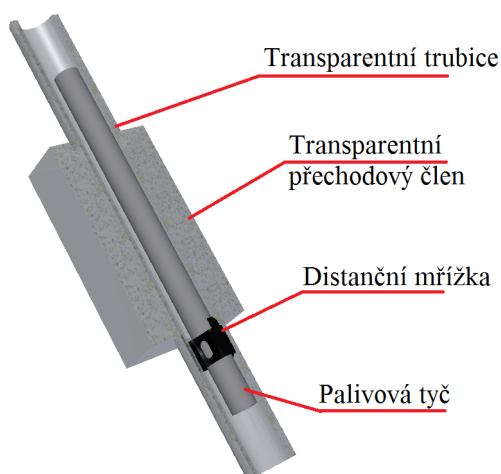
Rozptýlené světlo ve formě signálu je zaznamenáváno kamerou citlivou na světelné záření. Problém spočívá v rozptylu světelného paprsku do strany, neboť intenzita světelných paprsků rozptýlených do stran je menší než rozptylu dopředného. Použité částice musí plnit tato kritéria:

- Dodržení poměru hustoty značkovací částice a hustoty unášejícího média.
- Netěkavost, korozivzdornost, chemicky neutrální.
- Dostatečnou velikost, aby rozptyl signálu do strany byl dostatečně silný pro zaznamenání kamerou.
- Laciné, snadno vyrobitelné
- Dostatečně malé pro přesné sledování proudící kapaliny.

Před samotným měřením bylo potřeba promíchat skleněné částice s vodou. Nejprve jsme promíchali částice s kapkou vody v mističce. Po tomto promíchání jsme zvyšovali koncentraci vody, až byly částice přidány do nádrže. Zde byly ručně a pomocí oběhového čerpadla promíchány, aby došlo ke smíchání v celém objemu kapaliny v experimentálním zařízení. Koncentrace skleněných částic byla sledována pomocí pořízeného záznamu ze snímacího zařízení. Při nízké koncentraci bylo nutné uvedený postup opakovat.

4.2.6 Ustavení palivové tyče

Palivová tyč je vystředěna pomocí distanční mřížky, která je umístěna pod spodní hranou transparentního čtyřstěnu a dvou měděných elektrod, uložené ve vstupní a výstupní hlavě, kde je současně uložena transparentní trubice, která obklopuje palivovou tyč. Elektrody zde současně dovoluje možnost výškového posunutí palivové tyče o velikosti cca $\pm 50mm$, na které je připevněna distanční mřížka. Touto možností lze docílit k přesnému nastavení výšky distanční mřížky, vůči sledované oblasti. Na obrázku 31 můžeme vidět uložení palivové tyče s distanční mřížkou v transparentní trubici.

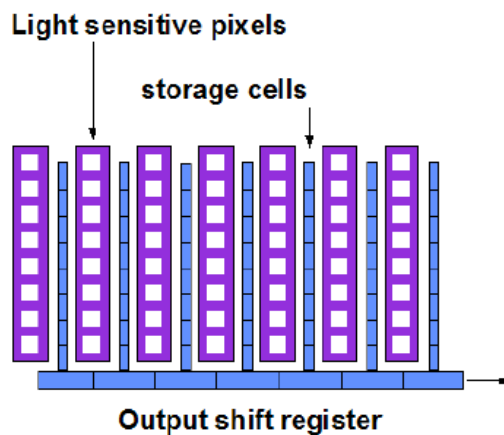


Obrázek 12: Vzájemné uložení palivové tyče s distanční mřížkou v trubici

4.3 Použitá aparatura

4.3.1 FlowSense 4M snímač

Při experimentálním sledování proudového pole je použita jako záznamové zařízení kamera s CCD senzorem (FlowSense 4M). Proud je sledován kamerou s rozlišením 2048 x 2048 pixelů. Srdcem kamery je CCD sensor, který je zobrazen na obrázku 13. Sensor je složen z pixelů citlivých na světlo a paměťových buněk, které se střídají po sloupcích. Při vyhodnocování obrazu pomocí metody vzájemné korelace je počáteční puls rozptýleného laserového paprsku uložen do pixelů citlivých na světlo. Následně je obraz přesunut do paměťových buněk. Signál z druhého laserového pulsu je uložen do pixelů citlivých na světlo. Poté jsou oba záznamy sekvenčně přesunuty do výstupního posuvného registru. Z registru je záznam odebrán do paměti počítače, či hardwarového korelátoru. Problém může být rozteč mezi pixely, která je způsobena existencí paměťových buněk a je dána jejich velikostí. Při dopadu světelného signálu do prostoru mezi pixely, by došlo ke ztrátě informací o sledované částici. Tyto ztracené částice jsou nazývány „ztracené páry“.



Obrázek 13: CCD senzor [12]

Tuto kameru lze použít k měření proudového pole, neboť při experimentu je dosaženo nízkých rychlostí proudící kapaliny. Oběhové čerpadlo bylo nastaveno na hodnotu $1,5\text{m}^3/h$.

4.3.2 Laser Solo - 200TX

Pro měření je použit dvoudutinový Nd:YAG Laser Solo - 200TX 2 x 200mJ. Tento typ laseru patří k nejvíce využívaným laserům v PIV, neboť světelné záření dosahuje vysoké intenzity a nastavení zařízení je mnohem snadnější než u konvekčních laserů. Princip funkčnosti laseru spočívá v použití dvou Nd:YAG laserů, které na sebe nejsou nikterak závislé. Tím je zajištěno nastavení libovolného časového intervalu mezi dvěma světelnými impulsy. Pro správné použití laseru musí být splněny tato uvedená kritéria:

- Doba osvětlení částic musí být dostatečně malá, aby nedošlo k výraznému posunutí částic.
- Paprsek laseru musí mít dostatečnou intenzitu pro osvětlení stopové částice, která je snímána kamerou.

- Čas mezi dvěma expozicemi musí být takový, aby bylo nedošlo k většímu posunutí než $1/4$ rozměru sledované oblasti.

$$\Delta t = \frac{t_r}{4v_{z\max}} \quad (3)$$

t_r Tloušťka laserového řezu [mm]
 $v_{z\max}$ Maximální příčná složka rychlosti [m/s]

- Poloha laserového řezu musí být jednoznačně určena.

Intenzita laserového paprsku byla empiricky nastavena tak, aby skleněné částice rozptýlovaly dostatečné množství světla, které je snímáno záznamovou kamerou. Podle kvality výstupních snímků byla nastavena vhodná intenzita laserového paprsku. Na druhou stranu při zvyšování intenzity laserového paprsku docházelo ke vzniku nežádoucích odlesků. Z tohoto důvodu je potřeba zvolit vhodné nastavení tak, aby nedocházelo k odleskům a současně aby skleněné částice byly dostatečně osvětleny pro dostatečný rozptyl světla do strany.

4.3.3 Podmínky při experimentálním měření

V tabulce 6 je znázorněno nastavení oběhového čerpadla a podmínky, při kterých bylo experimentální měření provedeno. Jako médium byla zvolena voda z vodovodního řádu. Oběhové čerpadlo bylo nastaveno v režimu konstantního tlaku pro výtlačnou výšku a současně bylo nastaveno průtočné množství.

Tabulka 6: Podmínky při měření

Průtočné množství	$1,5m^3/h$
Teplota media	$31\text{ }^\circ C$
Dopravní výška	$3,1m$
Otáčky	$2400ot/min$
Příkon čerpadla	$31W$
Hustota kapaliny	$1000kg/m^3$

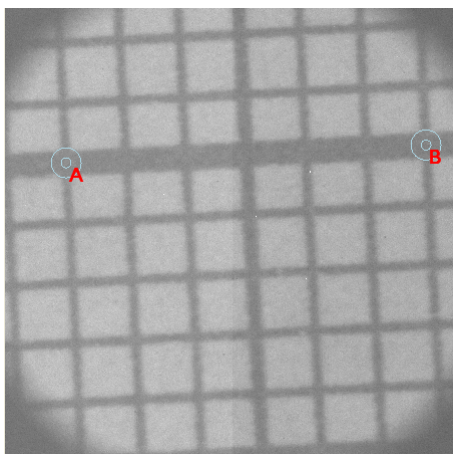
4.4 DynamicStudio

Zjištěná data byla zpracována pomocí softwaru DynamicStudio v.2.30 od firmy Dantec. Software je nainstalovaný na PC Dell Precision PWS 690 a pracuje na platformě Windows XP Professional. V následující části bakalářské práce budou popsány a vysvětleny jednotlivé kroky, pro vyhodnocení vnitřního rychlostního pole za distanční mřížkou.

4.4.1 Kalibrace kamery a zaostření

V příloze na obrázku 28 je zobrazeno grafické rozhraní DynamicStudio. Před samotným měřením nejprve provedeme kalibraci kamery. Samotná kalibrace je prováděna v několika krocích. V prvním kroku zaznamenáme několik snímků pořízených kamerou s CCD

čipem zaostřenou na milimetrový papír, který je umístěný vně transparentní trubice. Kalibraci provedeme pomocí definování skutečné vzdálenosti dvou bodů, které jsou umístěny do uloženého snímku znázorňující milimetrový papír, ze kterého je přesně odečtena skutečná vzdálenost. Takto definujeme vztah mezi obrazovou a objektovou rovinou.



Obrázek 14: Kalibrace kamery s CCD čipem

4.4.2 Měření

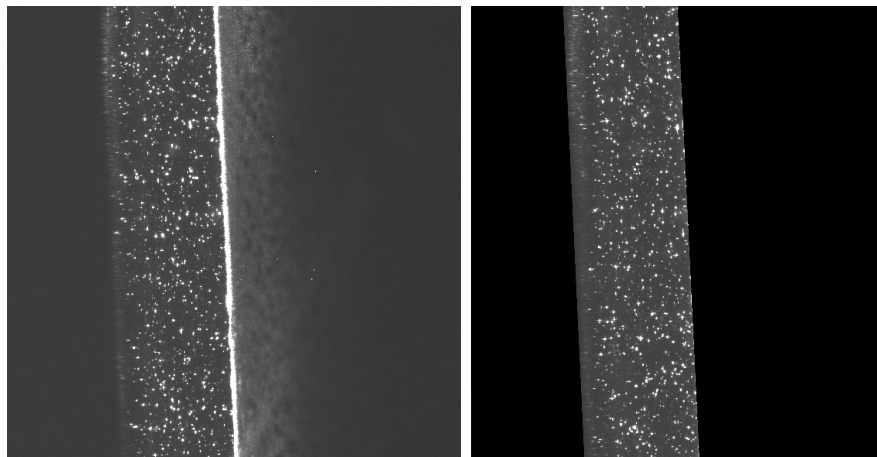
Obrázky byly pořízeny pomocí metody jednotlivé expozice, kdy je každý záznam polohy částic je exponován do samostatného obrazu. První obraz podává informace o počáteční poloze, druhý obraz o koncové poloze částice. Tato metoda jednoznačně určuje směrový vektor posunutí. Z jednotlivých obrazů a doby jejich pořízení lze jednoznačně vektor posunutí určit.

Před samotným měřením musí být ještě provedeny následující úkony:

- kontrola snímků,
- doostření kamery,
- nastavení času mezi dvěma laserovými pulsy.

Nastavení času mezi dvěma pulsy je možné vidět v příloze na obrázku 28. Čas byl nastaven na hodnotu $20\mu s$. Pomocí funkce "Preview" je před samotným měřením zkontrolována kvalita pořízeného obrazu. Při experimentálním měření bylo pořízeno 200 dvojsnímků, které jsou uloženy do paměti počítače. Změna polohy částic zobrazená na snímcích slouží k vyhodnocování proudového pole kapaliny proudící kolem palivové tyče, na které je upevněna distanční mřížka.

Uložené snímky jsou dále upraveny pomocí funkce "maska", která zajišťuje zneviditelnění oblasti mimo proudové pole, která by mohla zapříčinit negativní šum a tím by mohlo dojít k nepřesným výsledkům. Aplikace "masky" je znázorněna na obrázku 15. Černá barva znázorňuje oblast mimo proudové pole. Funkce "maska", která je aplikována na jeden pořízený snímek, je dále přenesena na všechny pořízené snímky. Tyto předpřipravené snímky jsou základem pro zpracování signálu jednotlivých částic záznamu.



Obrázek 15: Aplikace funkce "maska" na pořízený snímek

Adaptivní korelace

Pro vyhodnocení upravených snímků je použita adaptivní korelace, která je v současné době nejpoužívanější metodou vyhodnocování obrazu, která je založena na použití adaptivního offsetu pro jednotlivé vyhodnocované oblasti.

Hlavní smysl metody spočívá v posunutí sledované oblasti se skleněnou částicí, která se posouvá dle proudícího média. Pomocí speciálního „algoritmu provádějící mnohonásobné výpočty vzájemné korelace“¹ [12] dochází k upřesnění výpočtu vzájemné korelace. První a druhý snímek sledované oblasti je proveden standardně dle algoritmu vzájemné korelace. Z této korelace je zjištěno posunutí značkovací částice. V dalším průběhu snímku je použita vzdálenost posunutí značkovacích částic k nastavení posunutí sledované oblasti při provedení druhého snímku. Popsaný proces se provádí pouze dvakrát, neboť následně dochází k minimálnímu zpřesnění. Hlavní výhodou adaptivní korelace je snížení ztracených párů, které zapříčiňují snižování odstupu signálu od šumu, a současně je možné zmenšit sledovanou oblast na jednu polovinu, tím je dosaženo zvýšení počtu vektorů posunutí.

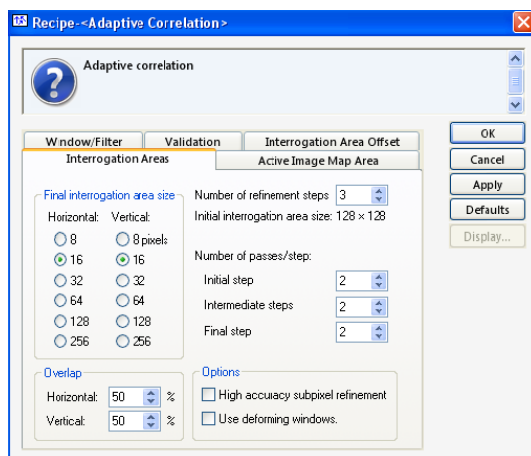
Adaptivní korelace je nejvhodnější metodou pro potlačení chybovosti, tj. zajistí snížení ztracených párů.

Při vyhodnocování experimentálního měření byla adaptivní korelace nejvíce časově náročnou operací. Pro představu vyhodnocení 200 pořízených dvojsnímků trvalo téměř jednu hodinu. Samotné nastavení zůstalo neměnné. Toto nastavení je znázorněno na obrázku 16

Vector statistic

Poslední krok před grafickým vykreslením proudového pole je na adaptivní korelaci aplikována funkce nazývaná se "Vector statistic", podle které jsou všechny rychlosti ve směrech u a v zprůměrovány a současně je provedena směrodatná odchylka od střední hodnoty. Výsledné pole vektorů je graficky zpracováno do rychlostního profilu, znázorněného na obrázku 17, kde na vodorovné ose je vynesena vzdálenost [mm], která definuje vzdálenost mezi palivovou tyčí a transparentní trubicí, kde je rychlost na stěnách nulová (non-slip condition). Na svislé ose je vynesena rychlost [m/s], které dosahuje proudící médium uvnitř

¹Vzájemná korelace = korelace mezi dvěma různými signály (mezi prvním a druhým pořízeným snímkem), nejvíce používaný při jednotlivé expozici



Obrázek 16: Nastavení adaptivní korelace

mezikruhového kanálu.

4.5 Limity PIV

Při měření proudového pole laserovou anemometrií metodou PIV se musí uvažovat různá omezení měřicí techniky. Podle zvolené techniky měření je třeba zvážit volbu jednotlivých předepsaných parametrů, které jsou voleny zkušeností experimentálního pracovníka. Při zvolení nesprávných parametrů dochází k chybným výpočtům a následného chybného vyhodnocení experimentu. Níže jsou ukázány systematické chyby a doporučení pro volbu parametrů.

4.5.1 Ztracené páry

Ztracené páry patří k nejvíce rozšířeným systematickým chybám. K chybě dochází, jestliže nelze k sledované značkovací částici v prvním obrazu najít její protějšek v druhém obrazu, který vystoupil ze sledované roviny, či částici, která do sledované oblasti vstoupila. K tomuto ději dochází v časovém intervalu mezi dvěma laserovými pulsy (=záznamu dvou obrazů) Δt .

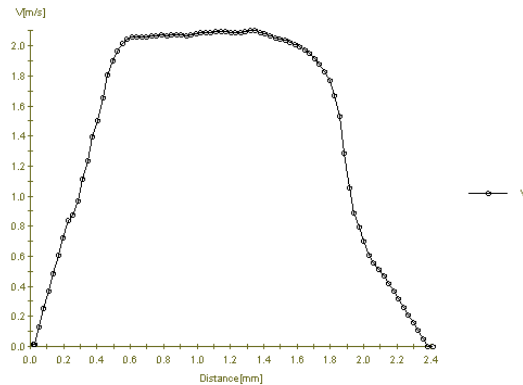
Tento nepříznivý vliv zapříčiňující zvýšení korelačního šumu lze omezit nastavením rychlosti proudu unášející částice, tím se zmenší pravděpodobnost opuštění sledované oblasti. Maximální rychlost značkovacích částic by neměla překročit jednu čtvrtinu sledované oblasti.

4.5.2 Rychlostní gradienty

Pro absolutně přesné vyhodnocení proudového pole je potřeba, aby byl proud ve sledované oblasti ideální:

- homogenní,
- konstantní vzdálenost posunutí částic.

Je-li rychlost ve sledované oblasti konstantní, potom je rychlostní gradient nulový. Tento případ je ideální a tedy neuskutečnitelný v reálném světě. Rychlostní gradienty zhoršují



Obrázek 17: Rychlostní pole distanční mřížky v pozici 2

určení průměrného vektoru posunutí, od kterého se odvíjí chybné určení rychlosti stopových částic v proudu. Jejich rychlost se blíží k nule, neboť narůstá počet ztracených párů, které s rostoucí rychlostí opouštějí sledovanou oblast. Další zhoršení spočívá v nehomogenním rozložení částic ve vyhodnocované oblasti a tím dochází k závislosti posunutí částic na jejich poloze. „Následkem toho rychlostní gradienty zavádějí rostoucí rozptyl v měřených výsledcích“ [12].

Tyto popsané problémy lze z části omezit použitím vhodných metod vyhodnocování a zvýšením hustoty sycení proudu.

Kapitola 5

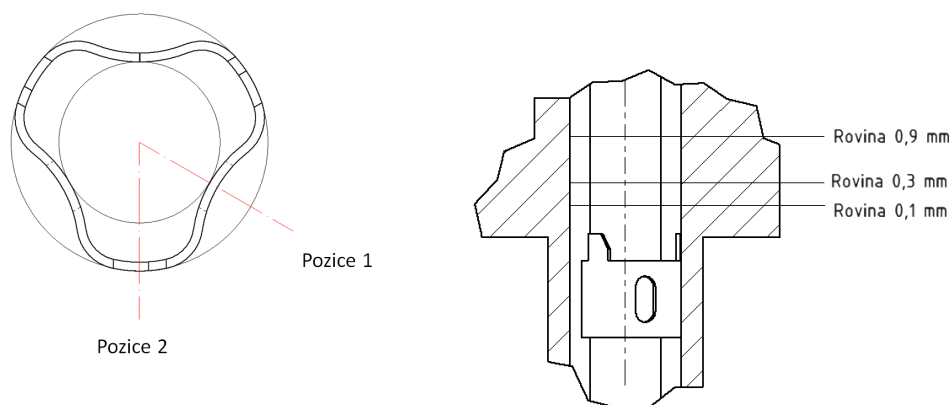
Výsledky

Při experimentálním měření bylo provedeno měření tří typů distančních mřížek:

- distanční mřížka (VAR 1),
- distanční mřížka s mísícími lopatkami (VAR 2),
- distanční mřížka s mísícími lopatkami a otvory (VAR 3).

Měření probíhalo ve dvou rovinách znázorněné na obrázku 18, označené jako pozice 1 a pozice 2. Roviny, ve kterých bylo měření provedeno, jsou vůči sobě natočeny pod úhlem 60° tak, aby jedna rovina procházela oblastí styku distanční mřížky s transparentní trubicí a druhá tak, aby vnitřní stěna transparentní trubice nebyla v kontaktu s distanční mřížkou. Uvedené měřicí roviny jsou totožné pro všechny varianty použitých distančních mřížek, neboť mají společný průřez.

Pravý obrázek 18 poukazuje na umístění tří rovin, které jsou vůči sobě posunuty. Velikost posunutí rovin znázorňuje posunutí rovin v pořízeném záznamu sledované oblasti, dle kterého porovnáváme rychlostní profil proudící kapaliny v rovině 0,1 mm, dále pak v rovině posunuté o 0,3 mm a 0,9 mm oproti první rovině (0,1 mm). Z výsledného proudového pole z tří navzájem posunutých řezů, lze zjistit kvalitu obrazu. Znázorněna proudová pole jsou pro složku rychlosti v , tedy pro rychlost podél palivové tyče. Složka rychlosti u je v příčné ose, která je totožná s osou laserového paprsku a je kolmá na složku rychlosti v .



Obrázek 18: Měřicí roviny

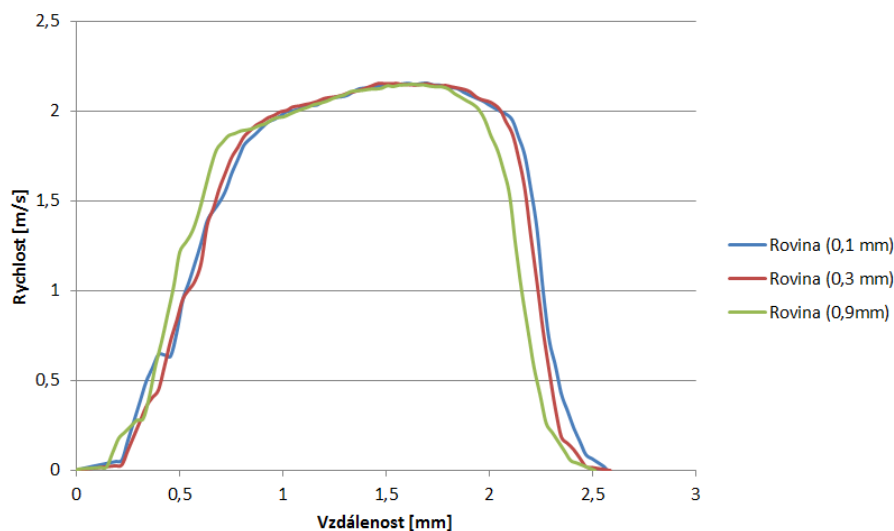
5.1 Vyvinutí profilu po délce palivové tyče, pozice 1

Vyhodnocovaná oblast měřeného proudového pole na pozici 1 se nachází mezi vnitřním průměrem transparentní trubice a vnitřním rádiem distanční mřížky spojené s palivovou tyčí. Teoreticky by maximální šířka rychlostního profilu měla být rovna délce mezi transparentní palivovou tyčí a distanční mřížkou rovnající se $2,5\text{ mm}$. Této šířce rychlostního profilu v pozici 1 odpovídá pouze distanční mřížka (VAR 1). Šířka proudového pole zbylých distančních mřížek již neodpovídá teoretické vzdálenosti. Tento nesoulad lze vysvětlit nepřesnou výrobou jednotlivých distančních mřížek a součtem jednotlivých problémů při samotné výrobě (uvedeno výše). K nepřesnosti došlo nepozorností a nedůsledností při výrobě.

5.1.1 Distanční mřížka (VAR 1)

Na obrázku 19 jsou zobrazeny tři rychlostní profily pro distanční mřížku bez lopatek (VAR 1) na pozici 1. Každý rychlostní profil patří posouvající se rovině, která se mění se po délce palivové tyče vzhůru. Z obrázku je patrný parabolický tvar rychlostního profilu, který je pro všechny tři pozice téměř totožný. Maximální rychlost je dosahována ve středu měřené štěrbině a dosahuje hodnoty kolem $2,1\text{ m/s}$. Pořízené rychlostní profily poukazují na dobrou kvalitu pořízeného obrazu a současně na vhodně použitou koncentraci skleněných částic ve vodě, neboť částice jsou v proudu dostatečně rozvrstveny tak, že i při posunutí roviny v pořízeném záznamu, zůstává rychlostní profil téměř neměnný.

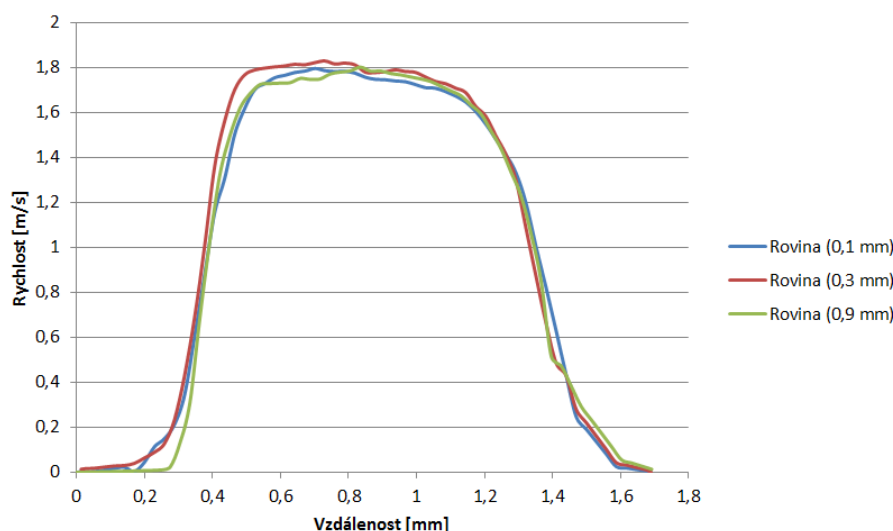
Šířka rychlostního profilu je totožná s teoretickou vzdáleností mezi transparentní palivovou tyčí a distanční mřížkou. A proto v tomto případě nedošlo při výrobě distanční mřížky a následně k jejímu naletování na palivovou tyč k žádné deformaci, či špatnému uložení na palivovou tyč.



Obrázek 19: Rychlostní profily VAR 1 pro pozici 1

5.1.2 Distanční mřížka s lopatkami (VAR 2)

Rychlostní profily distanční mřížky s lopatkami (VAR 2) jsou znázorněné na obrázku 20. Distanční mřížka obsahuje mísící lopatky, které jsou ohnuty směrem k palivové tyči podle roviny svírající úhel 45° . Z rychlostního profilu je patrné, že profil je turbulentní, neboť tvar profilu v oblasti maximálních hodnot je plošší. Tím je energie turbulentního proudu více rozložena v šířce proudu. Maximální rychlost dosahuje nižších hodnot než u rychlostního profilu distanční mřížky (VAR 1) znázorněnou výše. Rychlost dosahuje hodnoty téměř $1,8 \text{ m/s}$. Užší šířka rychlostního pole je způsobena měřením mřížky v místě, kde byla mřížka pájena. Vzniklý svar nebyl dokonale začištěn, a tím došlo k zmenšení měřené oblasti mezi transparentní trubicí a distanční mřížkou. Při dalším měření je třeba se tomuto problému vyvarovat a neopakovat jej.

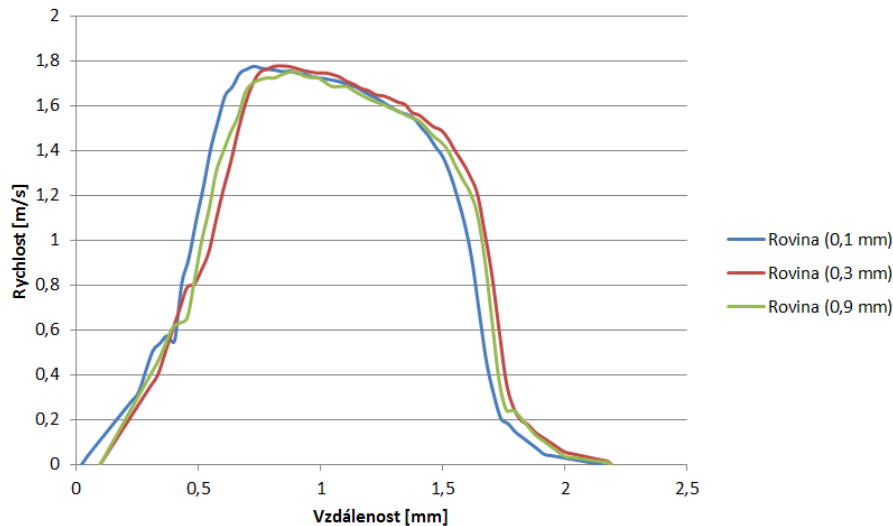


Obrázek 20: Rychlostní profily VAR 2 pro pozici 1

5.1.3 Distanční mřížka s lopatkami a otvory (VAR 3)

Při měření distanční mřížky s lopatkami a oválným otvorem na pozici 1 byla distanční mřížka nastavena oválným otvorem proti laserovému paprsku. Předpokládá se, že by rychlostní profil měl být ovlivněn oválným otvorem, který zde slouží jako rozrušující člen souvislého povrchu distanční mřížky. Z obrázku 21 je patrný rychlostní profil nabývající maximální rychlosti proudu blíže transparentní trubicí o hodnotě $1,8 \text{ m/s}$. Rychlosti protékajícího proudu procházejícího přes distanční mřížky s lopatkami (VAR 2) a této distanční mřížky (VAR 3) dosahují blízkých maximálních hodnot. Přesto se rychlostní profily značně liší. Tuto změnu by mohl vyvolat oválný otvor, který doléhá na palivovou tyč. I v tomto případě jsou rychlostní profily téměř stejné, a tedy po délce sledované oblasti zůstávají neměnné.

Šířka proudového pole, která dosahuje velikosti 2 mm , je mešší než teoretická vzdálenost. Po ukončení měření, byla tato distanční mřížka překontrolována a bylo zjištěno, že geometrická osa distanční mřížky nesouhlasí s geometrickou osou palivové tyče. To znamená, že distanční mřížka byla vůči palivové tyči excentricky uložena. Zbylé kanálky, které jsou vytvořeny pomocí distanční mřížky, se velikostně liší.



Obrázek 21: Rychlostní profily VAR 3 pro pozici 1

5.2 Vyvinutí profilu po délce palivové tyče, pozice 2

Proudící kapalina při měření v pozici 2 prochází otvorem vznikající mezi palivovou tyčí a distanční mřížkou patrné z obrázku 18. Při volbě distanční mřížky s lopatkami dochází v tomto místě ke zmenšení průřezu, neboť jsou mísící lopatky přikloněny směrem k tyči.

Natáčení distanční mřížky z pozice 1 do pozice 2 bylo prováděno natáčením měděné elektrody, která měla na svém konci vytvořený čep, který byl naražen do palivového proutku. Elektroda je uložena ve výstupní hlavici experimentálního zařízení umístěná v horní části experimentálního zařízení. Za účelem správného natočení distanční mřížky byly na palivovém proutku vyryty dvě svislé přímky, podle kterých bylo natáčení palivové tyče prováděno.

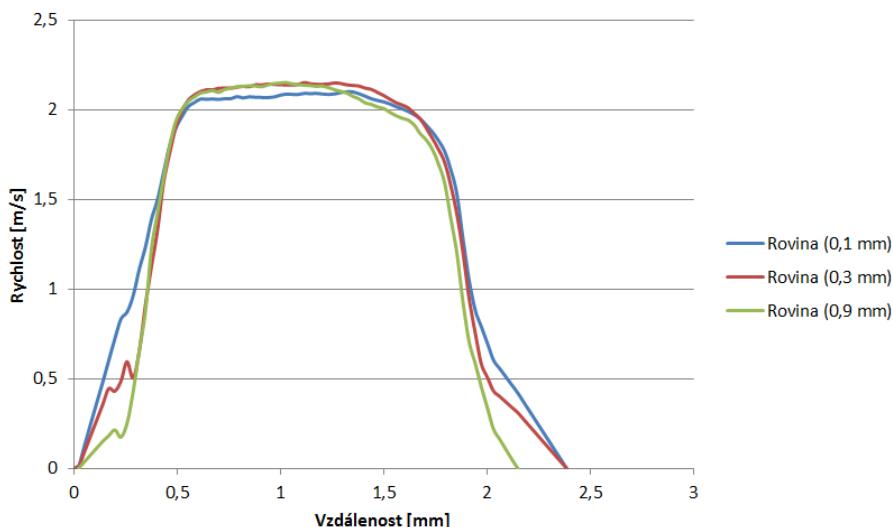
5.2.1 Distanční mřížka (VAR 1)

Rychlostní profily tří posouvajících se rovin po délce palivové tyče ve sledované oblasti, závislé na distanční mřížce (VAR 1) jsou znázorněny na obrázku 22. Z obrázku můžeme opět vidět vysokou podobnost rychlostních profilů. Tvar rychlostního profilu odpovídá turbulentnímu proudění, neboť profil je velice široký a velice rychle nabývá maximálních hodnot. Oblast, kde je dosahováno maximální rychlosti proudění, je velice široká a tvar křivky zde odpovídá téměř přímce. Maximální rychlost proudu je $2,2 \text{ m/s}$.

Šířka rychlostního pole, stejně tak jako u pozice 1, téměř odpovídá teoretické vzdálenosti mezi distanční mřížkou a palivovou tyčí. Můžeme tedy předpokládat, že distanční mřížka (VAR 1) byla z konstrukčního hlediska vyrobena správně a neovlivňuje zjištěné výsledky.

5.2.2 Distanční mřížka s lopatkami (VAR 2)

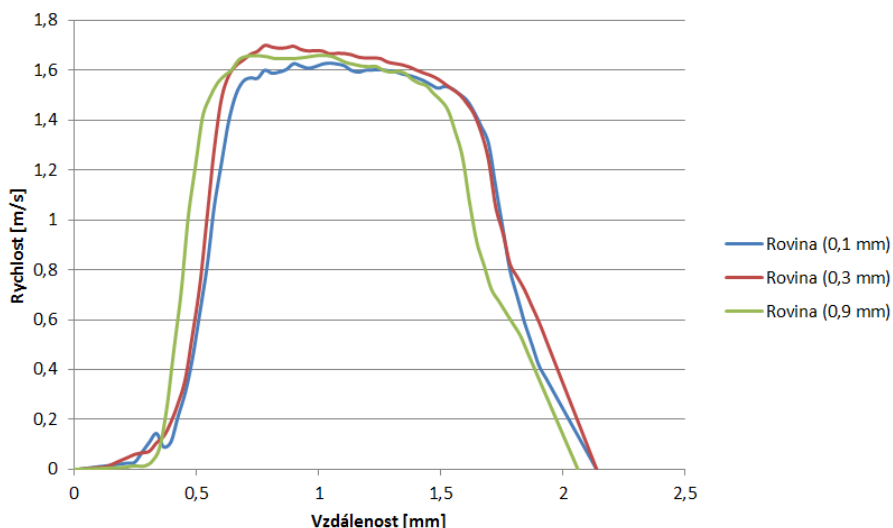
Rychlostní profil media proudící přes distanční mřížku s mísícími lopatkami (VAR 2) je znázorněn na obrázku 23. Z obrázku je patrné, že dosahovaná maximální rychlost kapaliny se blíží k hodnotě $1,7 \text{ m/s}$. Tato rychlost je v horní části rychlostního profilu téměř



Obrázek 22: Rychlostní profily VAR 1 pro pozici 2

konstantní, což poukazuje na turbulentní proudění, které se vyznačuje rovnoměrným rozložením energie proudu.

Mísící lopatka umístěna v horní části distanční mřížky procházející měřenou rovinou ovlivňuje levou část rychlostního profilu. Rychlostní profil nenabíhá přímo jako u distanční mřížky (VAR 1). Zpočátku se vyznačuje velmi pomalým nárůstem v závislosti na vzdálenosti od transparentní trubice, kde dochází ke styku mezi distanční mřížkou a transparentní trubicí. Z obrázku 23 je patrné, že k velkému nárůstu rychlosti dochází až ve vzdálenosti 0,4 mm od trubice, kde je nárůst ve složce rychlosti ve směru v dosti výrazný.



Obrázek 23: Rychlostní profily VAR 2 pro pozici 2

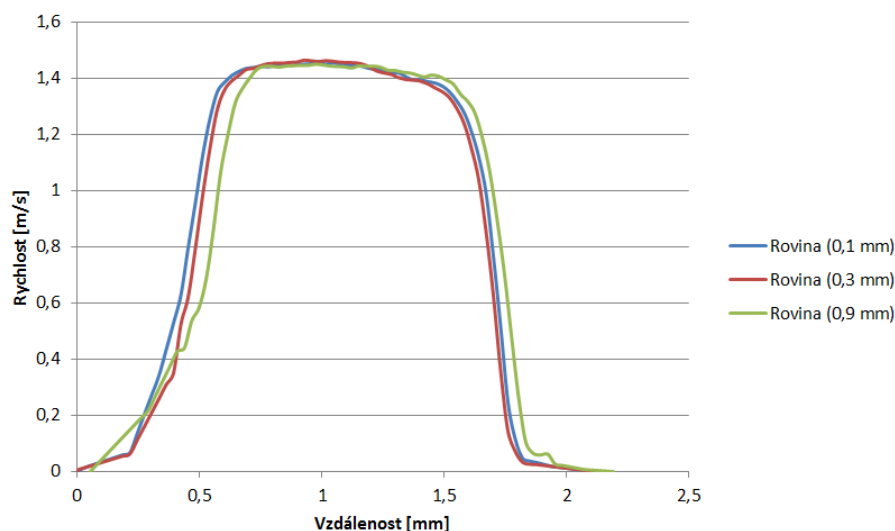
5.2.3 Distanční mřížka s lopatkami a otvory (VAR 3)

Distanční mřížka s lopatkami a otvory (VAR 3) nastavená na pozici 2 zobrazená na obrázku 24 má téměř stejný rychlostní profil jako distanční mřížka s lopatkami (VAR 2), neboť proudění ve sledované oblasti za distanční mřížkou nejvíce ovlivňuje mísící lopatka.

K největšímu nárůstu složky rychlosti v dochází ve vzdálenosti $0,3\text{mm}$ od transparentní trubice. Do této vzdálenosti ovlivňuje mísící lopatka rychlostní profil proudící kapaliny. Svým vyklenutím směrem k palivovému článku způsobuje zpomalování proudu, který prochází sledovanou šterbinou.

Získané rychlostní profily média patřící různým rovinám znázorněných v obrázku 18 jsou téměř totožné. Z tohoto je patrné, že proud obsahuje dostatečný počet skleněných částic pro vyhodnocení pomocí adaptivní korelace a současně je zajištěna dobrá kvalita obrazu.

Dále je patrné, že šířka rychlostního pole je 2mm . Tato anomálie může být způsobena nepatrným vyklenutím palivové tyče v transparentní trubici či špatným konstrukčním zpracováním.



Obrázek 24: Rychlostní profily VAR 3 pro pozici 2

5.3 Vzájemné porovnání distančních mřížek

V této části budou znázorněny a porovnány rychlostní pole navržených distančních mřížek pro pozici 1 a pozici 2. Z výše uvedeného textu je patrné, že samotné porovnávání tří variant distančních mřížek je velice problematické. Z hlediska použité aparatury, konstrukčního zpracování. Je potřeba na získané výsledky pohlížet jako na snahu srovnání tří rozdílných distančních mřížek mezi sebou.

5.3.1 Porovnání distančních mřížek, pozice 1

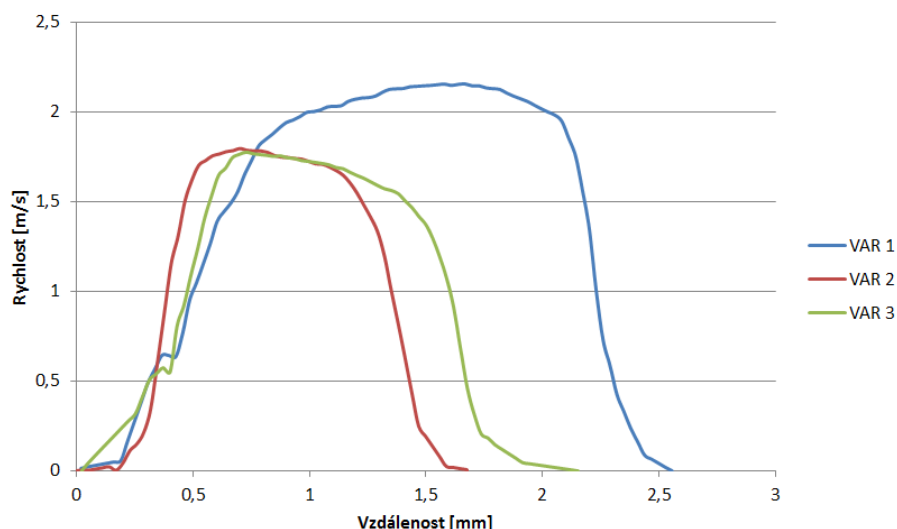
Získané rychlostní profily jednotlivých distančních mřížek měřené na pozici 1 ve výchozí rovině jsou znázorněny na obrázku 25. Z vodorovné osy znázorňující šířku rychlostního profilu kapaliny je patrné, že rozdíl maximální a minimální šířky proudu je až 1mm (rozdíl

VAR 1 a VAR 2). Tento nesoulad může být způsobený výše uvedenými nedostatky, které jsou:

- vyklonění tyče,
- neočištění svaru,
- excentrické uložení dist. mřížky na palivové tyči.

Svislá osa znázorňuje rychlost proudící kapaliny v měřené rovině. Z obrázku je patrné, že největší rychlosti dosahovala distanční mřížka (VAR 1). V tomto případě dosahovalo proudění za mřížkou maximální rychlosti $2,1\text{ m/s}$. Proudění, které bylo ovlivňováno zbylými distančními mřížkami (VAR 2) a (VAR 3), dosahovalo maximálních rychlostí v oblasti blízko povrchu transparentní trubice a to $1,8\text{ m/s}$.

Rozdíl rychlostí může způsobovat excentricky uložená distanční mřížka, která je měřena v užší části kanálu, kdy dochází ke zvýšení rychlosti proudění v okolních kanálech. Druhou možností je ovlivnění proudící kapaliny modifikovanou distanční mřížkou, kde by hlavní úlohu ovlivňující rozdíl rychlostí proudu za překážkou způsobovala mísící lopatka.

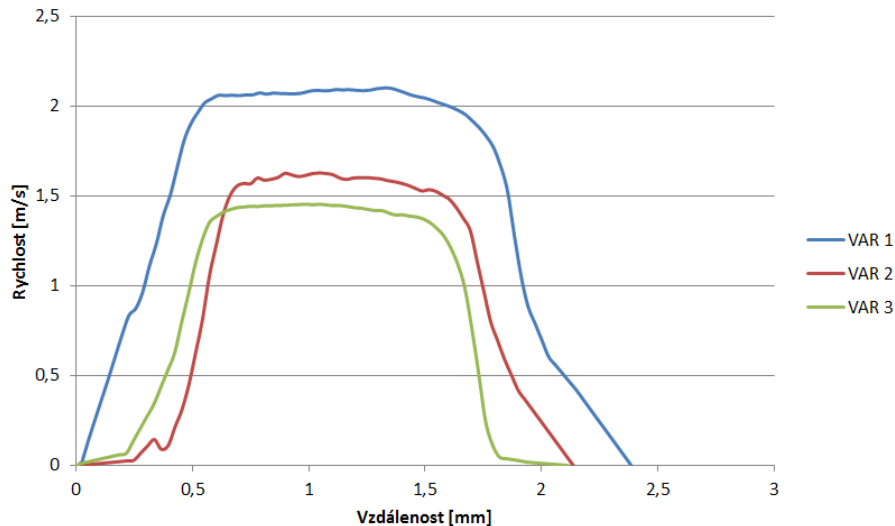


Obrázek 25: Rychlostní profily pro pozici 1

5.3.2 Porovnání distančních mřížek, pozice 2

Obrázek 26 znázorňuje rychlostní profily proudícího média za distanční mřížkou. Měřená rovina leží na pozici 2, jde tedy o podélnou rovinu procházející středem vnějšího rádiusu distanční mřížky. Z obrázku je opět patrné, že šířka rychlostního profilu pro mřížku s lopatkami (VAR 2 a VAR 3) je užší než u distanční mřížky VAR 1. Tento rozdíl vzdáleností sledovaných oblastí je popsán v textu výše.

Rychlosti proudící kapaliny, které jsou znázorněny na svislé ose, se pro jednotlivé typy liší. Největší rozdíl rychlostí je u distančních mřížek (VAR 1) a (VAR 3). Tento rozdíl může způsobovat mísící lopatka, která způsobuje zpomalování proudící kapaliny. Z obrázku je patrná funkce mísící lopatky pro distanční mřížku (VAR 2) a (VAR 3), neboť rychlostní profil nenabíhá přímo od počátku, ale až od určité vzdálenosti.



Obrázek 26: Rychlostní profily pro pozici 2

5.4 Výsledné zhodnocení

Pomocí získaných a vyhodnocených rychlostních profilů můžeme nyní zhodnotit vliv distanční mřížky na proudící kapalinu. Při srovnání distanční mřížky s mísícími lopatkami (VAR 2) a distanční mřížky s mísícími lopatkami a otvory (VAR 3) nebyla zjištěna žádná výrazná změna rychlostního pole. Podle tohoto zjištění, vytvořené oválné otvory na vnitřních rádiusech se nikterak zvláště nepodílely na změně rychlostního pole. Můžeme tedy prohlásit, že oválné otvory neměly význam na změnu rychlostního profilu proudícího média kolem palivové tyče.

Při porovnání rychlostních profilů ve složce rychlosti v od distanční mřížky (VAR 1) a distanční mřížky s lopatkami (VAR 2), je patrná jejich výrazná změna. Rychlostní profil pro VAR 2 nedosahuje vyšší rychlosti proudící kapaliny v žádné měřené pozici. Z tohoto důvodu můžeme říci, že předpoklad pro zvýšení rychlosti v ostatních kanálech se nepotvrdil, přesto toto tvrzení nemůžeme vyvrátit. Pro vyslovení správného tvrzení by muselo být provedeno další měření v různých měřících rovinách na distanční mřížce.

Proto jsme dále vyhodnotili rychlostní profil ve složce u , znázorněného v příloze na obrázku 38, ze kterého vyplývá, že tento rychlostní profil by tak výrazně neovlivnil rozdíly rychlostí ve složce v proudícího média. Proto můžeme s opatrností prohlásit, že tento rozdíl rychlostí je způsoben třetí složkou rychlosti, která je kolmá na sledovanou oblast. Distanční mřížka opatřená mísícími lopatkami má za následek vznik silnějšího turbulentního proudění v oblasti za ní. Tím dochází ke zvýšení součinitele přestupu tepla mezi palivovou tyčí a chladící kapalinou.

Kapitola 6

Závěr

6.1 Závěrečné shrnutí

Cílem práce bylo navržení distanční mřížky, která způsobí zvýšení intenzity turbulentního proudění po průchodu kapaliny distanční mřížkou. Dále bylo realizováno experimentální měření pro jednotlivé mřížky a vyhodnocení výsledků z něho porízené.

Na počátku byla zpracována rešeršní práce týkající se základní funkce distanční mřížky, zabýval jsem se problematikou používaných konstrukčních materiálů, zpracováním některých používaných či patentovaných typů distančních mřížek. Distanční mřížky, které slouží pro přesné ustavení palivových tyčí v aktivní zóně jaderného reaktoru PWR, či BWR, současně však plní i funkci turbolizátoru proudící kapaliny, zajišťující přestup tepla mezi palivovou tyčí a chladící kapalinou.

Navržené distanční mřížky vycházejí z informací získané při zpracování rešeršní práce. Distanční mřížky mající stejný průřez se liší konstrukční modifikací spočívající v přidání některých prvků, které by měly vést ke zvýšení turbulence. Pro ověření daných předpokladů bylo uvedeno do provozu experimentální zařízení pro měření proudového pole pomocí laserové anemometrie metodou PIV. Současně bylo provedeno nastudování manuálu pro práci s měřicí aparaturou, používané pro tuto metodu.

Z výsledků porízených pomocí experimentálního měření vyplývá, že proudové pole dosahuje vyšší intenzity turbulentního proudění při průchodu kapaliny distanční mřížkou obsahující mísící lopatky, než u distanční mřížky (VAR 1). Toto zjištění poukazuje na předpokládané zvýšení součinitele přestupu tepla mezi palivovou tyčí a proudící chladící kapalinou (v případě PWR).

Je třeba si uvědomit, že bylo provedeno dvourozměrné měření turbulentního proudění, které je vždy třírozměrné a vyznačuje se mnoha dalšími atributy. Proto získané měření nelze prohlásit za plně průkazné. Abychom dosáhli zlepšení výsledků měření, muselo by dojít k upravení experimentálního zařízení tak, aby bylo schopné měřit metodou 3D PIV, které má průkaznější výsledky. Při výrobě distančních mřížek dochází k několika problémům, které způsobují odlišnosti v proudovém poli a na tyto problémy je třeba se zaměřit.

Oblast zabývající se jadernou energetikou je velice zajímavá, neboť je velice rozmanitá. Při zpracovávání potřebných informací zabývající se tímto tématem jsem naplno využil znalosti získané během studia. Současně jsem využil své praktické dovednosti pro výrobu jednotlivých distančních mřížek. Distanční mřížky byly navrženy, vyrobeny a použity pro měření proudového pole za překážkou.

Literatura

- [1] TALEYARKHAN, RUSI P. *BWR fuel assembly having fuel rod spacers axially positioned by exterior springs [patent]. patent, US19860888294. Uděleno 1988.* Dostupné z: <http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=4740350A&KC=A&FT=D>
- [2] *Reactor Grade Zirconium Alloys for Nuclear Waste Disposal. [online]. [cit. 2015-03-12].* Dostupné z: <https://www.atimetals.com/businesses/atispecialtyalloysandcomponents/products/Documents/Zr%20nuke%20waste%20disposal.pdf>
- [3] *Zircaloy-4 (Alloy Zr4) (UNS R60804). [online]. [cit. 2015-03-12].* Dostupné z: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7644>
- [4] *INCONEL® alloy 600 (UNS N06600). [online]. [cit. 2015-03-12].* Dostupné z: <http://www.hpalloy.com/alloys/descriptions/INCONEL600.html>
- [5] *Nerez. [online]. [cit. 2015-03-12].* Dostupné z: <http://www.koenigfrankstahl.sk/produkty/nerez/>
- [6] *SPECIFIKACE NEREZOVÝCH MATERIÁLŮ. [online]. [cit. 2015-03-12].* Dostupné z: <http://www.armat.cz/pdf/specifikace-nerezovych-oceli-chemicke-slozeni.pdf>
- [7] CHO, Seok, Sang-Ki MOON, Se-Young CHUN, Yeon-Sik KIM a Won-Pil BAEK. *Spacer Grid Effects during a Reflood in an Annulus Flow Channel [online]. 28 Mar 2007 [cit. 2014-12-28]. ISBN 10.1080/18811248.2007.9711336.* dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/18811248.2007.9711336>
- [8] LEONARD F P, VAN SWAM. *Pressurized water reactor fuel assembly spacer grid First Previous Next Last Page [patent]. US. US6519309 (B1). Uděleno 2003.* Dostupné z: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=6519309B1&KC=B1&FT=D&ND=&date=20030211&DB=&locale=en_EP
- [9] PATTERSON, John F., Wayne A. VONOLNHAUSEN. *Mixing grid. [online]. [cit. 2014-12-28].* Dostupné z: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=4726926A&KC=A&FT=D&ND=&date=19880223&DB=&locale=en_EP
- [10] DOMINGUEZ-ONTIVEROS, Elvis E., Yassin A. HASSAN, Michael E. CONNER a Zeses KAROUTAS, *Experimental benchmark data for PWR rod*

bundle with spacer-grids. Nuclear Engineering and Design [online]. 2012, vol. 253, s. 396-405 [cit. 2014-12-28]. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2012.09.003. . Dostupné z: https://www.oecd-nea.org/nsd/csni/cfd/workshops/CFD4NRS-3/technical-papers/4/4.1_Bundle%20Flow.pdf

- [11] LÁVIČKA, David, *Comparison of velocity and temperature fields for two types of spacers in an annular channel. EPJ Web of Conferences [online]. 2012, 25: 01045- [cit. 2015-06-03]. DOI: 10.1051/epjconf/20122501045. ISSN 2100-014x.. Dostupné z: <http://www.epj-conferences.org/10.1051/epjconf/20122501045>*
- [12] KOPECKÝ, Václav, *Laserová anemometrie v mechanice tekutin. Brno: Tribun EU, 2008, 205 s. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-7399-357-3.*
- [13] NOŽIČKA, Jiří, Josef ADAMEC a Jan NOVOTNÝ. *MĚŘENÍ METODOU PIV [online]. : 6 [cit. 2015-06-13].. Dostupné z: <http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2002/setkaniKat.pdf>*

Seznam použitých patentů

[1] TALEYARKHAN, RUSI P. *BWR fuel assembly having fuel rod spacers axially positioned by exterior springs [patent]. patent, US19860888294. Uděleno 1988.* Dostupné z: <http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=US&NR=4740350A&KC=A&FT=D>

[8] LEONARD F P, VAN SWAM, *Pressurized water reactor fuel assembly spacer grid First Previous Next Last Page [patent]. US. US6519309 (B1). Uděleno 2003.* Dostupné z: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=6519309B1&KC=B1&FT=D&ND=&date=20030211&DB=&locale=en_EP

[9] PATTERSON, John F., Wayne A. VONOLNHAUSEN, *Mixing grid. [online]. [cit. 2014-12-28]..* Dostupné z: http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=4726926A&KC=A&FT=D&ND=&date=19880223&DB=&&locale=en_EP

Příloha A

Seznam použitých zkratk

PWR Presurized Water Reactor

VVER Vodo-vodní energetický reaktor

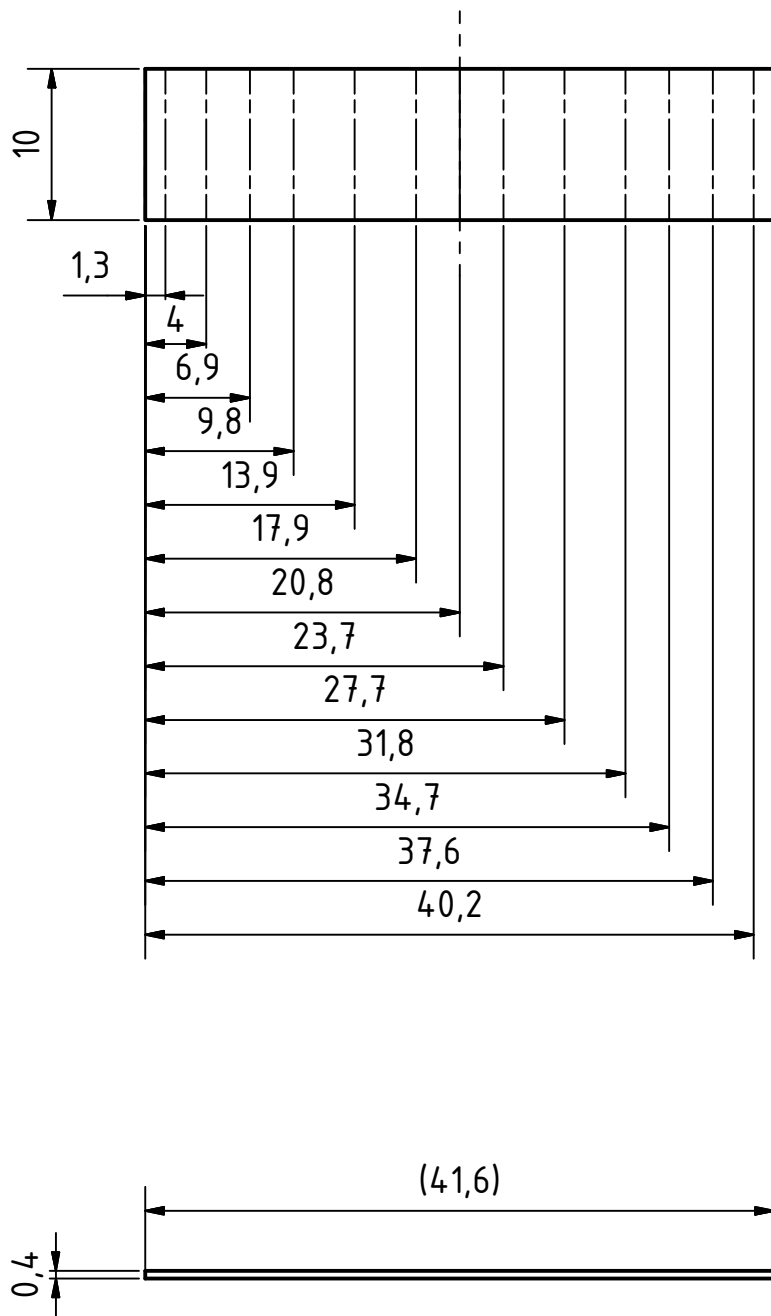
BWR Boiling water reactor

PIV Particle image velocimetry

ČR Česká republika

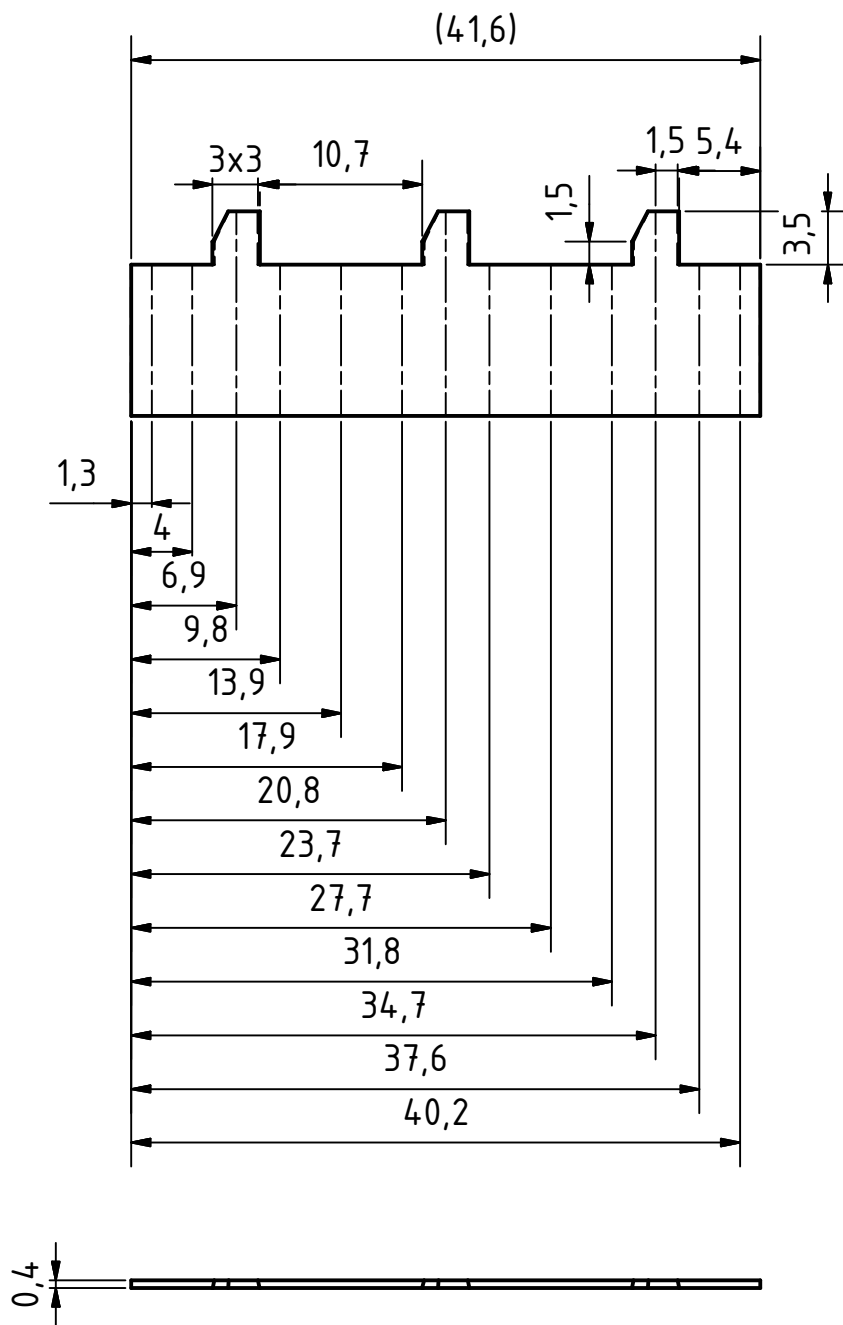
Příloha B

Výrobní výkresy



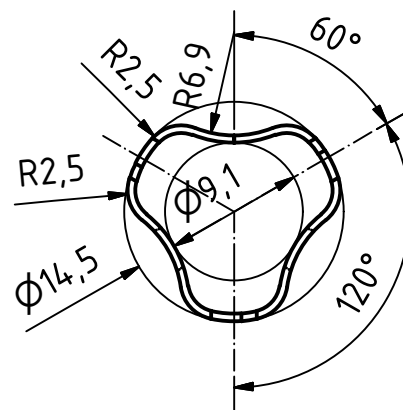
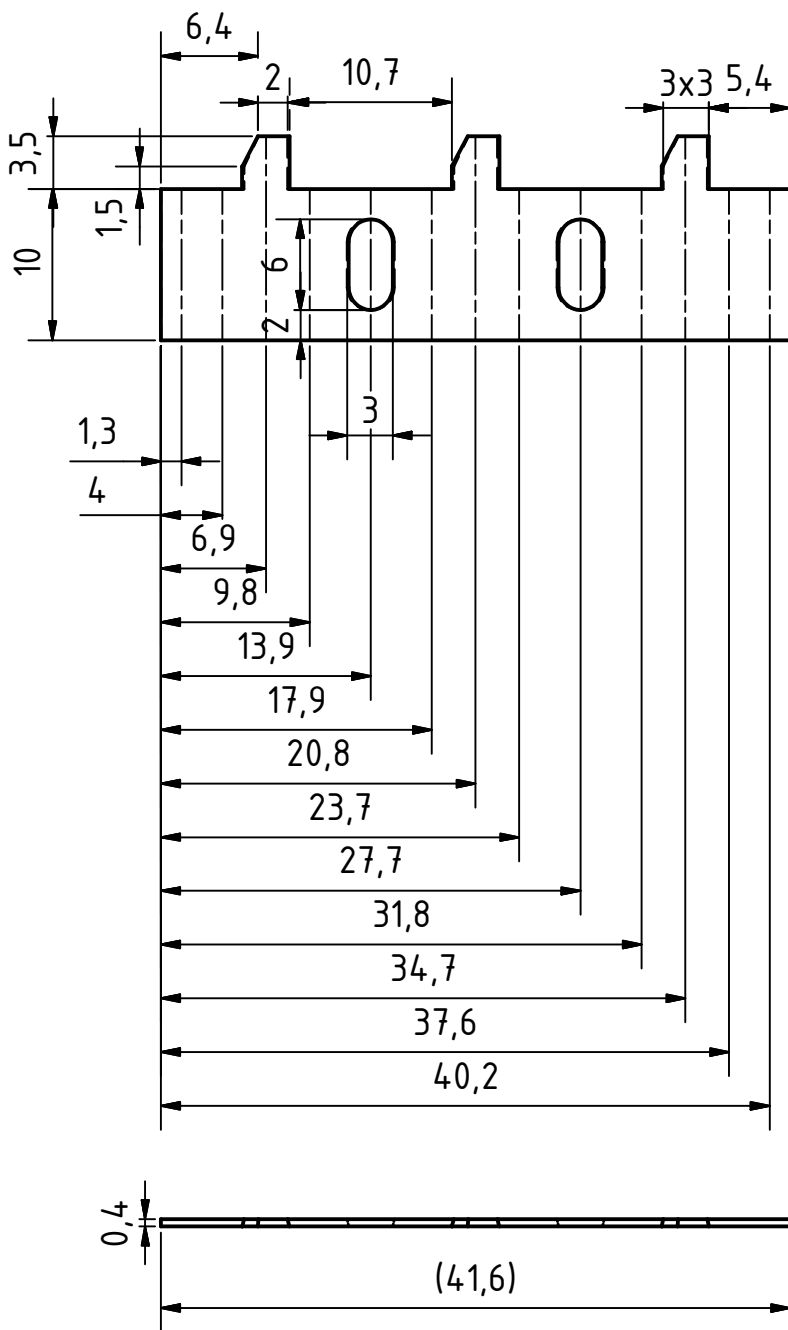
PLECH ZASTŘIHNOUT DLE POŽADOVANÉ DÉLKY PO VYTVAROVÁNÍ

Textura povrchu 	Hrany ISO 13715 	Měřítko 2:1	Přesnost ISO 2768 - mK
		Hmotnost (kg) 0,002	Tolerování ISO 8015
Materiál - Polotovár PLECH 10x54x0,4 X5CrNi18 10		Promítání 	
Kreslil Datum MICHAL TOMÁŠEK 17.3.2015		Formát A4	
	Schválil Datum	Název DISTANČNÍ MŘÍŽKA	
	Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES	Číslo dokumentu DIST-BP-1	
KKE KATEDRA ENERGETICKÝCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ	List 1 Listů 1		



PLECH ZASTŘIHNOUT DLE POŽADOVANÉ DÉLKY PO VYTVAROVÁNÍ

Textura povrchu 	Hrany ISO 13715 	Měřítko 2:1	Přesnost ISO 2768 - mK
		Hmotnost (kg) 0,002	Tolerování ISO 8015
Promítání 		Formát A4	
Materiál - Polotovár PLECH 13x54x0,4 X5CrNi18 10		Název DISTANČNÍ MŘÍŽKA	
	Kreslil MICHAL TOMÁŠEK	Datum 17.3.2015	
	Datum Datum	Číslo dokumentu DIST-BP-2	
KKE KATEDRA ENERGETICKÝCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ	Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES		List 1 Listů 1

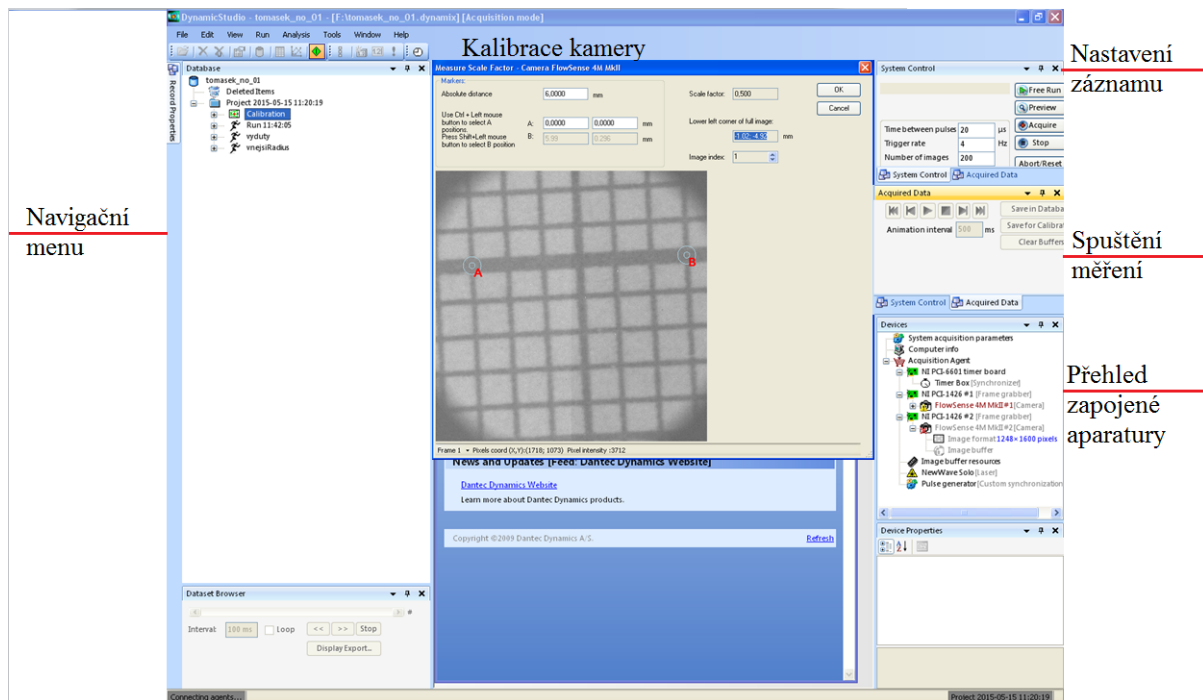


PLECH ZASTŘIHNOUT DLE POŽADOVANÉ DÉLKY PO VYTVAROVÁNÍ

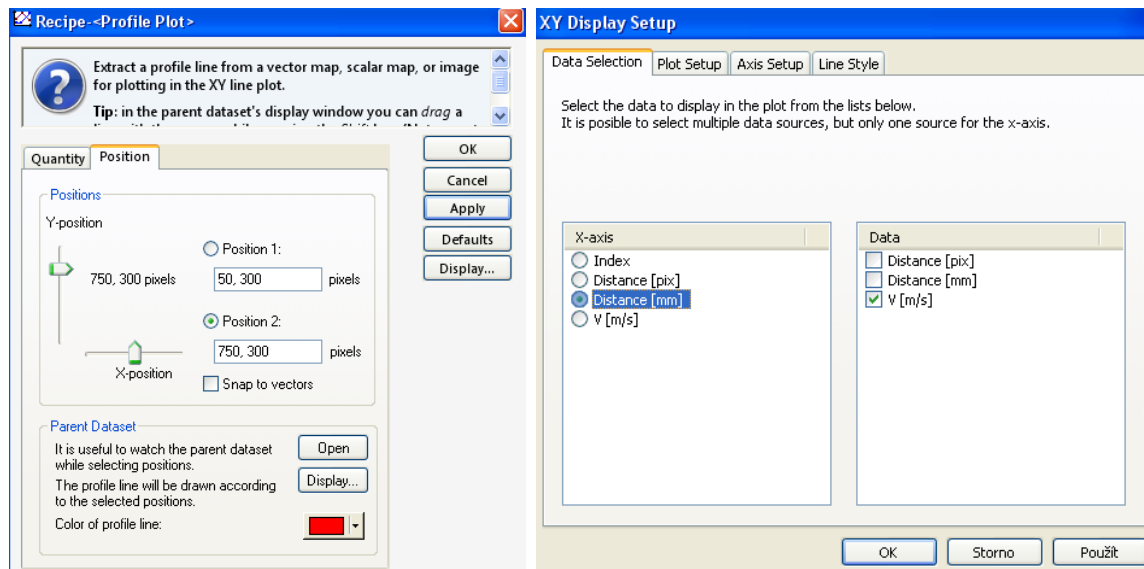
Textura povrchu 		Hrany ISO 13715 		Měřítko 2:1	Přesnost ISO 2768 - mK
				Hmotnost (kg) 0,002	Tolerování ISO 8015
				Promítání 	
Materiál - Polotovár PLECH 13x54x0,4 X5CrNi18 10				Formát A4	
 FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI	Kreslil MICHAL TOMÁŠEK	Název DISTANČNÍ MŘÍŽKA			
	Datum 21.1.2015				
KKE KATEDRA ENERGETICKÝCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ	Schválil	Číslo dokumentu DIST-BP			
	Datum				
Druh dokumentu VÝROBNÍ VÝKRES					

Příloha C

DynamicStudio



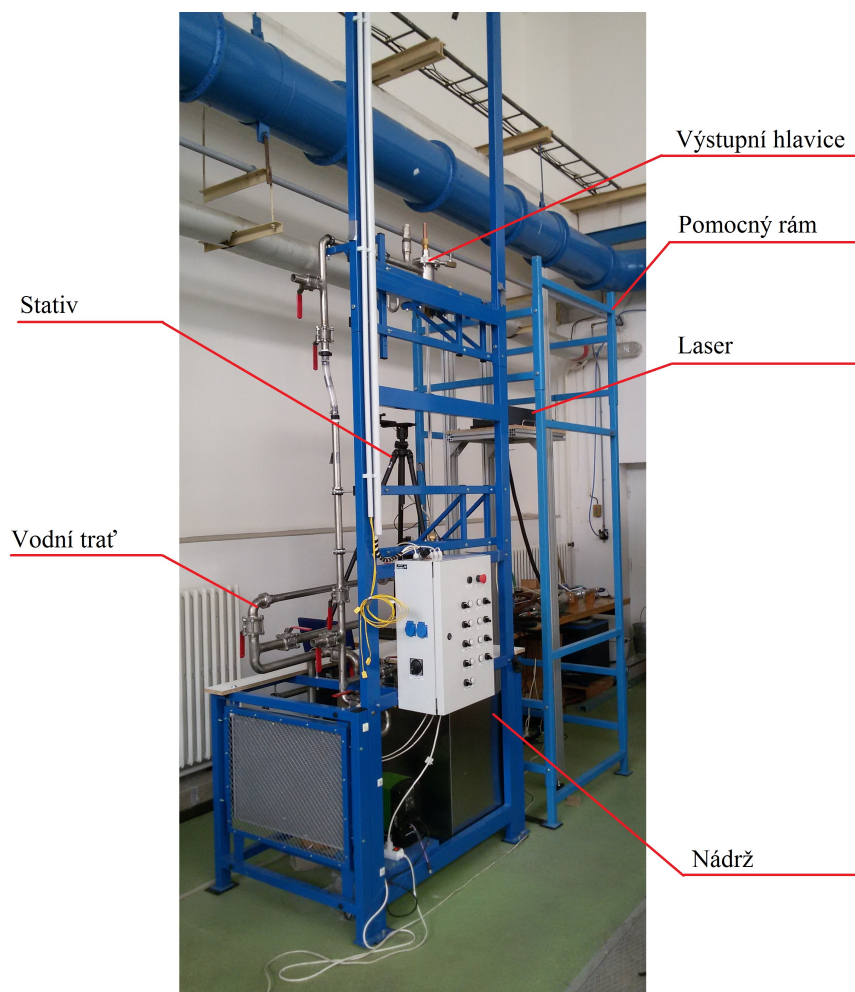
Obrázek 27: Úvodní okno



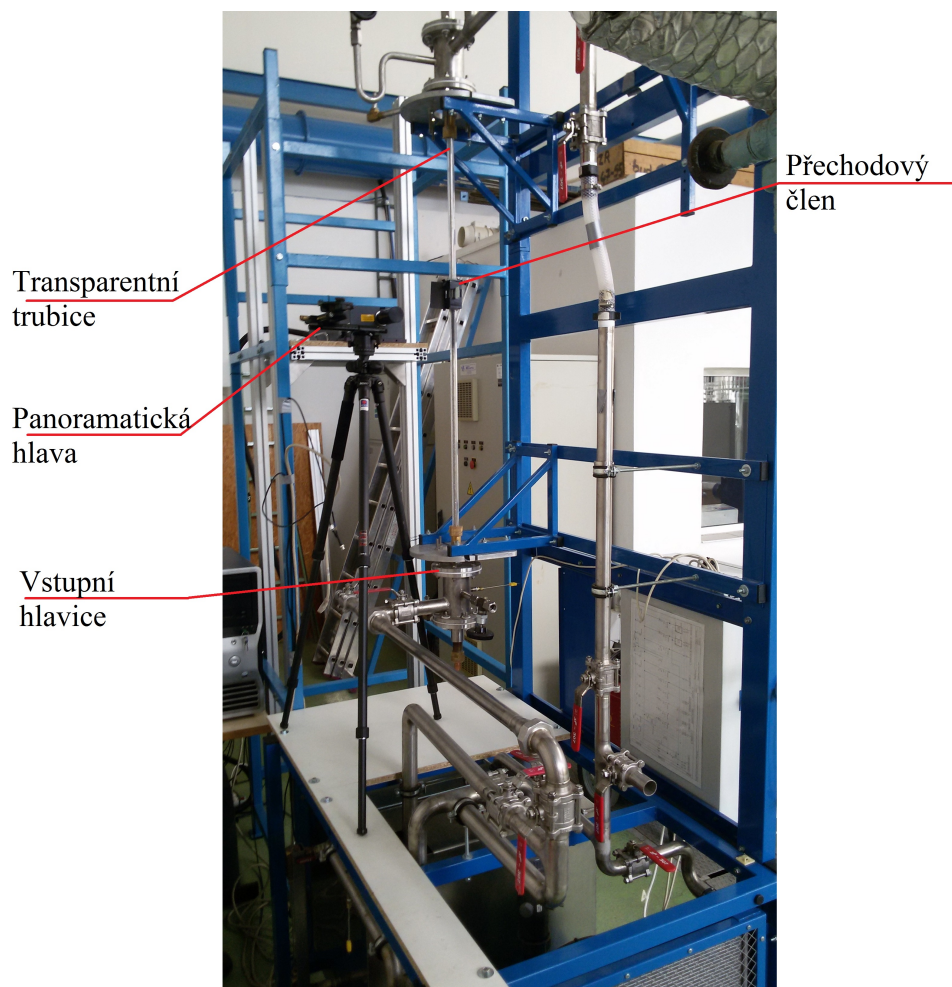
Obrázek 28: Nastavení pro vykreslení proudového pole

Příloha D

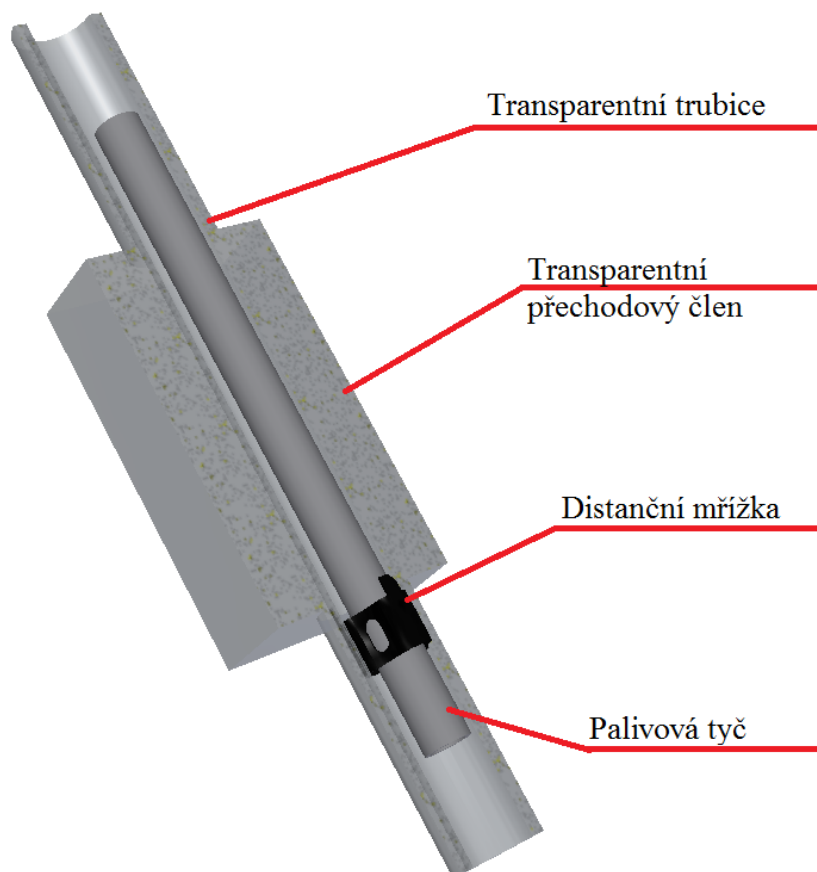
Experimentální zařízení a rychlostní profily



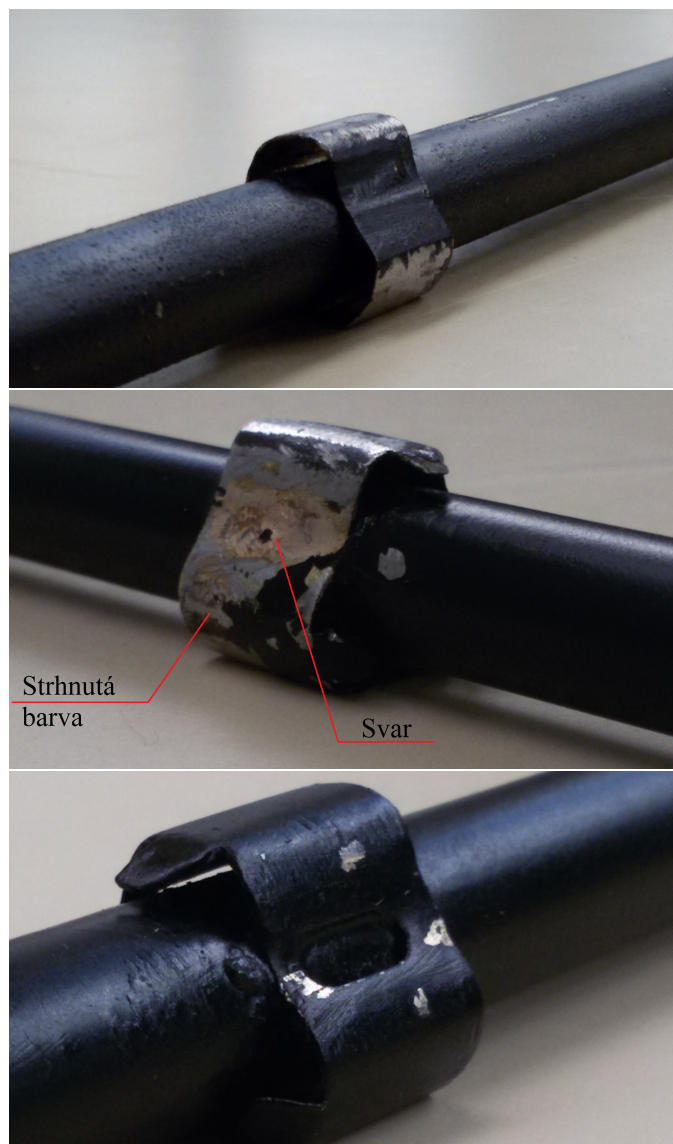
Obrázek 29: Experimentální zařízení



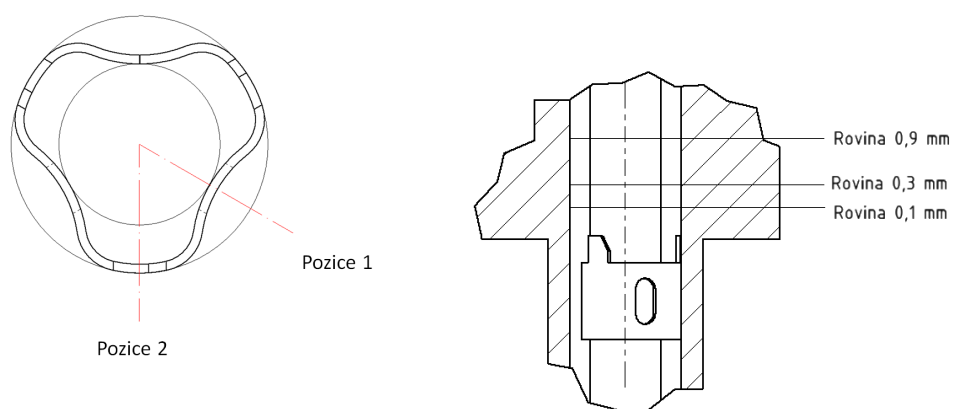
Obrázek 30: Vodní trať experimentálního zařízení



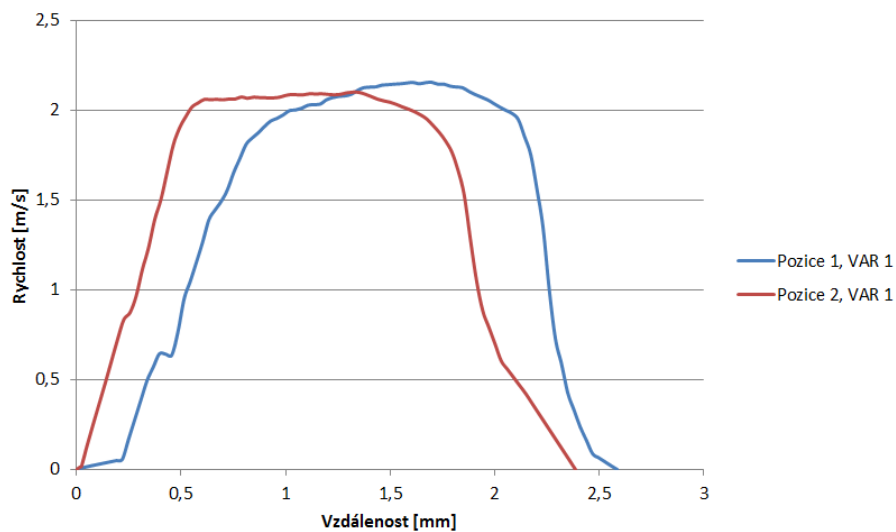
Obrázek 31: Vzájemné uložení palivové tyče s distanční mřížkou v trubici



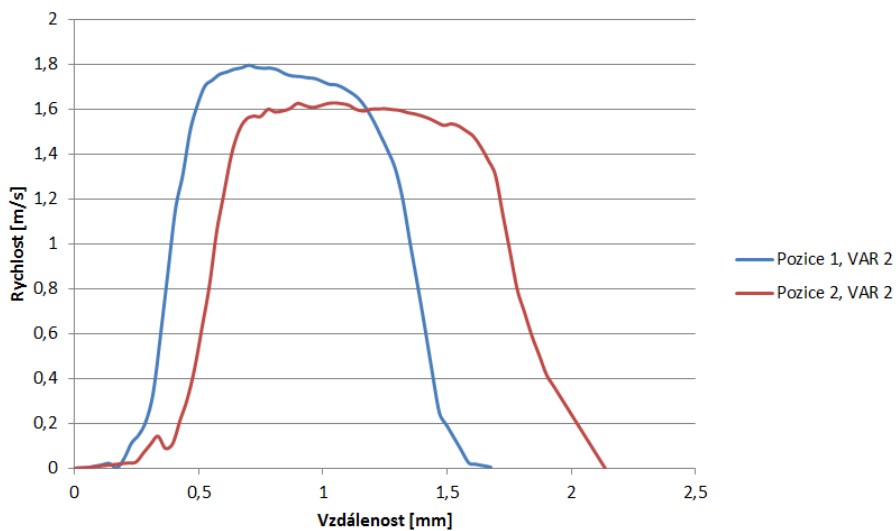
Obrázek 32: Jednotlivé varianty navržených distančních mřížek



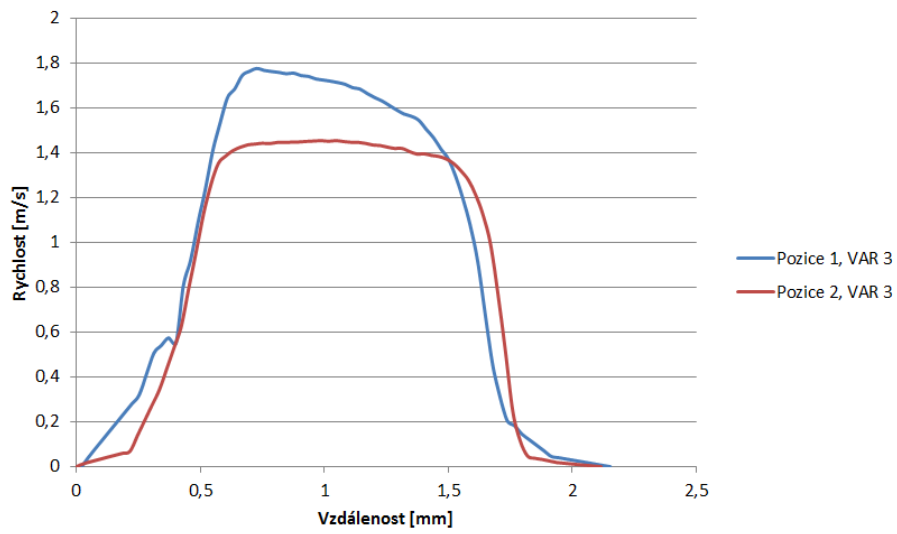
Obrázek 33: Měřící roviny



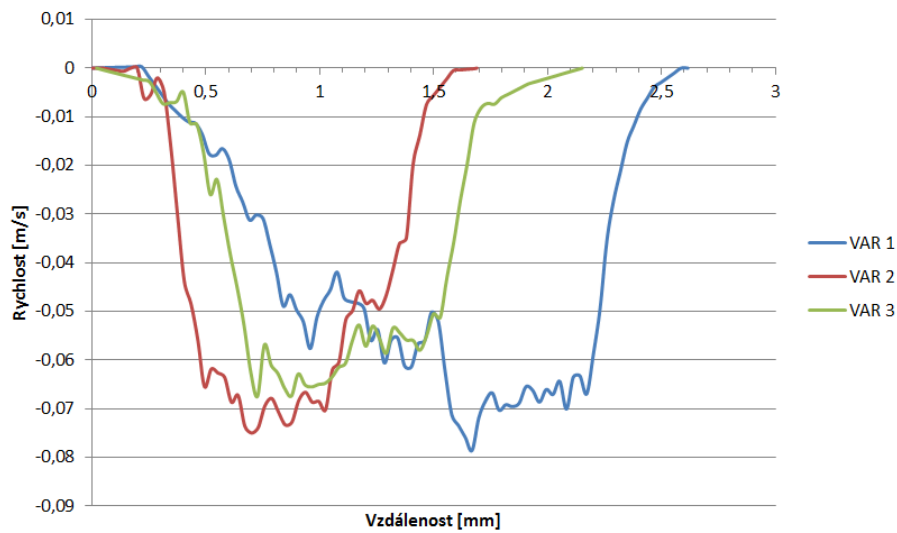
Obrázek 34: Rychlostní profil VAR 1 pro pozici 1 a pozici 2



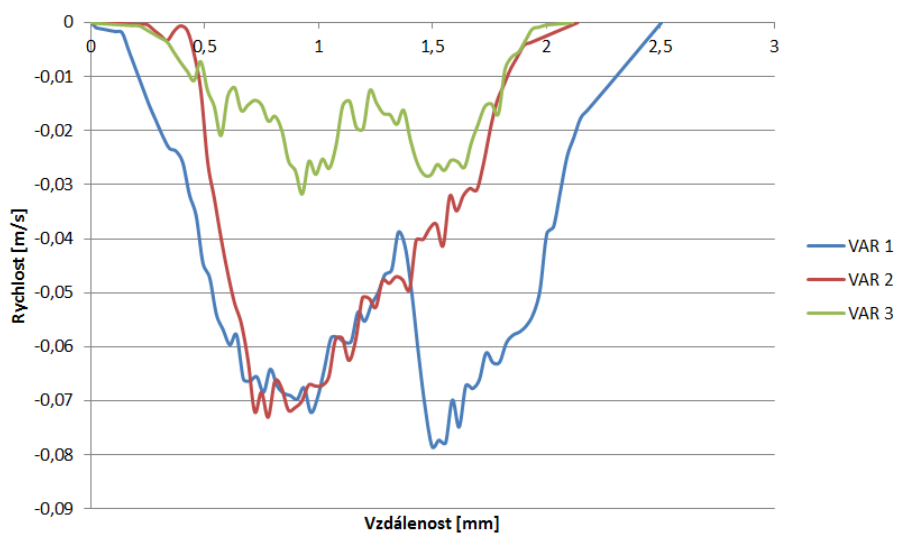
Obrázek 35: Rychlostní profil VAR 2 pro pozici 1 a pozici 2



Obrázek 36: Rychlostní profil VAR 3 pro pozici 1 a pozici 2



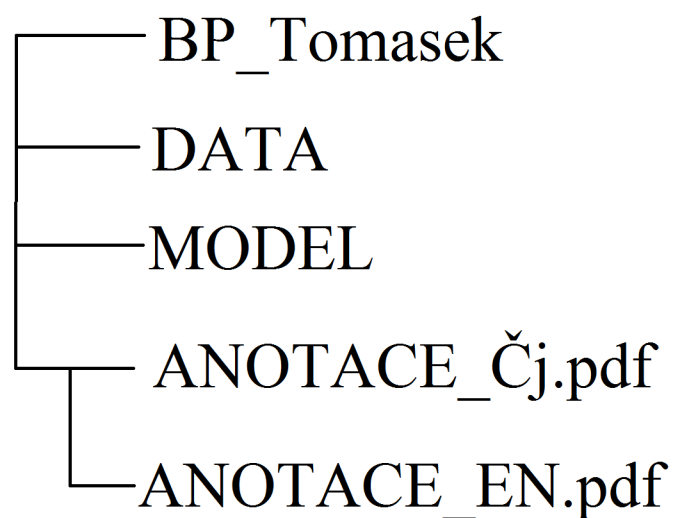
Obrázek 37: Rychlostní profil pozice 1, složka u



Obrázek 38: Rychlostní profil pozice 2, složka u

Příloha E

Obsah přiloženého CD



Obrázek 39: Obsah přiloženého CD