



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM TURBULENCE ZA
DRÁTĚNOU MŘÍŽKOU**

EXPERIMENTAL STUDY OF TURBULENCE DOWNSTREAM OF A WIRE MESH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Uřičář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Lízal, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Filip Uříčář**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. František Lízal, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Experimentální studium turbulence za drátěnou mřížkou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Drátěné mřížky mají široké uplatnění v mnoha praktických oblastech, jsou používány například jako hořáky, generátory či tlumiče turbulence, nebo filtry částic. Pro většinu aplikací je podstatné znát vliv mřížky na tlakové a rychlostní pole v oblasti za mřížkou.

Cíle bakalářské práce:

- Rešerše současného stavu poznání v oblasti generování a tlumení turbulence mřížkou.
- Provedení měření turbulence při různých parametrech proudění.
- Vyhodnocení a analýza naměřených dat.

Seznam literatury:

BRUUN, H. Hot-Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis. Oxford: Oxford University Press, 1995. 507 s. ISBN 0-19-856342-6.

JORGENSEN, F. How to measure turbulence with hot-wire anemometers: a practical guide. 1st edition. [s.l.] : Dantec Dynamics A/S, 2001. 56 s.

PAVELEK, M., ŠTĚTINA, J. Experimentální metody v technice prostředí. Skripta. VUT Brno 2007.

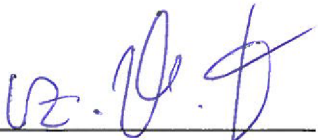
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 10. 11. 2016





doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katoličák, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá studiem proudění za drátěnou mřížkou a skládá se ze tří hlavních částí. V první části je provedena rešerše současného stavu poznání v oblasti generování a tlumení turbulence mřížkou. Ve druhé části jsou uvedeny výsledky experimentálního měření. Ve třetí části práce je provedeno vyhodnocení a analýza naměřených dat.

Pro měření rychlosti byla zvolena metoda žhavených drátků, konkrétně Streamline od firmy Dantec a sestavena měřicí trať na FSI VUT v Brně v laboratoři větracích systémů. Na základě znalostí získaných studiem literatury a konzultacemi, výpočtů a technických možností použitých přístrojů bylo měření za mřížkou provedeno pro průtoky od 150 do 300 litrů za minutu, což bylo dostatečné pro vyvolání turbulentního proudění.

Pro experiment byla zvolena pro jednoduchou realizovatelnost pevná mřížka, přes kterou proudí tekutina.

Klíčová slova

Turbulence, fluktuace rychlosti, drátěná mřížka, měření proudění, metoda žhaveného drátku s konstantní teplotou čidla

Abstract

This bachelor's thesis is focused on the convection behind a mesh grid and consists of three parts. The first part presents current of knowledge in the generation and damping of the turbulence by the mesh grid. The second part presents experimental results of the measurement. The third part of the thesis is focused on experimental data processing and analysis.

The method of hot wire anemometry was chosen for the speed measurement, namely Streamline by Dantec and for experimental purposes track had been constructed in the Laboratory of Ventilation Systems at the Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology. Based on the knowledge gained from the study of literature and the consultations, calculations and technical possibilities of the instruments used, grid measurements were performed for convection from 150 to 300 liters per minute, which was sufficient to generate turbulent flow.

For the experiment, a solid grid through which the fluid flows has been chosen, due to feasibility of the experiment.

Key words

Turbulence, deviation of velocity, wire mesh, measurement of flow, hot wire anemometry, constant temperature anemometry

Bibliografická citace

UŘIČÁŘ, F. *Experimentální studium turbulence za drátěnou mřížkou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Lízal, Ph.D.

Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu této bakalářské práce Ing. Františku Lízalovi, Ph.D. za odborné rady, konzultace a pomoc s přípravou experimentu.

Poděkování patří také Bc. Janu Šípovi za mé zaučení v počítačových programech využívaných k experimentu, Romanu Partykovi za výrobu držáku sondy a prof. Ing. Milanu Pavelkovi, CSc. za poskytnuté tištěné materiály.

Velké díky patří dále všem, kteří mě po celou dobu dosavadního studia podporovali.

Zde publikované výsledky jsou výstupem výzkumné a vědecké činnosti NETME Centre, regionálního výzkumného a vývojového centra vybudovaného z finančních prostředků Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace v rámci projektu NETME Centre (Nové technologie pro strojírenství), Reg. č.: CZ.1.05/2.1.00/01.0002 a podporovaného v navazující fázi udržitelnosti prostřednictvím projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu "Národní program udržitelnosti I".

Obsah

1	Úvod.....	15
2	Teoretická část.....	16
2.1	Mříže a mřížky	16
2.1.1	Dělení	16
2.1.2	Děrované plechy.....	17
2.1.3	Požadavky na mříže a mřížky	17
2.2	Proudění	17
2.2.1	Druhy proudění	18
2.2.2	Měření proudění	25
3	Praktická část	31
3.1	Popis měřícího zařízení.....	31
3.2	Popis tratě	31
3.3	Popis měřené mřížky	32
3.4	Postup měření	32
3.5	Výpočty.....	32
3.6	Parametry měření (nastavené hodnoty).....	33
3.7	Naměřené hodnoty	34
3.8	Diskuse výsledků měření	40
4	Závěr.....	42

1 Úvod

V současné době je studium proudění velmi důležitým vědním oborem. S prouděním se v každodenním životě setkáváme téměř neustále. Ať už se jedná o proudění přírodní a přirozené nebo vyvolané uměle. Obě se dále dělí podle různých hledisek.

Studium proudění je důležité jak z bezpečnostního, tak i z ekonomického hlediska. Proudění přes mřížku nastává v mnoha případech, ať už se jedná o plynový hořák, filtr, generátor či tlumič turbulence, výdech klimatizace automobilu nebo jen bezpečností kryt odtoku kapaliny.

Cílem této práce je, zabývat se turbulentním prouděním za drátěnou mřížkou a pokusit se získat nové poznatky v této problematice, které mohou přinést zajímavá fakta do tohoto ještě ne zcela prozkoumaného a pro praktické využití velmi důležitého odvětví.

Mřížka má na proudění vždy vliv a může se chovat jako generátor i jako tlumič turbulence. V některých případech je vyžadováno, aby se mřížka chovala jako generátor a jindy je tomu právě naopak. S ohledem na tyto a další požadavky se musí volit vhodné parametry mřížky i proudění.

Abychom mohli předpovídat chování proudění za drátěnou mřížkou, je potřeba provést velké množství experimentů pro získání dostatečného množství dat a nalezení závislosti či pravidelnosti v chování při různých vstupních parametrech.

2 Teoretická část

2.1 Mříže a mřížky

Mříže a mřížky jsou součástky vyrobené z prutů, drátů, tyčí nebo jiných profilů, které jsou vzájemně spojeny či propleteny a mohou být ukotveny v rámu. Mají odlišnou velikost děr i celkovou velikost, liší se tvarem děr i celkovým tvarem a na jejich výrobu se používají různé materiály.

Dle způsobu a místa využití musejí mřížky a mříže splňovat příslušné normy (např. bezpečnostní, rozměrové...). Mřížky podléhají normám zejména z důvodu dostupnosti při potřebě výměny.

2.1.1 Dělení

Mřížky můžeme dělit podle způsobu ukotvení v rámu, způsobu spojení jednotlivých prutů, materiálu, účelu, ke kterému budou sloužit, velikosti děr, celkové velikosti atd.

- **Dle způsobu ukotvení**

Mřížky s rámem - zpravidla vyrobeny již pro jeden konkrétní účel.

Mřížky bez rámu - využívají se především jako polotovary. Z výroby vycházejí velké kusy, které se dále dělí na potřebnou velikost. Poté se mohou také zasadit do rámu či rovnou ukotvit na místo, kde budou sloužit.

- **Dle použití**

Mřížky mají v dnešní době široké uplatnění v různých oborech, jako například:

Automobilový průmysl - systém větrání a vytápění vozidla.

Stavebnictví - ventilace v budovách, víka a zábrany.

A další - generátory turbulence, plynové hořáky, filtrace (síta), ploty, hokejové masky, zátarasy, rošty grilů, zpevňující konstrukce pro kompozitní materiály, klece, treláže.

- **Dle materiálu**

Vzhledem k požadavkům na konkrétní mřížku je potřeba zvolit nejvhodnější materiál. Především se bere ohled na pevnost, snadnost výroby a cenu.

Nejčastěji používanými materiály jsou: kovy, plasty, dřevo a kompozity.

- **Dle způsobu spojení**

Jednotlivé části mřížek lze spojovat do podoby konečného výrobku například:

Proplétáním, svařováním, nýtováním.

- **Dle celkové velikosti**

Pro použití v této práci jsou mříž a mřížka definovány takto:

Mříž - soustava paralelních tyčí, které se mohou vzájemně křížit.

Mřížka - konstrukce, která je vyrobena z drátů nebo vláken.



Obr. 1 - mřížka v rámu [1]

2.1.2 Děrované plechy

Mřížky jsou často zaměňovány za děrovaný plech a naopak. Je zde však rozdíl v konstrukci, který je patrný z obr. 1 a 2. Zatímco pro výrobu mřížek se používají jako polotovary profily či dráty, tak u děrovaného plechu je výchozím polotovarem pouze plech, do kterého se zpravidla za pomoci lisu vytlačují nebo vysekávají díry, případně se ještě lisuje konečný tvar celé součásti.



Obr. 2 - Děrovaný plech jako [archiv autora]

Avšak u měření proudění za mřížkou můžeme výpočtové vztahy pro mřížku a pro děrovaný plech, po zvážení nepřesností, zaměnit, jelikož jejich geometrický tvar a vliv na proudění jsou podobné [2].

2.1.3 Požadavky na mříže a mřížky

Podle způsobu použití mohou být na mříže a mřížky kladeny různé nároky a požadavky, jako například:

Při použití ve větracím systému automobilu je například vyžadováno kromě výkonu ventilace i pohodlí posádky. Proto je nutností eliminovat hluk a proudění okolo posádky vozidla [2].

V případě použití mřížky jako filtru požadujeme takovou velikost ok, aby se mřížka neucpávala, ale současně aby nepropustila větší částice než je velikost těch, které je potřeba odfiltrovat.

Při použití jako ochranné mříže budov musí tyto mříže splňovat určité normy či zákony, jako například nařízení vlády č. 338/2002 Sb. pro uzamčené místnosti [3].

2.2 Proudění

Proudění tekutin je problematika, kterou se zabývá velké množství odborných prací. Je to prostorový jev a jeho vyšetřování je velmi složité, což platí především pro proudění turbulentní, jak bude vysvětleno níže.

Proudění se obecně řídí stejnými zákony jako pohyb tuhých těles. Zákon zachování hmotnosti je ekvivalentem rovnice kontinuity, dále můžeme využít rovnice pohybové (Bernoulliho) a energetické [4].

Jelikož se v experimentální části této práce bude měřit proudění vzduchu, což je stlačitelná tekutina, za mřížkou, tak jsou níže uvedeny vztahy platné pro stačitelné tekutiny a za předpokladu jednorozměrného stacionárního proudění.

Objemový průtok

Objemový průtok tekutiny potrubím o daném průřezu je objem tekutiny, který proteče tímto průřezem za určitý čas. Dle Šoba [5] dán vztahem:

$$Q = w * A \quad (1)$$

Kde:

Q [m^3s^{-1}] - objemový průtok

w [ms^{-1}] - okamžitá střední rychlost proudění

A [m^2] - průtočný průřez

Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity při stacionárním proudění, což je takové proudění, kdy každým průřezem trubice protéká stejný hmotnostní tok, je dle Pavelka [6] dána vztahem:

$$\dot{m} = \frac{A * w}{v} = konst. \quad (2)$$

Kde:

\dot{m} [kgs⁻¹] - hmotnostní tok

A [m²] - průřez

w [ms⁻¹] - střední rychlost

v [m³kg⁻¹] - měrný objem

Pohybová rovnice (Bernoulliho) pro jednorozměrné proudění

Za předpokladu jednorozměrného (1D) proudění má pohybová rovnice vycházející z druhého Newtonova zákona dle Pavelka [7] tvar:

$$-v dp = d\left(\frac{w^2}{2}\right) \quad (3)$$

Kde:

v [m³kg⁻¹] - měrný objem

w [ms⁻¹] - střední rychlost

Energetická rovnice

Za předpokladu, že protékající médium nekoná práci, má energetická rovnice dle Pavelka [6] tvar:

$$h + \frac{w^2}{2} = konst. \quad (4)$$

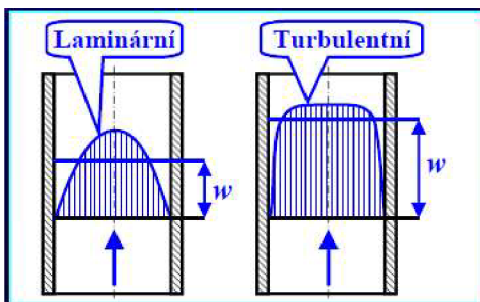
Kde:

h [Jkg⁻¹] - měrná entalpie

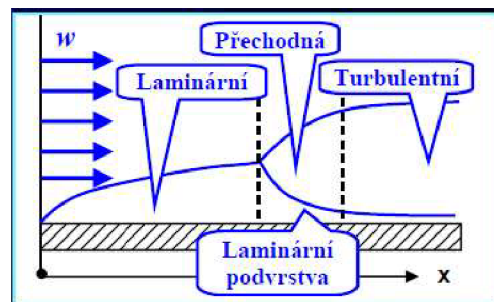
w [ms⁻¹] - střední rychlost

2.2.1 Druhy proudění

Proudění tekutin může být laminární nebo turbulentní. Laminární se vyznačuje uspořádaností, zatímco turbulentní je neuspořádané [8]. Rychlostní profil laminárního a turbulentního proudění je zobrazen na obr. 3.



Obr. 3 - Rychlostní profily v kanále [7]



Obr. 4 - Dynamická mezní vrstva [7]

Mezní vrstva

Mezní vrstva je tenká vrstva tekutiny, která má na tělese nulovou rychlost a ve směru od tělesa se tato rychlost postupně zvyšuje, protože částice, proudící poblíž obtékaného tělesa, jsou bržděny pomalejšími částicemi [9]. Čím je rychlost proudění vyšší, tím větší je mezní vrstva a může v ní dojít ke zpětnému pohybu kapaliny, čímž vznikají víry [10].

Jak lze vidět z obr. 4, při kritické hodnotě Reynoldsova čísla se vyvine laminární podvrstva, a z té přechází proudění do turbulentní mezní vrstvy.

Pokud je Reynoldsovo číslo nízké, tak je mezní vrstva laminární, dochází k jejímu odtrhávání a vzniku úplavu, zatímco při vyšších Reynoldsových číslech je mezní vrstva turbulentní a tudíž úplav malý [5].

Mezní vrstva se pro snadné pochopení nejčastěji zobrazuje na rovinné desce z důvodu přehlednosti schematického zobrazení proudění.

Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo patří mezi kritéria podobnosti (zkoumaná modelová situace se musí podobat skutečnému jevu) a vyjadřuje poměr setrvačných a vazkých sil [11].

V praxi se musí rozlišovat mezi prouděním ideální a skutečné (viskózní) tekutiny (kapalina nebo plyn).

U proudění skutečné tekutiny mohou nastat dva druhy proudění - a sice turbulentní nebo laminární. Dle velikosti bezrozměrného Reynoldsova čísla můžeme určit, který druh proudění nastane. Vypočítá podle Uruby [12] jako:

$$Re = \frac{w * l}{\nu}$$

Kde:

Re [-] - Reynoldsovo číslo

w [ms^{-1}] - charakteristická rychlost

l [m] - charakteristický rozměr

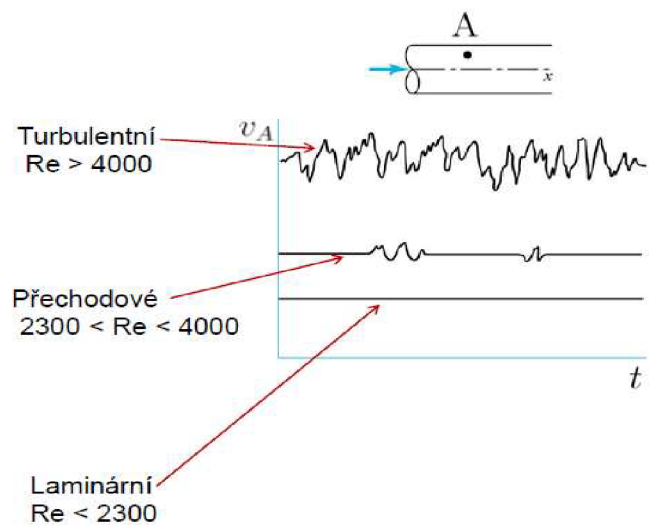
ν [m^2s^{-1}] - kinematická viskozita (vazkost)

Kritická hodnota Reynoldsova čísla pro proudění v kruhovém potrubí se pohybuje okolo 2 300, jak lze názorně vidět na obr. 5. Pokud je hodnota nižší, nastává laminární proudění, v opačném případě turbulentní [14]. Pro proudění přes mřížku, kterým se zabývá tato práce, je důležité tzv. mřížkové Reynoldsovo číslo, o kterém je psáno podrobněji níže.

Síla na obtékané těleso

Při obtékání jakéhokoliv profilu tekutinou, působí na profil síly a momenty. Ty jsou dány aerodynamickými (respektive hydrodynamickými) vlastnostmi profilu [15].

Při proudění přes mřížku tyto síly a momenty na mřížku působí a prohýbají ji, čímž může vznikat mírně odlišné proudění, než je předpokládané. Avšak v našem případě pomalého proudění je průhyb mřížky velmi malý, a proto jej zanedbáme.



Obr. 5 - Závislost rychlosti na čase s ohledem na druh proudění [13]

(5)

Síla, působící na obtékané těleso, je podle Noskiewiče [9] dána vztahem:

$$F_o = \frac{1}{2} * \rho * c_o * A_p * w_\infty^2 \quad (6)$$

Kde:

F_o [N] - odporová síla

ρ [kgm⁻³] - hustota tekutiny

c_o [-] - součinitel celkového odporu

A_p [m²] - charakteristická plocha

w_∞ [ms⁻¹] - rychlost nenarušeného proudu

• Turbulentní proudění

Prakticky veškeré proudění v přírodě je turbulentní, jelikož je mnohem větší pravděpodobnost jeho vzniku než u proudění laminárního, protože nastávají vysoké hodnoty Reynoldsova čísla [12].

Turbulence vzniká při proudění tekutiny (kapaliny nebo plynu) okolo překážky [12]. Aby došlo k turbulentnímu proudění, musí Reynoldsovo číslo překonat kritickou hodnotu [13]. Toho se dosáhne vysokou rychlostí proudění nebo nízkou kinematickou viskozitou, jak plyne z definice Reynoldsova čísla (5) [8].

Turbulentní proudění generují jak umělé překážky (budovy, letadla), tak také vzniká v přírodě (vítr naráží do hor, lesů, proud vody pod vodopádem). Příkladem výskytu turbulentního proudění může být spalovací motor nebo proudění vody přes lodní šroub [16].

Velmi těžko se hledá přesná definice turbulence, proto můžeme jmenovat vlastnosti tohoto proudění: vyznačuje se velkou difuzivitou, vířivostí, fluktuací rychlosti, nepravidelně, náhodně a chaoticky se mění tlak, hustota, rychlost a případně i teplota, a dochází k proudění ve všech 3 osách [13] [14] [16]. Proto je velmi náročné předpovídat chování objektů v turbulentním stavu [12].

Turbulentní proudění je často nežádoucí, protože má podíl na generování hluku a třecích ztrát (vnitřní tření tekutiny). Proto toto proudění zkoumáme a měříme například za pomoci termoanemometrů, které budou podrobněji popsány níže [17].

Turbulentní víry

Turbulentní proudění se skládá z turbulentních vírů [18].

Tekutiny konají vířivý pohyb, pokud částice tekutiny proudí okolo osy rotace [15].

Vířivý pohyb je vyvolán vysokým gradientem rychlosti a dojde k němu, pokud jsou malé vazké síly [13].

Velké víry získávají energii z hlavního proudu a jsou mu úměrné, zároveň předávají část své energie menším vírům a nejmenší víry se disipují (mění svou energii na teplo - nevratný děj) [13]. Rychlost disipace energie vírů je dle Záchy [18] dána vztahem:

$$\varepsilon = \frac{u^3}{l} \quad (7)$$

Kde:

ε [m²s⁻³] - disipace

u [ms⁻¹] - rychlostní měřítko

l [m] - charakteristická délka

Pro vířivý pohyb byla dle Račka [15] odvozena rovnice:

$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \text{rot } \vec{w} \quad (8)$$

Kde:

$\vec{\omega}$ = vektor úhlové rychlosti

$\text{rot } \vec{w}$ = rotace vektoru obvodové rychlosti

Hydraulické odpory

Kromě vířů dochází ke ztrátě (disipaci) energie a její změně na teplo i z důvodu třecích a místních odporů.

Třecí odpory vznikají třením tekutiny o povrch potrubí nebo jiného tělesa a třením v samotné tekutině (zvláště u turbulentního proudění).

Místní odpory vznikají v místech, kde dochází ke změně rychlosti. Například při změně průřezu nebo zahnutí potrubí [13].

Přírodní turbulence

Přírodní turbulence nastávají při vertikálním proudění vzduchu. Způsobují je stoupavé a klesavé termické proudy vzduchu (jet streamy), které vytváří rozdílná teplota v různých oblastech zemské kůry nebo vznikají za překážkami, jejichž příkladem mohou být hory, na které vzduch naráží. Dále mohou vznikat v oblastech, kde se setkávají 2 větry s různými směry pohybu (tzv. stříh větru) [19].

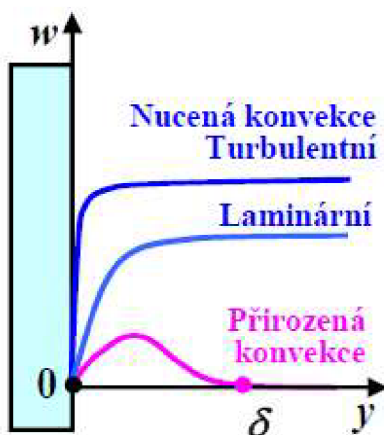
Přírodní turbulence a stříh větru jsou jevy, kterých se například bojí velké množství lidí při letu v letadle, protože způsobují náhlé změny směru větru a propady letadel, což může být především v nízkých výškách nad povrchem Země nebezpečné [19].

Umělé (generované) fluktuace proudění

Mohou se vytvářet za mřížkou (ale stejně tak je může tlumit), za letadlem nebo jakoukoliv jinou překážkou, kterou obtéká kapalina, případně překážkou, pohybující se kapalinou.

Intenzita turbulence:

Intenzita turbulence ovlivňuje přenos tepla konvekcí (tzv. nucená konvekce), který je, jak lze odvodit z obr. 6, větší než u přirozené konvekce a laminárního proudění.



Obr. 6 - Příklady charakteristických dynamických mezních vrstev [20]

Střední (základní) hodnota

Střední hodnotu dané veličiny zjistíme podle aritmetického průměru z naměřených hodnot. Ten se vypočítá dle Linhart [14] z plochy pod křivkou, kterou proložíme naměřená data, tedy z integrálu dané veličiny podle času vyděleno počtem měření. Pro konstantní vzorkovací frekvenci můžeme integrál nahradit sumou.

$$\bar{w} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} w dt = \frac{1}{N} \sum_1^N w_i \quad (9)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} p dt = \frac{1}{N} \sum_1^N p_i \quad (10)$$

Kde:

w [ms^{-1}] - okamžitá rychlost proudění

\bar{w} [ms^{-1}] - střední (základní) rychlost proudění

p [Pa] - okamžitý tlak

\bar{p} [Pa] - střední tlak

t_0 [s] - čas od počátku měření

N [-] - počet měření

Střední hodnotu fluktuací rychlosti lze dle Jørgensena [17] vypočítat jako:

$$\overline{w'} = \sqrt{\frac{\sum_i (w_i - \bar{w})^2}{n - 1}} \quad (11)$$

Kde:

w_i [m/s] - jednotlivé naměřené rychlosti

\bar{w} [m/s] - střední rychlost z dlouhodobého měření v daném místě

n - počet měření

Intenzita turbulence je dle Pavelka [21] dána vztahem:

$$Tu = \frac{1}{\bar{w}} \sqrt{\frac{\sum_i (w_i - \bar{w})^2}{n - 1}} \quad (12)$$

Kde:

Tu [-] - intenzita turbulence

w_i [ms^{-1}] - jednotlivé naměřené rychlosti

\bar{w} [ms^{-1}] - střední rychlost z dlouhodobého měření v daném místě

n - počet měření

Intenzita turbulence pro jednotlivé složky rychlosti

Vyjadřuje velikost fluktuací rychlosti ve složkách. Udává se v procentech. Za uklidňujícími mřížkami bývá řádově v desetinách, zatímco za turbulizujícími hrubými mřížemi je v desítkách procent střední rychlosti proudění. Vypočítá se dle Linharta [14] jako:

$$I_x = \frac{\sqrt{\overline{w_x'^2}}}{\bar{w}} * 100 \quad (13)$$

$$I_y = \frac{\sqrt{\overline{w_y'^2}}}{\bar{w}} * 100 \quad (14)$$

$$I_z = \frac{\sqrt{\overline{w_z'^2}}}{\bar{w}} * 100 \quad (15)$$

Kde:

I_x [%] - x složka intenzity turbulence

I_y [%] - y složka intenzity turbulence

I_z [%] - z složka intenzity turbulence

$\overline{w_x'}$ [ms^{-1}] - střední hodnota fluktuace rychlosti v ose x

$\overline{w_y'}$ [ms^{-1}] - střední hodnota fluktuace rychlosti v ose y

$\overline{w_z'}$ [ms^{-1}] - střední hodnota fluktuace rychlosti v ose z

\bar{w} [ms^{-1}] - střední rychlost

Eulerův rozklad rovnic turbulentního proudění

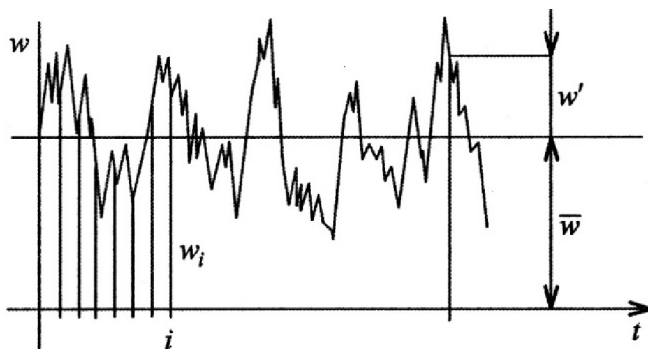
Rovnice platí vždy pouze pro bod, ve kterém měříme. Vzhledem k vířivé povaze proudění jsou hodnoty v každém bodě a časovém okamžiku odlišné.

Z rovnic plyne, že okamžitá hodnota dané veličiny se rovná součtu střední hodnoty této veličiny a její okamžité odchylce.

$$w = \bar{w} + w' \quad (16)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (17)$$

$$\rho = \bar{\rho} + \rho' \quad (18)$$



Obr. 7 - Průběh rychlosti v závislosti na čase [14]

Velikost fluktuaace

Velikost flukuační složky dané veličiny se dle Linharta [14] vyhodnocuje pomocí směrodatné odchylky naměřených flukuaací.

$$\sigma_{w'} = \sqrt{\overline{w'^2}} = \left(\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} w'^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{1}{N} \sum_1^N w'^2_i \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

$$\sigma_{p'} = \sqrt{\overline{p'^2}} = \left(\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} p'^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{1}{N} \sum_1^N p'^2_i \right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

Kde:

$\sigma_{w'}$ [ms⁻¹] - směrodatná odchylka flukuaace rychlosti

$\sigma_{p'}$ [ms⁻¹] - směrodatná odchylka flukuaace tlaku

\bar{w} [ms⁻¹] - střední (základní) rychlost proudění

w' [ms⁻¹] - okamžitá odchylka rychlosti (podružná rychlost, flukuaace rychlosti)

\bar{p} [Pa] - střední tlak

p' [Pa] - okamžitá odchylka tlaku

ρ [kgm⁻³] - okamžitá hustota

$\bar{\rho}$ [kgm⁻³] - střední hustota

ρ' [kgm⁻³] - okamžitá odchylka hustoty

t_0 [s] - čas od počátku měření

N [-] - počet měření

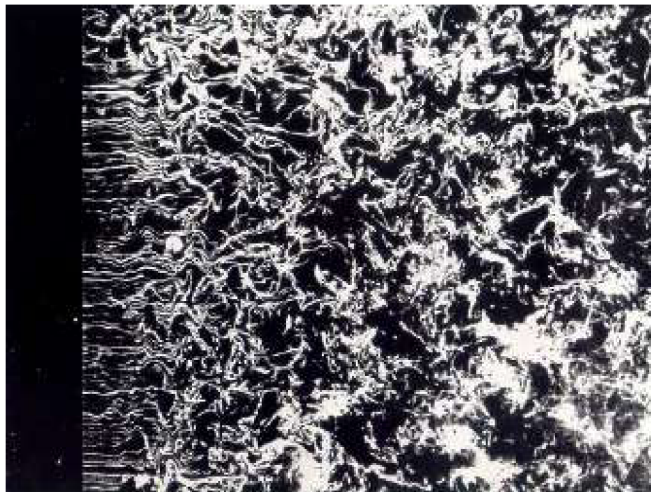
Mřížková turbulence a pokles intenzity turbulence

Mřížka může intenzitu turbulence jak zvyšovat - generátor, tak také snižovat - tlumič [2]. Ilustrativní příklad proudění za mřížkou lze vidět na obr. 8.

Vzhledem k tomu, že je mnohdy turbulentní proudění nežádoucí, tak se snažíme snížit jeho intenzitu například tlumícími mřížkami.

Avšak konkrétní mřížka se vždy nechová pouze jako generátor nebo tlumič turbulence. Každá mřížka tlumí turbulenci v proudu před ní, ale v proudu za ní může být turbulence jak větší, tak menší, to záleží na hodnotě mřížkového Reynoldsova čísla [22].

Proudění za mřížkou se čtvercovými oky je téměř homogenní v rovině rovnoběžné s mřížkou a izotropní ve všech 3 směrech, ve vzdálenosti vyšší než 20 roztečí ok mřížky [23]. Do této vzdálenosti se za mřížkou vyskytují úplavy, které spolu reagují. Střední rychlost proudění je nenulová pouze ve směru kolmém na mřížku [12].



Obr. 8 - Kouřová vizualizace proudění za mříž (mříž je vlevo) [12]

V rovině kolmé k mřížce se se zvyšující vzdáleností od mřížky snižuje intenzita fluktuací rychlosti a zvyšuje se velikost největších vírů [12].

Při měření rychlosti žárovým anemometrem v jednom bodě jsou průběhy rychlosti s časem proměnné téměř Gaussovským rozdělením pravděpodobnosti [12].

Intenzita turbulence za mřížkou

Pro děrovaný plech, který lze po uvážení rozdílů aplikovat na náš případ, uvádí Liu a kol. rovnice, které jsou však platné pouze pro oblast, kde je uvažována již homogenní izotropní turbulence. To ovšem není případ tohoto experimentu, protože měření probíhalo v rovině blíže k mřížce, než dovoluje podmínka platnosti těchto rovnic [24].

Jakýkoliv vztah, který by byl lépe aplikovatelný pro experiment, řešený v této práci, nebyl nalezen. Vzorec je možné odvodit empiricky, ale z důvodů uvedených v závěru této práce zde není uveden.

Mřížkové Reynoldsovo číslo

Aby byla za mřížkou generována turbulence, musí velikosti mřížkového Reynoldsova čísla překročit kritickou hodnotu, která se může dle Ertunca pohybovat v rozmezí $Re_d > 36-74$ [25]. V opačném případě se může stát, že turbulence vytvářená mřížkou je menší než turbulence přicházející k mřížce, z čehož plyne, že mřížka může fungovat jako tlumič turbulence. To je dáno maximalizací disipace energie [23].

Při výpočtu mřížkového Reynoldsova čísla se použije rovnice (5) a za charakteristický rozměr l se dosadí rozteč mřížky M [25].

- **Laminární proudění**

Z Reynoldsova vztahu (5) plyne, že laminární proudění vzniká, pokud má systém velmi malou rychlost nebo vysokou kinematickou viskozitu [8].

Nedochází u něj k mísení tekutiny mezi jednotlivými vrstvami a částice tekutiny po sobě vzájemně kloužou ve vrstvách (odsud laminární - z latinského lamina) a vyznačuje se stabilitou a uspořádaným pohybem [12] [26].

Je jediným možným prouděním v nevazké tekutině (turbulentní u ní vzniknout nemůže) [12].

- **Dělení proudění podle jiných hledisek**

Proudění se může dělit kromě turbulentního a laminárního také podle jiných hledisek. Například jestli je stlačitelné či nestlačitelné, stacionární či nestacionární, ideální či skutečné tekutiny, potenciální či vířivé nebo rovnoměrné či nerovnoměrné [4].

2.2.2 Měření proudění

Abychom mohli zkoumat proudění, musíme jej nejprve nějakým způsobem změřit (rychlost, tlak, průtok...) a zobrazit (vizualizační metody, přenos naměřených dat do grafu). K tomu slouží různé měřicí zařízení a metody.

Přestože naše znalosti turbulentního proudění ještě nejsou zdaleka kompletní, dají se také již s dobrou přesností provádět předpovědní modely a numerické simulace [27]. Hlavními výhodami oproti praktickému měření jsou menší časová náročnost a nižší náklady. Avšak tyto metody nemusejí mít přesný výsledek v porovnání se skutečným chováním a obecné znalosti se složitě aplikují na konkrétní druh mřížky. Proto je vhodné ověřit teoretické předpoklady vlastním měřením.

- **Zařízení pro měření proudění**

Mechanické anemometry: lopatkové, vrtulkové, miskové

Dynamické rychlostní sondy: Pitotova trubice, Prandtlova trubice

Katateploměry

Laserové anemometry (LDA): s referenčním svazkem, interferenční (diferenční), se dvěma směry pozorování

Indukční

Ultrazvukové

Vizualizační metody

[21] [28]

Měření turbulentního proudění

Prvním problémem je, že u turbulentního proudění dosahuje frekvence fluktuací až několik desítek kHz. Proto musíme správně nastavit vzorkovací frekvenci [28].

Další potíž nastává z důvodu, že turbulentní víry mají i méně než 1 mm^3 , pro což je měření metodou žhaveného drátku vhodné, protože drátek má malé rozměry. Zároveň musí být sonda co nejmenší, aby příliš nenarušovala proudění a nevnášela tak do měření systematickou chybu [28].

Pro měření intenzity turbulence by bylo ideální znát všechny 3 složky rychlosti (měření pomocí třídrátkové sondy). Avšak pro naše účely je dostatečné měřit pouze v jedné ose - tedy jednu složku rychlosti, jelikož jedna složka rychlosti (měřená) je dominantní, zatímco další dvě jsou zanedbatelně malé.

Pro účely zpracování naměřených dat je třeba mít naměřeny lokální rychlosti proudění, jelikož u turbulentního proudění je rychlost v každém místě odlišná a těžko předpověditelná.

U měření turbulence je potřebné, aby měla rychlostní čidla malé časové konstanty, a musí být připojena na přístroj, který je schopen zaznamenávat a případně i vyhodnocovat všechna potřebná data [21].

- **Měření termoanemometrem**

Měřicí zařízení funguje na principu měření intenzity ochlazování žhaveného tělíska (například drátku, fólie nebo kuličky) obtékaného médiem. Podle množství přeneseného tepla je zařízení schopno vypočítat rychlost proudící tekutiny [21]. Tepelný tok se dle Hallidaye [29] vypočítá jako:

$$\dot{Q} = P = U * I = R * I^2 = \frac{U^2}{R} \quad (21)$$

Kde:

\dot{Q} [W] - tepelný tok

P [W] - příkon

U [V] - elektrické napětí

I [A] - elektrický proud

R [Ω] - elektrický odpor

Ze vztahu (21) vyplývá, že lze měřit dvěma způsoby: při konstantní teplotě měřit proud nebo při konstantním proudu měřit elektrický odpor [21] a měřená rychlost je úměrná odporu sondy (constant current) nebo protékajícímu proudu (constant temperature) [28]. Pro experiment řešený v této práci byla použita metoda CTA (Constant Temperature Anemometry), a proto bude dále řešena pouze ona.

Největší část přenosu tepla z drátku do tekutiny se děje konvekcí [28] a je dána Newtonovým ochlazovacím zákonem, který má dle Pavelka [6] tvar:

$$\dot{Q} = \bar{\alpha} * A * (T_w - T_{\infty}) \quad (22)$$

Kde:

\dot{Q} [W] - tepelný tok

A [m²] - plocha drátku

$\bar{\alpha}$ [Wm⁻²K⁻¹] - střední součinitel tepla

T_w [K] - teplota žhaveného drátku

T_{∞} [K] - teplota proudící tekutiny

Metoda žhaveného drátku se často používá v případě proudění o malých rychlostech, velkých fluktuacích nebo při potřebě měření v malém prostoru, kde nelze použít klasické mechanické anemometry [21].

Výhody žhavených drátků: malé rozměry sond (nenarušují tolik rychlostní pole), umožňují měření intenzity turbulence a fluktuací rychlosti díky vysoké snímkovací frekvenci, náklady jsou nižší než u měření pomocí LDA (Laser doppler anemometry), umožňují měření ve všech třech osách (u třídrátkových sond), vysoká přesnost [30].

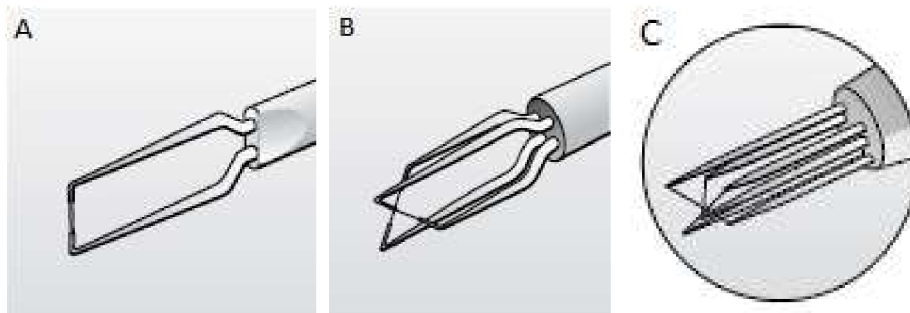
Nevýhody žhavených drátků: závislost na teplotě prostředí (potlačuje se vysokou teplotou žhaveného drátku), nutnost čistoty prostředí (sondy jsou snadno poškoditelné a jejich znečištění zhoršuje přenos tepla), křehká sonda.

Sondy:

Aktivní část je nejčastěji vyrobena z wolframu nebo slitin platiny, má průměr 4-5 μm a délku 1,25 mm.

Sonda může mít jeden až tři žhavené drátky (výjimečně i více), kde většinou každý drátek měří rychlost proudění pro jednu osu.

Při měření proudění v elektricky vodivých kapalinách jsou sondy kvůli izolaci pokryty nevodivým materiálem, nejčastěji křemenem [30].

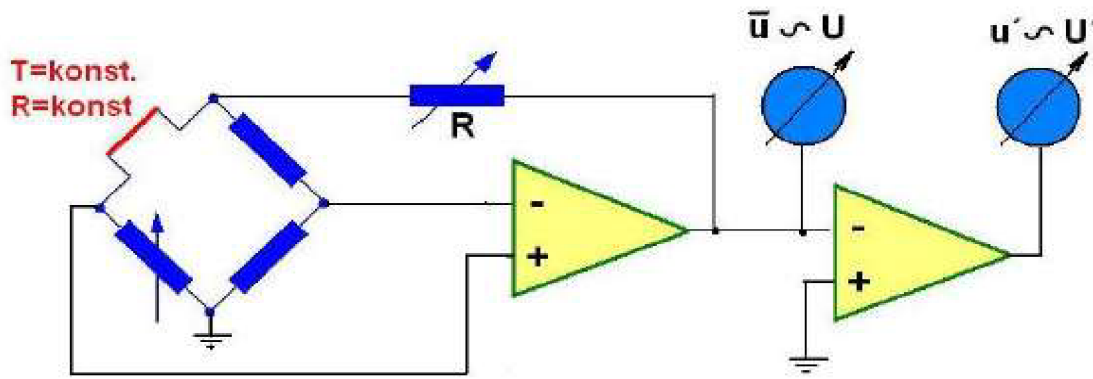


Obr. 9 - Druhy sond - A jednodrátková; B dvoudrátková; C třídrátková [31]

Požadavky na sondy:

Pro minimalizaci chyb měření je důležité, aby: poměr délky a průměru drátku, teplotní součinitel a specifický odpor byly co nejvyšší a hustota, tepelná kapacita, tepelná vodivost a časové konstanty co nejnižší. Zároveň musí sonda odolávat oxidaci za zvýšené teploty a mít vysokou pevnost v tahu [32].

Pro měření v této práci byla využita metoda žhaveného drátku s konstantní teplotou čidla (constant temperature). Tato metoda je více užívaná, přestože má složitější elektroniku, z důvodu lepších přenosových vlastností [28].



Obr. 10 - Schéma zapojení pro CTA [28]

• Chyby a nejistoty měření

Chyba měření je rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou. Nikdy nic nejsme schopni změřit s naprostou přesností a 100% jistotou. Vždy je každé měření zatíženo chybami, a aby bylo měření uznatelné, musí být možnost jeho opakovatelnosti a za stejných podmínek musí vycházet téměř shodné výsledky [33].

Při uvádění jakýchkoliv výsledků měření je nutné uvedení nejistot měření [33].

Každé experimentální zařízení musí projít kalibrací, aby byla zajištěna přesnost získaných výsledků [21].

Dle Němečka [33] mohou být chyby:

- Hrubé: lze je většinou snadno poznat, protože naměřená data neodpovídají očekávaným, většinou jsou způsobeny chybou obsluhy nebo poškozením měřicího přístroje.
- Systematické: dají se poznat po porovnání výsledků s jiným měřením, mají danou a vyčíslitelnou závislost, většinou jsou způsobeny chybou měřicího přístroje - špatného nastavení či poškození nebo chybou obsluhy, jsou korigovatelné.
- Náhodné: často se jim nelze vyhnout ani je korigovat, vznikají vlivem působení velkého množství často náhodných jevů, ovšem některé z nich lze odhalit a eliminovat.

Absolutní chyba se dle Pavelka [21] určí jako:

$$\Delta y = y - y^* \quad (23)$$

Kde:

Δy - odchylka naměřené hodnoty

y - naměřené hodnoty

y^* - předpokládaná správná hodnota

Relativní chyba se dle Pavelka [21] určí jako:

$$\eta = \frac{\Delta y}{y^*} \quad (24)$$

Kde:

η - relativní chyba

Δy - odchylka naměřené hodnoty

y^* - předpokládaná správná hodnota

Celková nejistota měření je dána všemi dílčími nejistotami v procesu. Nejjednodušším způsobem zjištění nejistoty měření je opakované měření a z nich zjištěnou výběrovou směrodatnou odchylku (25) lze prohlásit za kombinovanou standardní nejistotu [33].

Výběrová směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (25)$$

Kde:

s - výběrová směrodatná odchylka

n - počet měření

x_i - naměřené hodnoty opakovaných měření

\bar{x} - aritmetický průměr naměřených hodnot

Metoda s výběrovou směrodatnou odchylkou je ovšem časově náročná, proto se využívá reálného modelu nejistot (dílní nejistoty se sečtou dle zákona šíření nejistot, a tím vznikne celková nejistota měření).

Mezi zdroje nejistot patří například: vlivy počasí, kalibrace, uložení snímače [33].

Vzorkovací frekvence

Vzorkovací frekvence udává počet měření za jednotku času. Pokud je čas jedna sekunda, pak jednotkou je Hertz [Hz] neboli [1/s].

Aliasing (podvzorkování)

Je to nežádoucí efekt, který vzniká v důsledku špatně zvolené frekvence měření. Můžeme jej pozorovat například u videa, které je ve skutečnosti velké množství rychle po sobě jdoucích fotografií. Pokud se zvolí špatná vzorkovací frekvence, tak může nastat situace, kdy se lidem zdá, že se kolo otáčí naopak nebo vidí, jak LED žárovky blikají.

Shannonův teorém (někdy se také uvádí Nyquistův teorém či Kotělnikovův teorém) říká, že vzorkovací frekvence musí být alespoň dvojnásobná oproti nejvyšší frekvenci měřeného signálu, jinak může dojít k podvzorkování [34].

U neperiodického spojitého diskrétního signálu, což je případ tohoto experimentu, se provádí Fourierova transformace [34]. Díky ní je možné vyjádřit funkční závislost spojitého signálu z naměřených bodových hodnot [35]. Je dle Holčíka [34] dána vztahem:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) * e^{-j\omega t} dt \quad (26)$$

Kde:

$S(\omega)$ - spektrální funkce signálu

$s(t)$ - signál

ω [s⁻¹] - úhlová frekvence

Chyby a nejistoty měření u CTA

Chyba, která by mohla vzniknout při změně teploty proudícího média, je eliminována použitím druhé – teplotní – sondy, umístěné v blízkosti žhaveného drátku.

Žhavený drátek se umísťuje kolmo na směr proudu, protože při odklonu vzniká chyba (odklon o úhel $10^\circ = 0,3$ % nižší naměřená rychlost) [21].

Při měření v blízkosti stěny je teplo vedeno skrze proudící médium do stěny. V takovém případě bude naměřená rychlost proudění vyšší než ve skutečnosti. Kritická vzdálenost od povrchu se pohybuje okolo 0,1–0,2 mm, přičemž závisí na rychlosti proudění [17].

V případě, že je intenzita turbulence vyšší než 30 % nebo vzniká zpětné proudění, mohou být výsledky měření zkresleny. Taková proudění však mohou být správně měřena pomocí pohyblivého systému žhavených drátků [17].

Při velmi nízkých rychlostech je přenos tepla řízen přirozenou konvekcí, což znamená, že chlazení je závislé kromě rychlosti proudění také na jeho orientaci vzhledem ke gravitačnímu poli. Vliv přirozeného proudění se projevuje při rychlostech 0,2 m/s v okolí sondy a při rychlostech 0,03–0,04 m/s se rozšiřuje do celé oblasti. V takovém případě je nutné, aby sonda byla orientována s ohledem na rychlostní pole během měření a kalibrace [17].

Při vysokých rychlostech se tekutiny stávají stlačitelnými a tento jev by měl být zohledněn. V praxi to znamená, že tlak a rychlost by měly být měřeny zároveň. Korekce je poněkud složitá a je možné ji ve většině případů zanedbat [17].

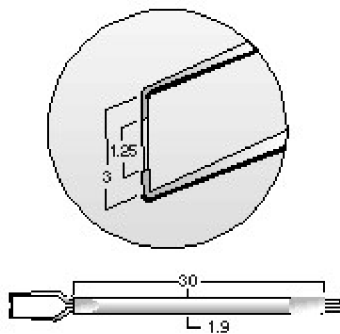
V případě, že dojde ke snížení tlaku, střední volná dráha molekul se zvýší. Pokud je Knudsenovo číslo Kn (střední volná dráha podělená průměrem drátu) vyšší než 0,01, přenos tepla se stává funkcí obou rychlostí a čísla Kn (nebo tlaku). Pro 5 μm drát se číslo Kn pohybuje okolo 0,02 za atmosférických podmínek. V případě nižších tlaků by mělo být zváženo použití sond s drátkem obaleným filmem namísto klasických drátových [36].

Musí být dbáno na čistotu prostředí, protože kontaminující částice ovlivňují přenos tepla. Ale u měření proudění laboratorního vzduchu tento problém nenastává [17].

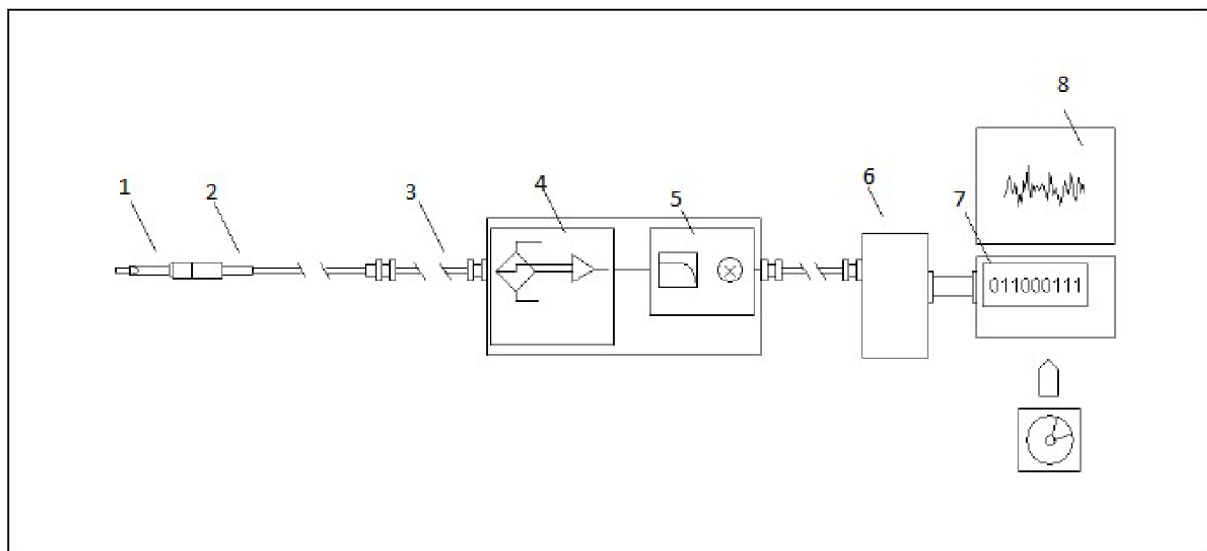
3 Praktická část

3.1 Popis měřícího zařízení

Pro měření proudění za drátěnou mřížkou byl použit systém Dantec Streamline s moduly 90C10, instalovanými v rámu 90N10, jednodrátková sonda 55R01, kalibrační systém Dantec Automatic calibrator, traverzovací systém ISEL a průtokoměr TSI 4040 E.



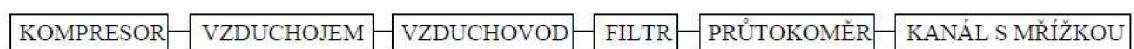
Obr. 11 - Rozměry sondy 55 R 01 v milimetrech [31]



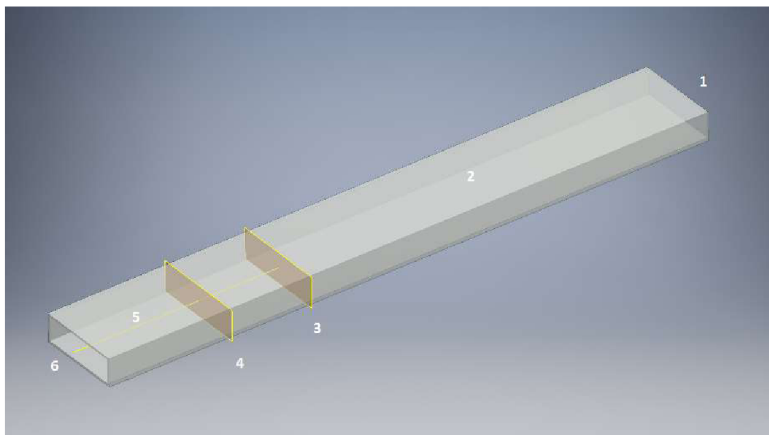
Obr. 12 - Schéma měřícího zařízení - 1 sonda se žhaveným drátkem; 2 držák sondy upevněný k traverzovacímu systému; 3 kabel sondy; 4 CTA; 5 zpracovávач signálu; 6 konektorová skříň; 7 A/D převodník; 8 počítač se speciálním softwarem [17]

3.2 Popis tratě

Na obr. 13 jsou blokově zobrazeny hlavní části tratě využitě k experimentu. Na obr. 14 lze vidět popis důležitých částí kanálu s mřížkou.



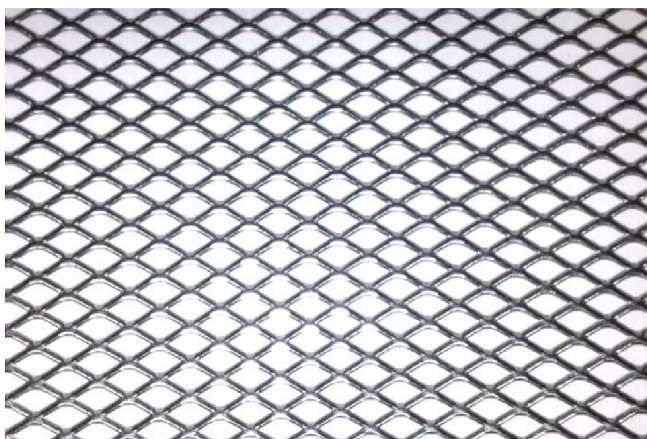
Obr. 13 - Blokové schéma tratě



Obr. 14 - Kanál použitý k měření: 1) vstup; 2) uklidňovací část o délce 1 000 mm; 3) rovina mřížky; 4) rovina měření; 5) přímka měření; 6) výstup

3.3 Popis měřené mřížky

Pro měření byla použita mřížka s oky ve tvaru kosočtverce o tloušťce drátu 0,6 mm, rozměru ok 2,4×2,4 mm a úhlu 60°, respektive 120°. Fotografie měřené mřížky se je vyobrazena na obr. 15.



Obr. 15 - Mřížka použitá k měření [archiv autora]

3.4 Postup měření

Před každým měřením byla provedena kalibrace měřicího zařízení, následně byly naprogramovány souřadnice pro měření, nastaven krok, pauza na dokmit traverzovacího systému, frekvence měření a počet vzorků. Poté bylo vyvoláno proudění částečným otevřením ventilu vzduchojemu, plněného kompresorem, čímž byla současně nastavena požadovaná rychlost proudění a následně spuštěno samotné měření. Po dokončení měření byla všechna data stažena a vyhodnocena v programu Minitab 17 a MS Office Excel 2007.

3.5 Výpočty

Před samotným měřením byly provedeny výpočty především pro zjištění průtoků, se kterými bude nejhodnější pracovat s hlediska vyvolání turbulentního proudění.

Průtočný průřez	Rozteč mřížky	Kinematická viskozita
A	M	ν
[m ²]	[m]	[m ² s ⁻¹]
0,0118	0,0034	0,000015

Tab. 1 - Vstupní data pro výpočty

Průtok	Průtok	Střední rychlost proudění	Mřížkové Reynoldsovo číslo	Reynoldsovo číslo v kanále
Q	Q	w	Re _d	Re
[l/min]	[m ³ s ⁻¹]	[ms ⁻¹]	[-]	[-]
150	0,00250	0,212	48	1287
200	0,00333	0,282	64	1716
250	0,00417	0,353	80	2145
300	0,00500	0,424	96	2574

Tab. 2 - Zjištění střední rychlosti proudění a Reynoldsova čísla v závislosti na průtoku

Pro výpočet Reynoldsova čísla bylo využito rovnic (1) a (5).

3.6 Parametry měření (nastavené hodnoty)

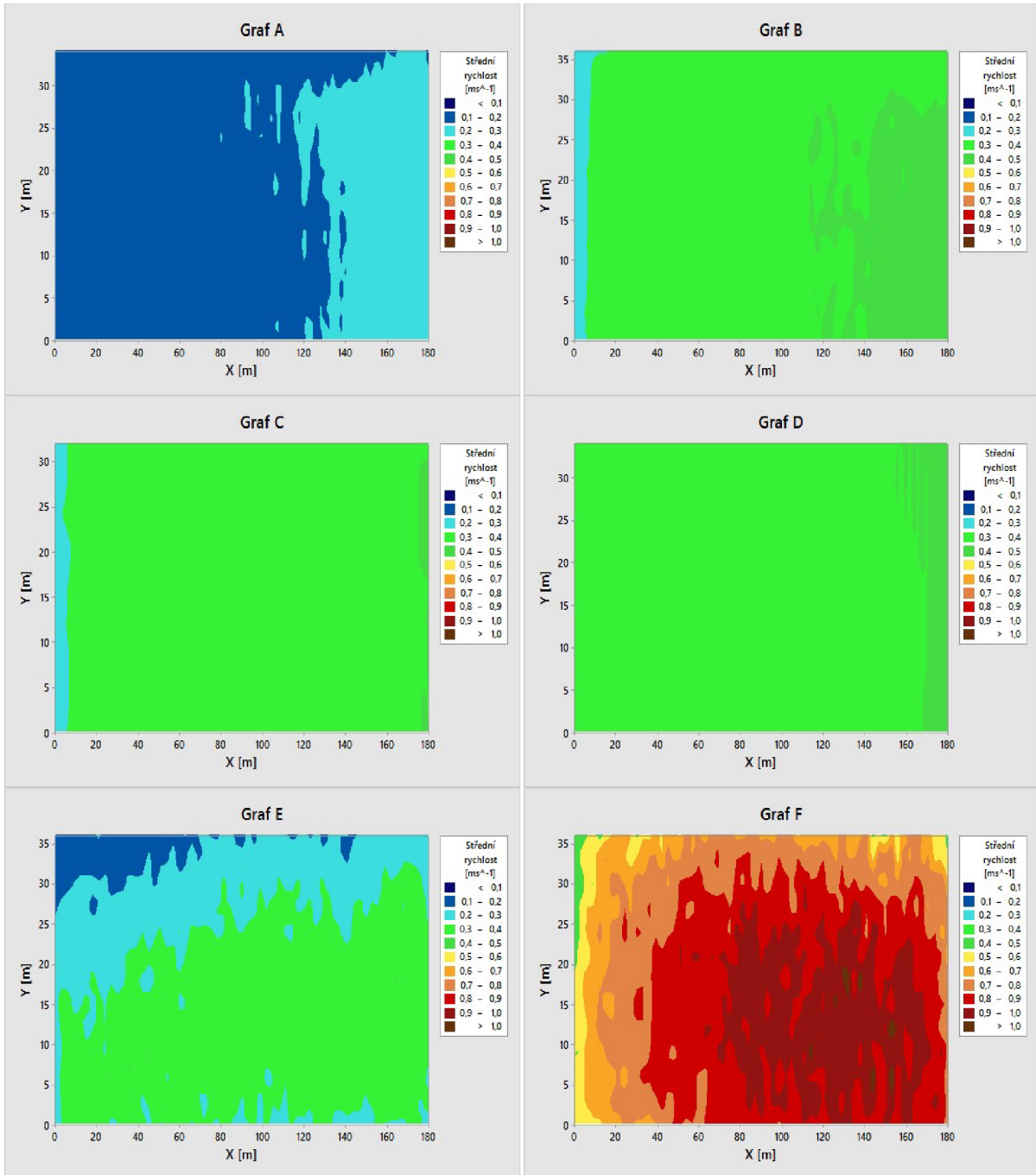
Měření probíhalo ve vzdálenosti 200 mm od mřížky v rovině mřížky a poté v ose kanálu v přímce kolmé na rovinu mřížky ve vzdálenosti 1–500 mm od mřížky.

Nejprve bylo měření provedeno s mřížkou pro průtoky 150, 200, 250 a 300 l/min, což byla maximální přípustná hodnota průtoku stanovená výrobcem průtokoměru a následně bylo provedeno měření bez mřížky pro průtok 150 a 300 l/min pro porovnání.

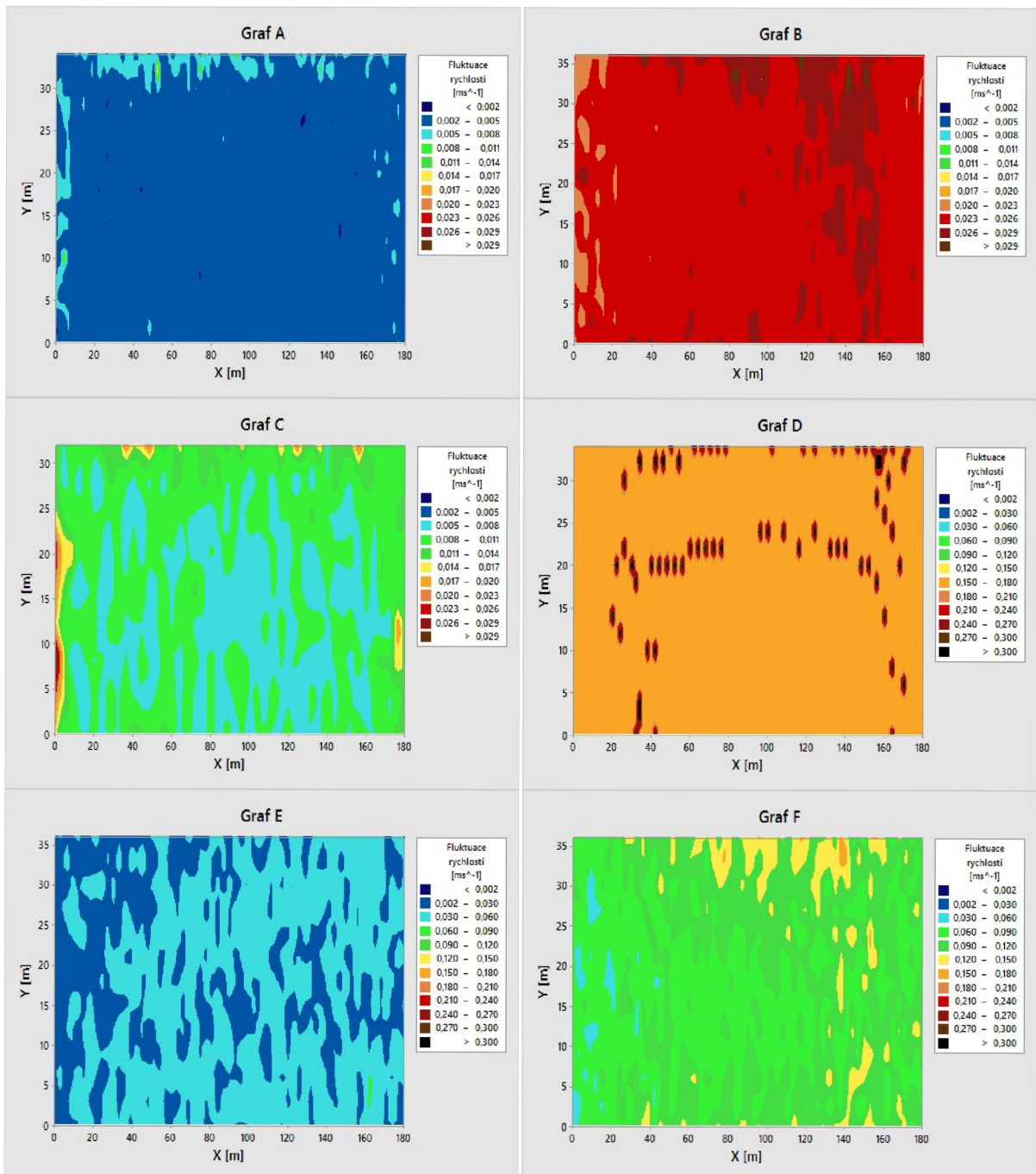
Před každým měřením byla provedena kalibrace měřicího zařízení, která zajistila přesnost naměřených rychlostí s chybou maximálně 2 %.

Průtok byl udržován v rozmezí ± 2 l/min, pauza na dokmit traverzovacího systému byla nastavena na 3 sekundy, teplota v průběhu všech měření se pohybovala v rozmezí 19–21°C a atmosférický tlak byl 96,9–97,2 kPa.

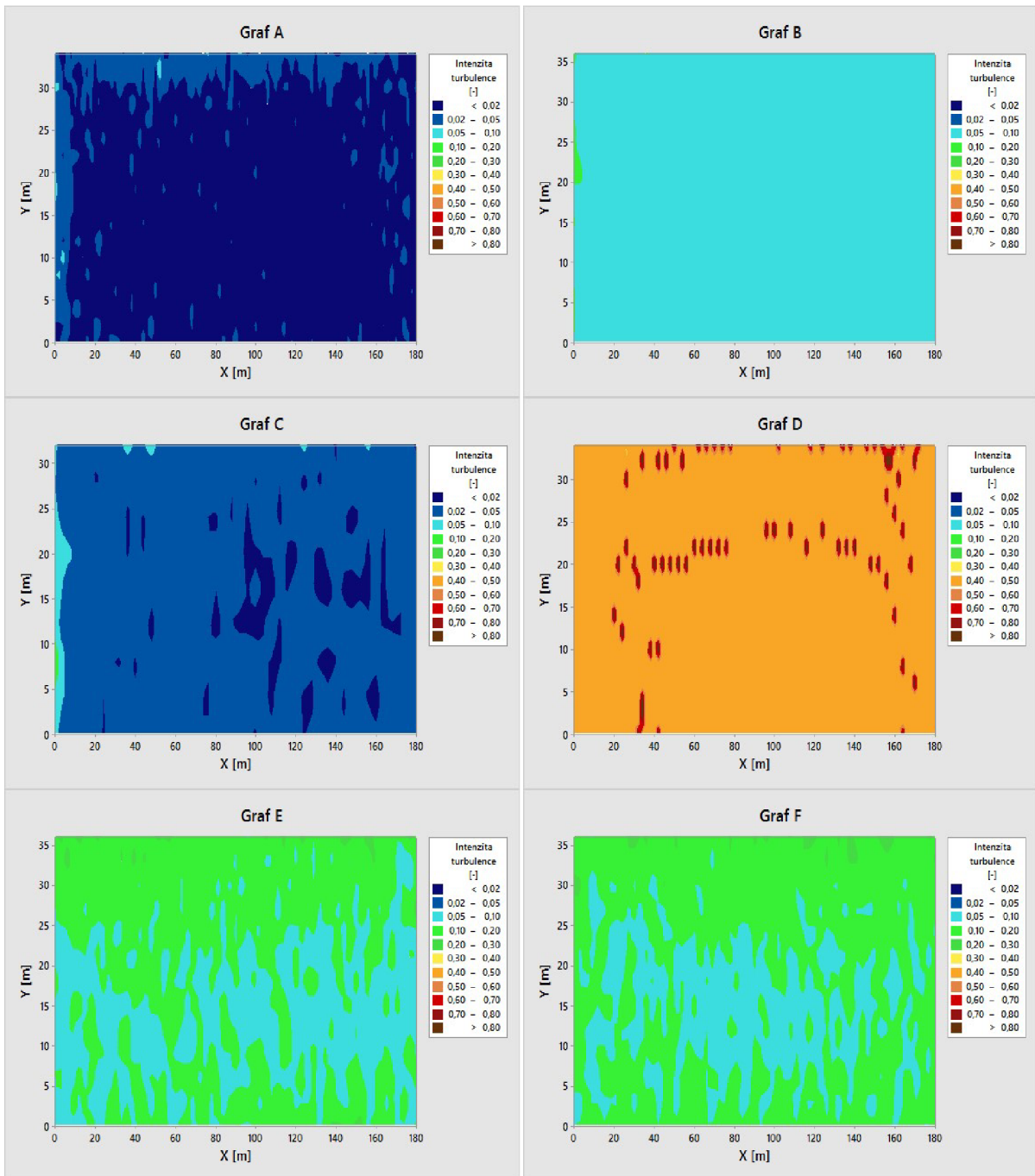
3.7 Naměřené hodnoty



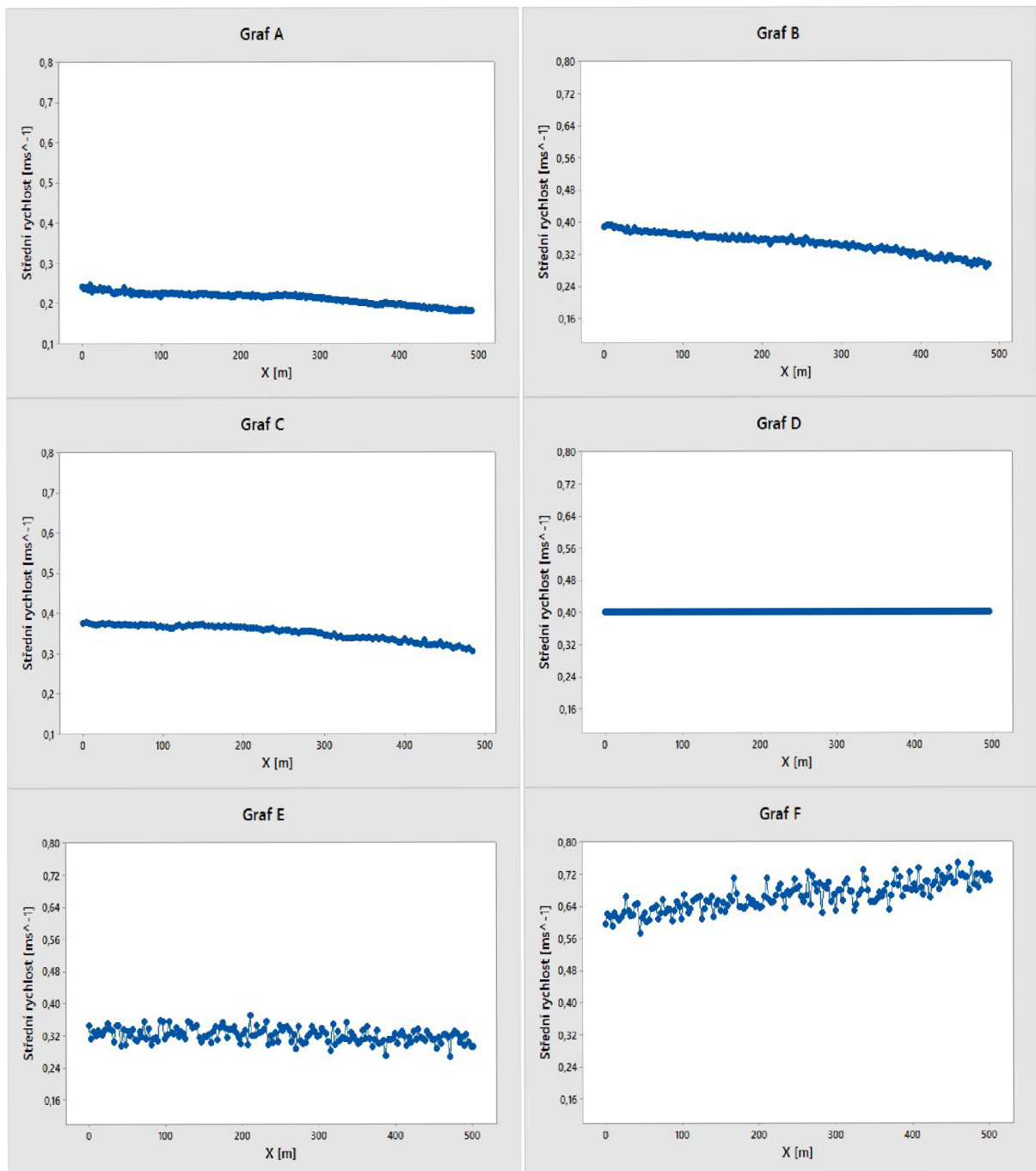
Obr. 16 - Střední rychlost v rovině 200 mm za mřížkou při průtoku: A) 150 l/min s mřížkou; B) 200 l/min s mřížkou; C) 250 l/min s mřížkou; D) 300 l/min s mřížkou; E) 150 l/min bez mřížky; F) 300 l/min bez mřížky



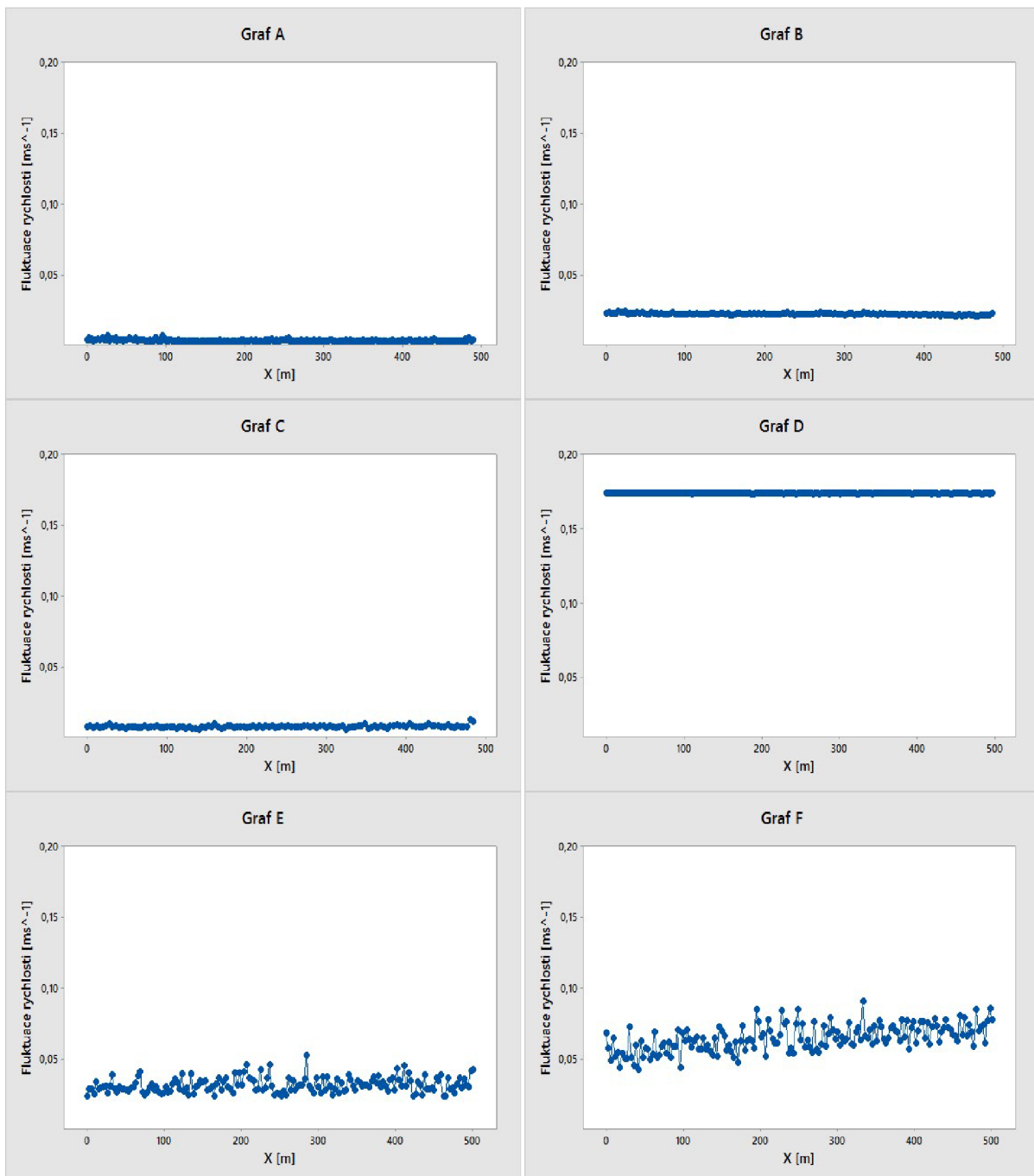
Obr. 17 - Fluktuace rychlosti v rovině 200 mm za mřížkou při průtoku: A) 150 l/min s mřížkou; B) 200 l/min s mřížkou; C) 250 l/min s mřížkou; D) 300 l/min s mřížkou; E) 150 l/min bez mřížky; F) 300 l/min bez mřížky



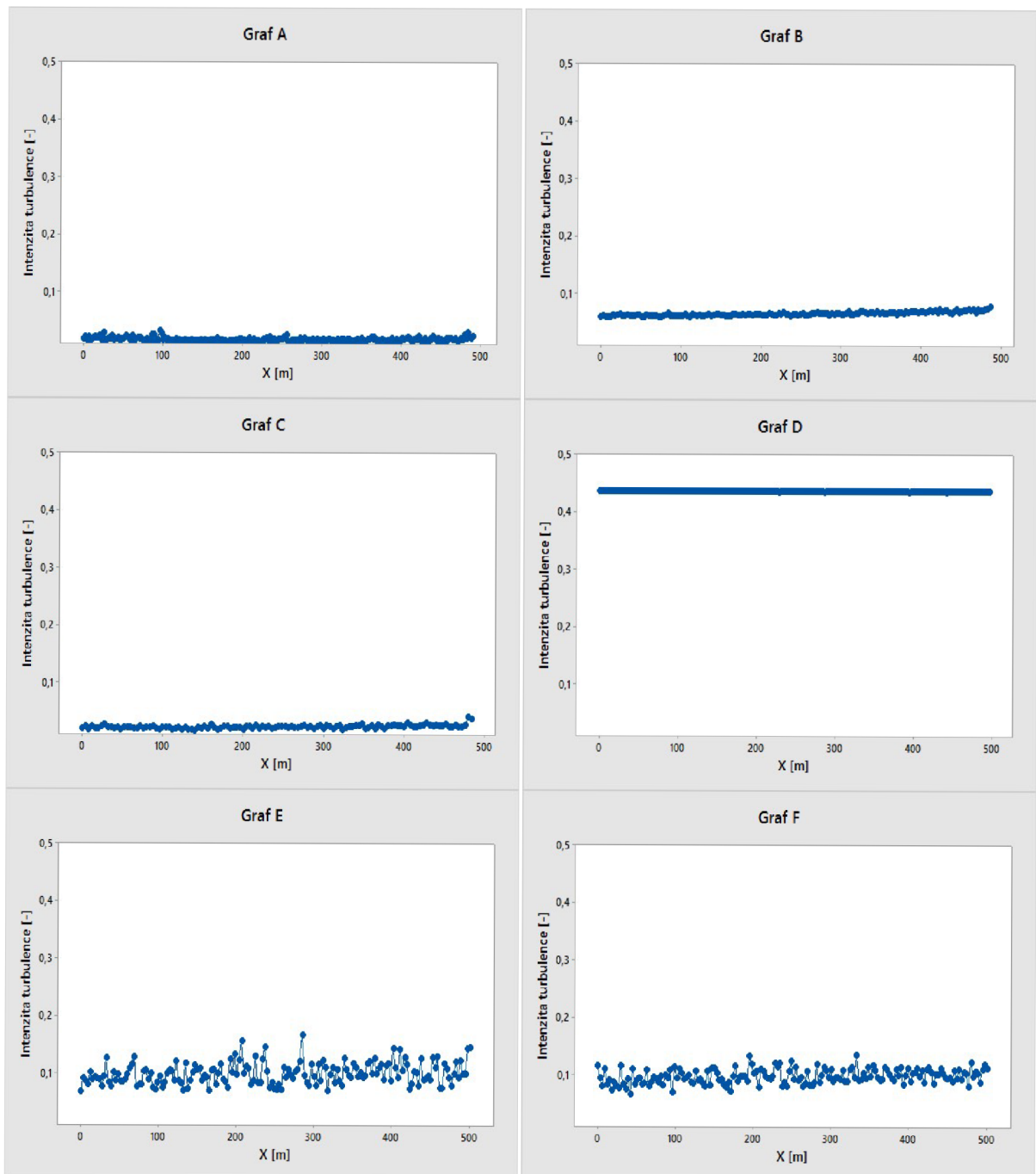
Obr. 18 - Intenzita turbulence v rovině 200 mm za mřížkou při průtoku: A) 150 V/min s mřížkou; B) 200 V/min s mřížkou; C) 250 V/min s mřížkou; D) 300 V/min s mřížkou; E) 150 V/min bez mřížky; F) 300 V/min bez mřížky



Obr. 19 - Střední rychlost v přímce kolmé na rovinnu mřížky při průtoku: A) 150 V/min s mřížkou; B) 200 V/min s mřížkou; C) 250 V/min s mřížkou; D) 300 V/min s mřížkou; E) 150 V/min bez mřížky; F) 300 V/min bez mřížky



Obr. 20 - Fluktuace rychlosti v přímce kolmé na rovinu mřížky při průtoku: A) 150 l/min s mřížkou; B) 200 l/min s mřížkou; C) 250 l/min s mřížkou; D) 300 l/min s mřížkou; E) 150 l/min bez mřížky; F) 300 l/min bez mřížky



Obr. 21 - Intenzita turbulence v přímce kolmé na rovinu mřížky při průtoku: A) 150 V/min s mřížkou; B) 200 V/min s mřížkou; C) 250 V/min s mřížkou; D) 300 V/min s mřížkou; E) 150 V/min bez mřížky; F) 300 V/min bez mřížky

3.8 Diskuse výsledků měření

Během měření nastaly situace, které vnaší do výsledků nejistoty. Mezi nejistoty patří už samotná přesnost měřícího zařízení, které bylo před každým měřením zkalibrováno na chybu maximálně 2 %. Nebylo možné udržet konstantní proud vzduchu, který kolísal o ± 2 l/min dle průtokoměru, což při nejnižším měřeném průtoku vnaší nejistotu dalších až 2,7 %. Samotný průtokoměr měl přesnost uváděnou výrobcem 2 % nebo 0,05 l/min, podle toho, která hodnota je vyšší a platí pro standardní podmínky. Vzhledem k odchylce od standardních podmínek je přesnost průtokoměru nižší a u experimentu, řešeného v této práci, byla stanovena na 2,2 %.

Původně bylo záměrem naměřené hodnoty rychlosti korigovat přepočtem rychlosti v závislosti na průtoku (aby bylo dosaženo hodnoty rychlosti pro konstantní průtok). Avšak od tohoto záměru bylo upuštěno z důvodu, že průtokoměr byl umístěn ve vzdálenosti 1 800 mm od roviny měření a s ohledem na nízké rychlosti proudění by to vneslo do naměřených dat ještě další chybu. Navíc samotný průtokoměr měří také s určitou odchylkou přesnosti a v určitých časových intervalech, proto byla tato možnost zavržena. Pro příští měření doporučuji, jako možné řešení, umístit ještě jednu jednodrátkovou sondu do přívodního kanálu. Vzhledem k tomu, že sondy by měly spolu synchronizovaný čas, bylo by možné spočítat, za jak dlouho doputuje částice vzduchu od sondy v přívodním kanálu k místu měření proudění za mřížkou a získaná data by se mohla využít ke korekci.

Celková přesnost měření je součtem všech jednotlivých nejistot podle zákona šíření chyb.

Měření probíhalo ve vzdálenosti menší než dvacetinásobku rozteče ok mřížky. Z toho podle Uruby [12] plyne, že ještě nelze předpokládat homogenní a izotropní turbulenci. Tudíž se dá v měřené oblasti předpokládat spolu reagující úplavy.

Na obr. 16, grafech A až D lze vidět, že v pravé části je střední rychlost proudění vyšší než v levé, což může být, dle konzultace s panem Bc. Janem Šípem, způsobeno ne zcela rovnoměrným proudem vzduchu v potrubí. To lze klást za vinu kolenu (ohnutí hadice o 180°) vzhledem k měřicí trati těsně před vstupem do této tratě. Jiné řešení z prostorových důvodů laboratoře a současně probíhajícím dvěma experimentům nebylo možné. Pro zrovnomení proudu měla trať na začátku umístěnou voštinu jako narovnávač proudu a následovala uklidňující část v délce více než 10násobku hydraulického průměru. Jako jedno z možných vysvětlení se nabízí vznik nezjištěné chyby při měření. Pro pátrání po příčině bylo měření provedeno stejným způsobem bez mřížky a jak je patrné z obr. 16, grafů E a F, stále je v pravé části potrubí vyšší střední rychlost proudění, avšak už ne s tak velkým rozdílem oproti části levé. Proto se jako další z možných vysvětlení nabízí, že rovina měření nebyla zcela rovnoběžná s rovinou mřížky, a zatímco u měření bez mřížky se tento nedostatek neprojevil tak markantním způsobem, u měření s mřížkou, která ovlivnila proudění, se toto již projevilo více. Z obr. 16, grafů E a F lze také vyčíst typické projevy laminárního proudění, což se nám potvrdí také u grafů následujících, přestože u proudění 300 l/min už Reynoldsovo číslo překonalo uváděnou kritickou hodnotu 2 300 pro proudění v měřeném kanálu. Není bez zajímavosti, že bez mřížky byl rozsah naměřených středních rychlostí proudění několikanásobně vyšší oproti rozsahu středních rychlostí při měření s mřížkou. Avšak vzhledem k tomu, že bylo měření prováděno pouze v jedné rovině a turbulentní proudění vykazuje velké rozdíly v chování v jednotlivých bodech a čase, nelze tomuto jevu přikládat příliš velkou váhu, jelikož v o něco málo odlišné vzdálenosti od mřížky mohou být rychlosti naprosto odlišné. Avšak z logického hlediska je pochopitelné, že rychlosti proudění s mřížkou byly nižší než bez ní, protože mřížka působí proti proudění jako odpor a současně, když způsobuje turbulence, tak u nich dochází k daleko vyšší disipaci energie.

Z obr. 17, grafů A a B je patrné, že se zvyšující se rychlostí proudění se fluktuace rychlosti zvyšuje, ale u průtoku 250 l/min, jak lze vidět na grafu C z obr. 17, vykazuje změnu

trendu a na grafu D se nacházejí místa s vyšší i nižší velikostí fluktuace ve srovnání s menšími průtoky. Změna trendu však může být způsobena chybou při měření, a proto doporučuji toto měření zopakovat. Při nejpomalejším měřeném proudění byly fluktuace rychlosti u měření bez mřížky vyšší než s ní, což ale může být způsobeno také větším rozsahem středních rychlostí, zatímco u nejrychlejšího měřeného proudění tomu bylo právě naopak. Z toho lze usuzovat, že při vyšší rychlosti proudění se překvapivě proudění více ustálilo.

Z výše napsaného lze odvodit intenzitu turbulence, o kterou jde v této práci především. Z obr. 18 je možné vyvodit, že se zvyšující se rychlostí proudění se za mřížkou zvyšuje také intenzita turbulence, což se shoduje s tím, že tam nastává vyšší hodnota Reynoldsova čísla, opět s odchylkou od trendu při průtoku 250 l/min.

Je zajímavé, že jak plyne z grafů E a F na obr. 18, intenzita turbulence při proudění v potrubí bez mřížky nezáleží na průtoku a je stále prakticky totožná.

Při nízkém průtoku je intenzita turbulence za mřížkou nižší, než pokud tam mřížka není, z čehož plyne, že mřížka působí na proudění jako tlumič turbulence, zatímco u vyšších průtoků je tomu již naopak a mřížka tedy působí jako generátor turbulencí.

Na obr. 19 lze pozorovat střední rychlost proudění v přímce kolmé na mřížku ve vzdálenosti 1–500 mm od mřížky. Při nižších průtocích přes mřížku má střední rychlost sestupný charakter. Na konci měřeného úseku byl pozorován výskok rychlosti, který byl s největší pravděpodobností způsoben měřením na hranici vyústění potrubí (kanálu) do volného prostoru, a proto byly tyto body vyloučeny z vyhodnocení. S vyšším průtokem rychlost již kolísá okolo střední hodnoty. Po odstranění mřížky bylo při nízkém průtoku pozorován mírně klesající trend rychlosti při vzdalování se od roviny, ve které se původně nacházela mřížka, zatímco s rostoucím průtokem se trend začal obracet a se vzdalováním se od roviny mřížky se rychlost zvyšovala. Jako pravděpodobné vysvětlení se zdálo být spínání kompresoru, ale nebyla zjištěna žádná závislost mezi spínáním kompresoru a naměřenými daty.

Z obr. 20 lze vidět, že rychlost ve všech případech fluktuuje okolo jedné hodnoty. Pouze při proudění bez mřížky nastává lehce rostoucí trend. Z grafů lze dále odhadnout, že čím je větší průtok, tím vyšší fluktuace rychlosti nastávají s výjimkou při průtoku 250 l/min, jak lze vidět na obr. 20, grafu C, ale toto měření bylo již dříve zpochybněno.

Na obr. 21 je vyobrazena intenzita turbulence v přímce kolmé na mřížku ve vzdálenosti 1–500 mm od mřížky. Při proudění s mřížkou vzhledem k nedostatku měření nelze s jistotou nalézt pravidlo, kterým se řídí velikost intenzity turbulence. Při proudění bez mřížky, stejně jako při měření v rovině rovnoběžné s rovinou mřížky, nezáleží na průtoku a intenzita turbulence nabývá stále téměř shodných hodnot, jako tomu bylo v případě měření v rovině.

4 Závěr

Byla provedena rešerše současného stavu poznání v oblasti generování a tlumení turbulence mřížkou, následně byl proveden praktický experiment a vyhodnocena naměřená data.

V experimentu se podařilo vyvolat chování mřížky jako tlumiče turbulence i jako generátoru turbulence, přičemž bylo ověřeno, že kritická hodnota mřížkového Reynoldsova čísla může skutečně ležet v intervalu $<36,74>$, jak uvádí Ertunc [25].

Pro dosažení přesnějších výsledků a eliminaci výchylek průtoku by bylo možné použít vývěvu. Tím by se mohla také vyrovnat rychlost proudění v levé a pravé části kanálu, pokud byla skutečně způsobena vlivem kolena. Ovšem vývěva nebyla po celou dobu experimentu k dispozici a nebylo by pak možné provádět měření v celé rovině za mřížkou, ale jen v několika osách a do kanálu by musely být vyvrtány díry pro sondu z důvodu, že vývěva musí být umístěna za kanálem, zatímco vzduchojem byl připojen na vstupu do kanálu. Případně by šlo použít větší vzduchojem s citlivějším spouštěním kompresoru, ve kterém by tolik nekolísala tlak a tudíž by pak byl také průtok vyrovnanější, toto však v době experimentu možné nebylo.

K získání cennějších informací by bylo vhodné měření provádět ve 3D prostoru za mřížkou a nejen v rovině a následně přímce. Nejlépe měření poté několikrát zopakovat, aby bylo eliminováno riziko vzniku chyb. Každé měření však zvolenou metodou probíhá velmi dlouhou dobu a nebylo to v rozsahových možnostech této práce ani v kapacitních možnostech laboratoře, ale je možné na tuto práci navázat a další měření provést v budoucnu.

Měření bylo prováděno pouze pro jednu konkrétní mřížku. Aby bylo možné získané poznatky aplikovat do praxe, je potřeba měření provést pro velké množství různých druhů mřížek a nalezení správných zákonitostí, kterými se proudění za nimi řídí.

Je také možné měření provádět až pro konkrétní potřebnou mřížku, ale tento způsob je velmi zdlouhavý a nákladný, proto se výrobci mnohem častěji a raději uchylují k výpočtům podle již známých zákonů a fyzikálních principů.

Ze získaných dat bylo možné empiricky odvodit vzorec pro intenzitu turbulence za mřížkou. Avšak počet úspěšně provedených měření je malý a u některých naměřených výsledků vzniká pochybnost o jejich správnosti. Z těchto důvodů by bylo matoucí odvozený vzorec uvádět, jelikož by nebyl přesný.

Turbulentní proudění stále ještě nebylo dokonale prozkoumáno a nebyly objeveny všechny zákonitosti, které při něm nastávají. Lidé se s ním však neustále setkávají a jeho podrobnější zkoumání a hledání, jak funguje, a čím se řídí, je důležité pro mnoho oblastí výzkumu, vývoje a optimalizace v nejrůznějších, především průmyslových, odvětvích.

Seznam použité literatury

- [1] Krbové mřížky. Krby a kamna [online]. Praha: Topsis, c2014 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <http://www.topsis.cz/krbove-mrizky>
- [2] LÍZAL, F.; JEDELSKÝ, J.; JÍCHA, M.; HAPALA, R. Rychlostní pole v okolí vyústky pro odmrazování a odmlžování čelního skla osobního automobilu. Vytápění, větrání, instalace, 2016, roč. 25, č. 4, s. 190-196. ISSN: 1210-1389
- [3] Nařízení vlády předpis č. 338/2002 Sb. o technických požadavcích pro zabezpečení přechovávaných zbraní nebo střeliva a o podmínkách skladování, přechovávání a zacházení s černým loveckým prachem, bezdýmným prachem a zápalkami
- [4] RAČEK, Jiří. Mechanika a termomechanika: přehled teorie a úlohy : [určeno stud. 3. roč. oboru elektroenergetika a silnoproudá elektrotechnika]. 3., přeprac. vyd. Brno: VUT, 1992. ISBN 8021404469.
- [5] ŠOB, František. Hydromechanika. Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 8021420375.
- [6] PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.
- [7] PAVELEK, Milan. TERMOMECHANIKA: 11. Termodynamika proudění. Brno: FSI VUT v Brně, Energetický ústav Odbor termomechaniky a techniky prostředí. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/termo/>
- [8] URUBA, Václav. Metody analýzy signálů při studiu nestacionárních jevů v proudících tekutinách. Praha, 2006. Habilitační práce. České vysoké učení technické, Fakulta strojní.
- [9] NOSKIEVIČ, Jaromír. Mechanika tekutin. Praha: SNTL, 1987.
- [10] Vznik mezní vrstvy tekutiny. Encyklopedie fyziky [online]. Online Domain Tools, c2006-2016 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/554-vznik-mezni-vrstvy-tekutiny#>
- [11] RAČEK, Jiří. Technická mechanika: úlohy z mechaniky tekutin a termomechaniky. Vyd. 5. Brno: Zdeněk Novotný, 2008. ISBN 9788021436206.
- [12] URUBA, Václav. Turbulence. 2., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 9788001056004.
- [13] JAHODA, M. Hydromechanické procesy: Turbulence. Praha: VŠCHT, Ústav chemického inženýrství. Dostupné z: <http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/hydro/turbulentni.proudeni.pdf>

- [14] LINHART, Jiří. Mechanika tekutin I. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 9788070437667.
- [151] RAČEK, Jiří. Technická mechanika: mechanika tekutin a termomechanika. Vyd. 2. Brno: Zdeněk Novotný, 2005. ISBN 8021428384.
- [16] DAVIDSON, Lars. An Introduction to Turbulence Models. Göteborg, 2003. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Department of Thermo and Fluid Dynamics.
- [17] JØRGENSEN, Finn. How to measure turbulence with hot-wire anemometers : a practical guide. 1st edition. [s.l.] : Dantec Dynamics A/S, 2001. 56 s. Dostupné z: <http://web.iitd.ac.in/~pmvs/courses/mel705/hotwire2.pdf>
- [18] ZÁCHA, Pavel. Fluent přednášky: Turbulentní proudění. Praha: ČVUT.
- [19] Měli byste se obávat turbulence? Co se s letadlem děje, když začnou otřesy. Flymag [online]. Praha: Flying Academy, c2009-2015 [cit. 2016-12-21]. Dostupné z: <http://www.flymag.cz/article.php?id=10487>
- [20] PAVELEK, Milan. TERMOMECHANIKA: 15. Základy přenosu tepla. Brno: FSI VUT v Brně, Energetický ústav Odbor termomechaniky a techniky prostředí. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/termo/>
- [21] PAVELEK, Milan a Josef ŠTĚTINA. Experimentální metody v technice prostředí. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 9788021434264.
- [22] LOEHRKE, R.I., NAGIB, H.M. Experiments on management of free-stream turbulence [online]. London: Agard, 1972. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/749891.pdf>
- [23] GROTH, J., JOHANSSON, A.V. Turbulence reduction by screens. Journal of Fluid Mechanics, 1988. roč. 197, s. 139–155.
- [24] LIU, R., TING, D.S.K, RANKIN, G.W. On the generation of turbulence with a perforated plate. Experimental Thermal and Fluid Science. 2004. roč. 28, č. 4, s. 307–316.
- [25] ERTUNC, O., a kol. Homogeneity of turbulence generated by static-grid structures. Journal of Fluid Mechanics. 2010. roč. 654, s. 473–500.
- [26] Laminární a turbulentní proudění. Fyzikální sekce Matematicko-fyzikální fakulty UK [online]. Praha: Univerzita Karlova, 2014 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/4_5

- [27] ZARIĆ, Zoran. Memorial International Seminar on Near-Wall Turbulence: Quasi-coherent structures in the turbulent boundary layer. Dubrovnik, Yugoslavia, 1988.
- [28] JANALÍK, Jaroslav. Měření turbulentních fluktuací rychlosti. Ostrava: VŠB TU Ostrava, fakulta strojní, 2006.
- [29] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr (ed.). Fyzika. 2., přeprac. vyd. Přeložil Miroslav ČERNÝ. Brno: VUTIUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 9788021441231.
- [30] BRUUN, H.H. Hot-Wire Anemometry: principles and Signal Analysis. 2 ed. Oxford: Oxford University Press/, 1996. ISBN 0198563426.
- [31] Probes for Hot-wire Anemometry. Dantec dynamics. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/general-literature>
- [32] Technical Reference. Dantec Dynamics [online]. Skovlunde: Dantec Dynamics, c2013 [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/hot-wire-and-hot-film-probes-technical-reference>
- [33] NĚMEČEK, Pavel. Nejistoty měření. Praha: Česká společnost pro jakost, 2008. Kvalita, quality, Qualität. ISBN 9788002020899.
- [34] HOLČÍK, Jiří. Vzorkování. Brno: LF MUNI, Institut biostatistiky a analýz. Dostupné z: <http://www.iba.muni.cz/summer-school2009/res/file/holcik-vzorkovani.pdf>
- [35] KOMRSKA, Jiří. Fourierovské metody v teorii difrakce a ve strukturní analýze: Vzorkovací teorém. Brno: VUT FSI. Dostupné z: <http://physics.fme.vutbr.cz/~komrska/Fourier/KapF14.pdf>
- [36] BALDWIN, L.V. et al.: "Heat Transfer from Transvers and Yawed Cylinders in Continuum, Slip, and Free Molecule Air Flows." Journal of Heat Transfer, May 1960.

Seznam zkratk

LDA - Laser doppler anemometry (Laserová dopplerovská anemometrie)

CTA - Constant Temperature Anemometry (Termoanemometrie s konstantní teplotou čidla)

Seznam symbolů

Symbol	Rozměr	Veličina
A	m^2	plocha
A_p	m^2	charakteristická plocha
c_o	-	součinitel celkového odporu
F_o	N	odporová síla
h	Jkg^{-1}	měrná entalpie
I	A	elektrický proud
I_x	%	x složka intenzity turbulence
I_y	%	y složka intenzity turbulence
I_z	%	z složka intenzity turbulence
l	m	charakteristický rozměr
\dot{m}	$kg s^{-1}$	hmotnostní tok
n	-	počet měření
p	Pa	okamžitý tlak
\bar{p}	Pa	střední tlak
p'	Pa	okamžitá odchylka tlaku
P	W	příkon
Q	$m^3 s^{-1}$	objemový průtok
\dot{Q}	W	tepelný tok
R	Ω	elektrický odpor
Re	-	Reynoldsovo číslo
s	-	výběrová směrodatná odchylka
$s(t)$	-	signál
$S(\omega)$	-	spektrální funkce signálu
t_0	s	čas od počátku měření
T_∞	K	teplota proudící tekutiny
Tu	-	intenzita turbulence
T_w	K	teplota žhaveného drátku
u	ms^{-1}	rychlostní měřítko
U	V	elektrické napětí
v	$m^3 kg^{-1}$	měrný objem
w	ms^{-1}	rychlost
w_∞	ms^{-1}	rychlost nenarušeného proudu
\bar{w}	ms^{-1}	střední rychlost
w_i	ms^{-1}	jednotlivé naměřené rychlosti
w'	ms^{-1}	okamžitá odchylka rychlosti
$\overline{w'_x}$	ms^{-1}	střední hodnota fluktuace rychlosti v ose x
$\overline{w'_y}$	ms^{-1}	střední hodnota fluktuace rychlosti v ose y
$\overline{w'_z}$	ms^{-1}	střední hodnota fluktuace rychlosti v ose z
x_i	-	naměřené hodnoty opakovaných měření
\bar{x}	-	aritmetický průměr naměřených hodnot
y	-	naměřené hodnota
y^*	-	předpokládaná správná hodnota
$\bar{\alpha}$	$W m^{-2} K^{-1}$	střední součinitel tepla
Δy	-	odchylka naměřené hodnoty
ε	$m^2 s^{-3}$	disipace

η	-	relativní chyba
ν	m^2s^{-1}	kinematická viskozita
ρ	kgm^{-3}	hustota
$\bar{\rho}$	kgm^{-3}	střední hustota
$\sigma_{p'}$	ms^{-1}	směrodatná odchylka fluktuace tlaku
$\sigma_{w'}$	ms^{-1}	směrodatná odchylka fluktuace rychlosti
ω	s^{-1}	úhlová rychlost

Seznam obrázků

Obr. 1 - mřížka v rámu [1].....	16
Obr. 2 - Děrovaný plech jako [archiv autora].....	17
Obr. 3 - Rychlostní profily v kanále [7]	18
Obr. 4 - Dynamická mezní vrstva [7].....	18
Obr. 5 - Závislost rychlosti na čase s ohledem na druh proudění [13].....	19
Obr. 6 - Příklady charakteristických dynamických mezních vrstev [20].....	21
Obr. 7 - Průběh rychlosti v závislosti na čase [14].....	23
Obr. 8 - Kouřová vizualizace proudění za mříž.....	24
Obr. 9 - Druhy sond - A jednodrátková; B dvoudrátková; C třídrtáková [31].....	27
Obr. 10 - Schéma zapojení pro CTA [28]	28
Obr. 11 - Rozměry sondy 55 R 01 v milimetrech [31].....	31
Obr. 12 - Schéma měřícího zařízení [17]	31
Obr. 13 - Blokové schéma tratě	31
Obr. 14 - Kanál použitý k měření	32
Obr. 15 - Mřížka použitá k měření [archiv autora].....	32
Obr. 16 - Střední rychlost v rovině 200 mm za mřížkou.....	34
Obr. 17 - Fluktuace rychlosti v rovině 200 mm za mřížkou.....	35
Obr. 18 - Intenzita turbulence v rovině 200 mm za mřížkou	36
Obr. 19 - Střední rychlost v přímce kolmé na rovinu mřížky.....	37
Obr. 20 - Fluktuace rychlosti v přímce kolmé na rovinu mřížky	38
Obr. 21 - Intenzita turbulence v přímce kolmé na rovinu mřížky	39

Seznam tabulek

Tab. 1 - Vstupní data pro výpočty.....	33
Tab. 2 - Zjištění střední rychlosti proudění a Reynoldsova čísla v závislosti na průtoku	33