

Latvijas Universitāte
Fizikas un matemātikas fakultātes
Fizikas nodaļas maģistra studiju
1. kursa studenta
Ģirta Zāģera (gz11027)

Laboratorijas darbs Nr. 5
“Vidējoto ātrumu un pulsāciju sadalījumi turbulentās plūsmās”

Darba mērķis

Iepazīties ar plūsmas vidējoto ātrumu un ātruma pulsāciju sadalījumu iegūšanu izmantojot konstantas temperatūras anemometru, kā arī apgūt teorētisko apskatu šiem raksturlielumiem.

Darba uzdevumi:

1. Nodēfēt konstantas temperatūras anemometra parametrus.
2. Izmērīt vidējoto ātrumu un ātruma pulsāciju sadalījumu caurules šķērsgrīzumā.
3. Aprēķināt ātrumu sadalījumus ar turbulences modeļa $k - \epsilon$ palīdzību un salīdzināt ar izmērītajiem.

Darba piederumi:

Diferenciālais manometrs, multimetrs voltmetra režīmā, ventilators ar regulējamu plūsmas ātrumu, cilindriskā caurule, Pito caurule, KTA zonde, koordinātu galda, koordinātu galda vadības bloks, eksperimenta vadības dators

Teorētiskais pamatojums:

Hidrodinamikā apskatītās gāzu un šķidrumu plūsmas iedala divās lielās kategorijās – laminārās un turbulentās plūsmas. Laminārās plūsmas ir plūsmas, kurās šķidrumā visi slāņi pārvietojas savstarpēji paralēli un nenotiek to sajaukšanās vai krustošanās. Savukārt turbulentās plūsmās notiek haotiskas izmaiņas, plūsmas slāņi sajaucas, veidojot spontānus virpuļus. Laminārās plūsmas tipiski novērojamas pie zemiem plūsmas ātrumiem un viskoziem šķidrumiem, bet turbulence iestājas pie lielākiem plūsmas ātrumiem.

Turbulentām plūsmām neeksistē analītiskas izteiksmes, kas nosaka to uzvedību katrā laika momenta, tāpēc tām ievieš statistiskas dabas raksturlielumus. Apskatot turbulenci, plūsmas parametrus laikā sadala vidējās vērtībās un pulsācijās:

$$\varphi(t) = \bar{\varphi}(t) + \varphi'(t)$$

Turbuletai plūsmai, tātad, ātrums tiek aprēķināts pēc šādām izteiksmēm:

$$u_{mean} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \bar{\varphi}(t) dt = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i$$
$$u_{RMS} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \varphi'(t) dt = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u'_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_i - u_{RMS})^2}$$

Lielums u_{mean} atbilst vidējam plūsmas ātrumam, bet u_{RMS} raksturo pulsācijas plūsmā. Jo lielākas ir fluktuācijas plūsmā, jo tā ir turbulentāka. Turbulences intensitāti Tu definē kā:

$$Tu = \frac{u_{RMS}}{u_{mean}}$$

Turbulences intensitāte ļauj salīdzināt dažādu plūsmu turbulenci pie viena un tā paša plūsmas ātruma.

Lai tuvināti aprakstītu turbulentos procesus, eksistē vairāki matemātiskie modeļi. Viens no izplatītākajiem modeļiem ir $k - \varepsilon$ modelis, kas par turbulentas plūsmas raksturlielumiem ņem turbulences kinētisko enerģiju k , kas raksturo virpuļu un pulsāciju ātrumu, un ε , kas raksturo to, cik ātri turbulentas parādības plūsmā disipē.

Šajā darbā būtiski izmantojama izteiksme ir k saistība ar vidējo pulsāciju ātrumu:

$$k = \frac{3}{4} u_{RMS}^2$$

Datu iegūšana un apstrāde:

1) Kalibrēšana

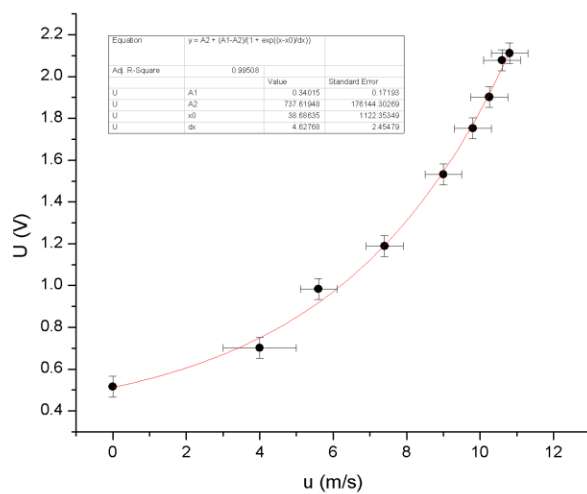
Lai veiktu mērījumus, vispirms nepieciešams kalibrēt zondi. Tāpēc nepieciešams fiksēt, kādu spriegumu rada zonde pie zināmiem ātrumiem. Lai to izdarītu, tika izmantots diferenciālais manometers, no kura var nolasīt spiediena vērtību p , ko rada plūsma Pito caurulē, un arī plūsmas ātrumu:

Tabula 1 - Plūsmas ātruma kalibrēšana pēc multimetra sprieguma rādījumiem

p , Pa	Δp , Pa	U , V	ΔU , V	u , m/s	Δu , m/s	u_T , m/s
0	2.5	0.516	0.05 V	0	0	0
10		0.702		4	1	3.94
35		1.189		7.4	0.5	7.37
20		0.984		5.6	0.5	5.57
50		1.532		9	0.5	8.80
60		1.752		9.8	0.5	9.64
65		1.902		10.25	0.5	10.04
70		2.078		10.6	0.5	10.42
73		2.112		10.8	0.5	10.64

Aprēķināto plūsmas ātrumu u_T var iegūt no Pito caurules izteiksmes - $u_T = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$. Kļūdas p un u lielumiem tiek novērtētas, izejot no tā, cik precīzi var nolasīt mērījumu no manometra (ātrumam skala nav lineāra).

Iegūtās sprieguma vērtības atbilst noteiktām plūsmas ātruma vērtībām. Lai varētu kalibrēt KTA zondi, iegūtie dati tiek interpolēti ar kādu funkciju, kas apskatāmajā intervālā to labi apraksta:

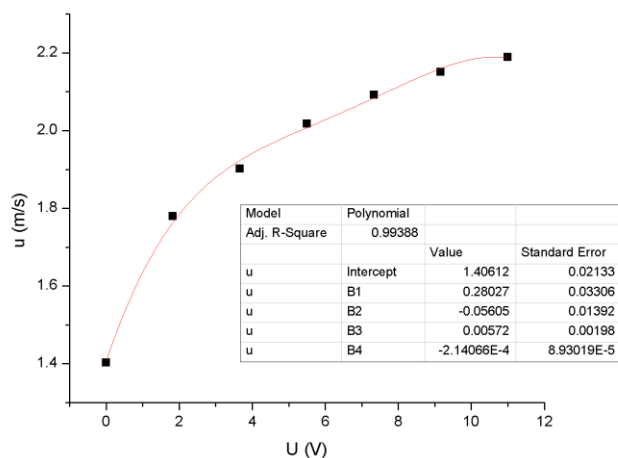


Attēls 1 - multimetra rādījumu kalibrācijas līkne pēc plūsmas ātruma

Iegūtā kalibrācijas datu tabula un līkne (att 1.):

Tabula 2 - Kalibrācijas dati

$u, \text{m/s}$	U, V
0.001	1.403
1.834	1.779
3.667	1.902
5.501	2.017
7.334	2.092
9.167	2.151
11	2.189



Attēls 2 - KTA zondes kalibrācijas līkne

Iegūtie kalibrācijas dati tiek piedzīti ar ceturtais kārtas polinomu (tā, kā to dara programmatūra, kura darbina KTA zondi).

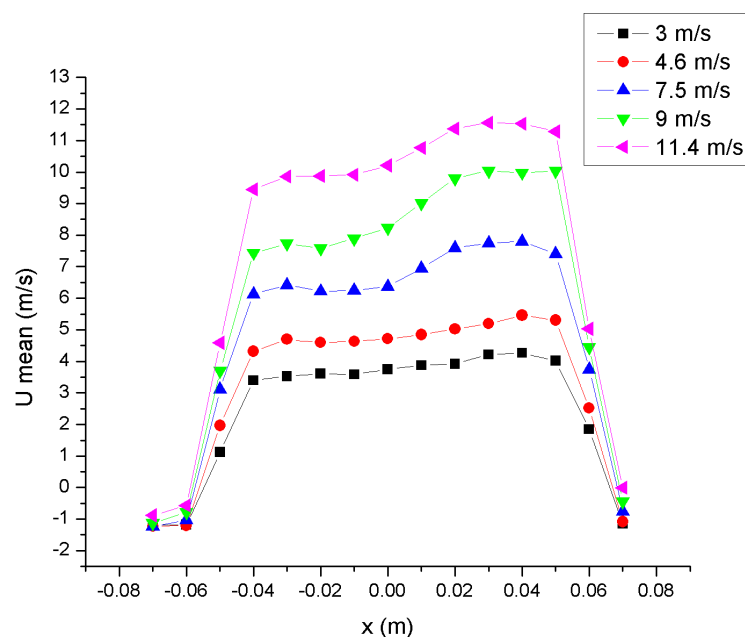
2) Plūsmas sadalījumu mērīšana

Katrā mērījumā tika uzstādīts plūsmas ātrums, kas atbilda iepriekš iegūtajai kalibrācijas līknei, un tika izdarīti mērījumi pie šāda plūsmas stāvokļa, kad fens bija nostājies stacionārā stāvoklī.

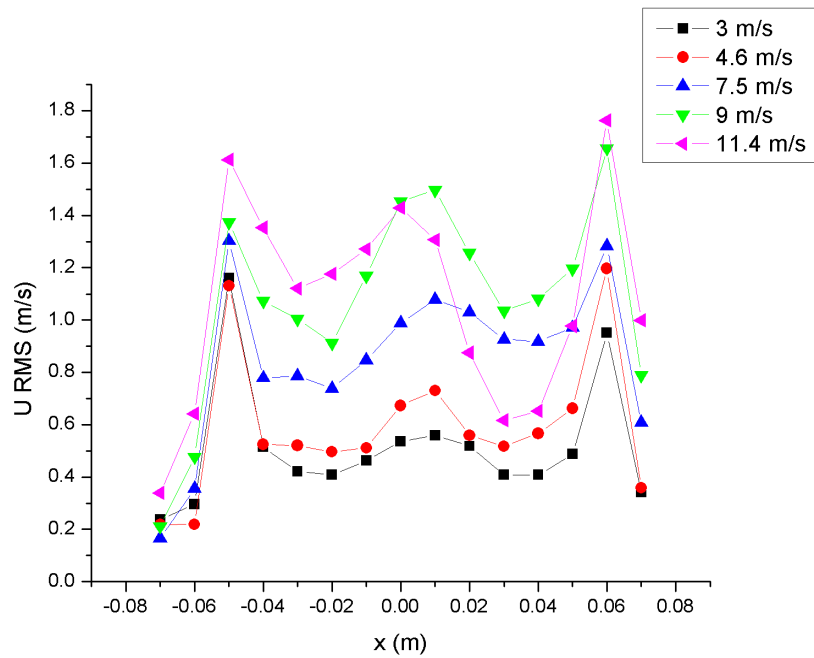
Tabula 3 - Plūsmas ātruma sadalījumu mērījumi

	$u = 3 \text{ m/s}$		$u = 4.6 \text{ m/s}$		$u = 7.5 \text{ m/s}$		$u = 9 \text{ m/s}$		$u = 11.4 \text{ m/s}$	
$x, \text{ m}$	$u_{\text{mean}}, \text{ m/s}$	$u_{\text{RMS}}, \text{ m/s}$	$u_{\text{mean}}, \text{ m/s}$	$u_{\text{RMS}}, \text{ m/s}$	$u_{\text{mean}}, \text{ m/s}$	$u_{\text{RMS}}, \text{ m/s}$	$u_{\text{mean}}, \text{ m/s}$	$u_{\text{RMS}}, \text{ m/s}$	$u_{\text{mean}}, \text{ m/s}$	$u_{\text{RMS}}, \text{ m/s}$
-0.07	-1.18	0.24	-1.23	0.22	-1.23	0.17	-1.13	0.21	-0.88	0.34
-0.06	-1.18	0.30	-1.20	0.22	-1.03	0.36	-0.78	0.48	-0.57	0.64
-0.05	1.13	1.16	1.97	1.13	3.11	1.30	3.70	1.37	4.58	1.61
-0.04	3.40	0.51	4.32	0.53	6.13	0.78	7.44	1.07	9.45	1.35
-0.03	3.53	0.42	4.69	0.52	6.42	0.79	7.73	1.01	9.86	1.12
-0.02	3.61	0.41	4.59	0.50	6.23	0.74	7.58	0.91	9.87	1.18
-0.01	3.58	0.46	4.63	0.51	6.25	0.85	7.90	1.17	9.92	1.27
0	3.75	0.54	4.72	0.67	6.37	0.99	8.23	1.45	10.21	1.43
0.01	3.87	0.56	4.85	0.73	6.95	1.08	9.02	1.50	10.76	1.31
0.02	3.92	0.52	5.02	0.56	7.60	1.03	9.80	1.26	11.38	0.88
0.03	4.21	0.41	5.20	0.52	7.75	0.93	10.04	1.04	11.57	0.62
0.04	4.27	0.41	5.46	0.57	7.80	0.92	9.98	1.08	11.53	0.65
0.05	4.01	0.49	5.31	0.66	7.41	0.97	10.03	1.20	11.28	0.98
0.06	1.84	0.95	2.52	1.20	3.74	1.28	4.44	1.66	5.03	1.76
0.07	-1.15	0.34	-1.09	0.36	-0.76	0.61	-0.44	0.79	-0.01	1.00

Iegūtie rezultāti tika attēloti grafiski:

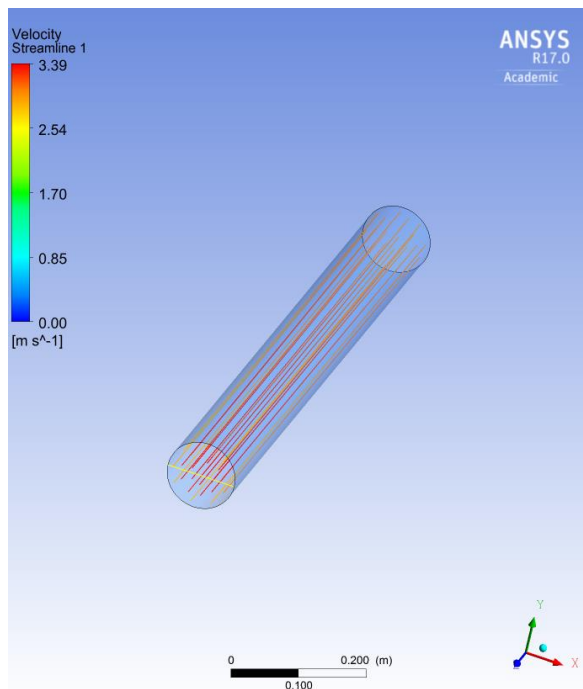


Attēls 3 - Vidējoto ātrumu sadalījums plūsmā

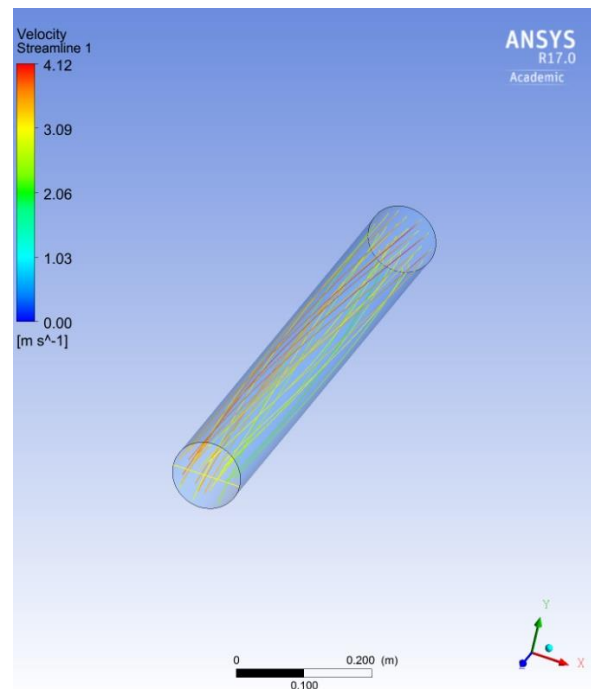


Attēls 4 - Pulsāciju sadalījums plūsmā

Abie šie lielumi tika salīdzināti ar skaitliskiem aprēķiniem, izmantojot $k - \varepsilon$ modeli divos dažādos gadījumos – kad plūsma ir vērsta aksiāli gar cauruli, un kad tā vērsta nedaudz ieslīpi, turklāt plūsmai ieeja piešķirot rotācijas tangenciālo komponenti (simulējot fēna darbību). Slīpums ir $x:y:z = 1:1:10$.



Attēls 5 - aksiāla plūsma

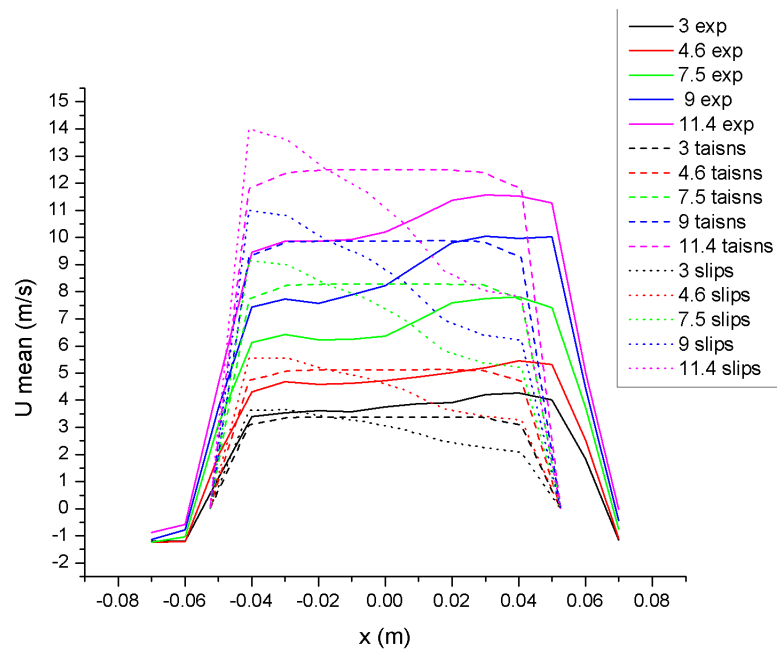


Attēls 6 - ieslīpa plūsma pret aksiālo virzienu ar rotējošu raksturu

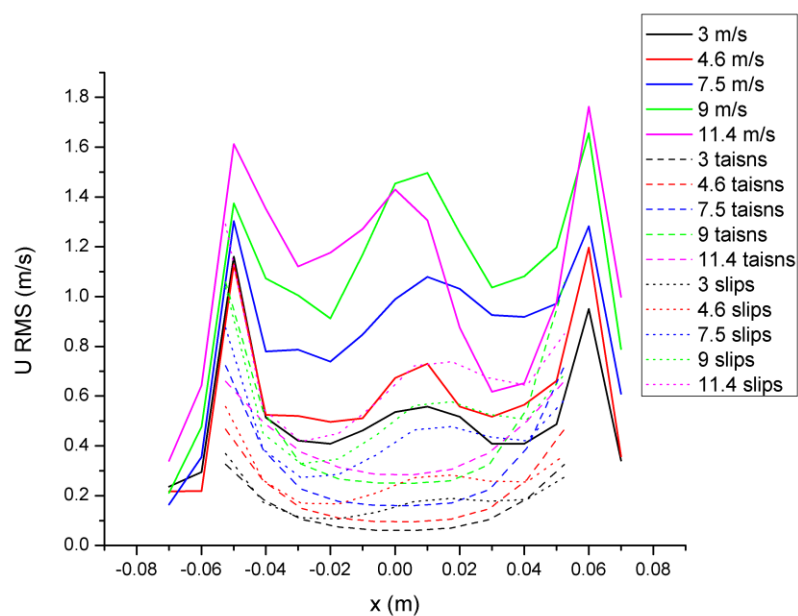
Abos gadījumos plūsmu ātrumi tika ņemti tādi paši, kādi tika uzstādīti eksperimentāli, un turbulences intensitāte ieejā tika uzdota tāda, kādu iegūst, ja atrod Tu caurules viduspunktā.

Iegūtie skaitliskie lielumi bija u_{mean} un turbulences kinētiskā enerģija k , no kuras tika novērtēts

u_{RMS} pēc sakarības $u_{RMS} = \sqrt{\frac{4}{3}k}$:



Attēls 7 - vidējoto ātrumu salīdzinājums ar skaitliskiem aprēķiniem

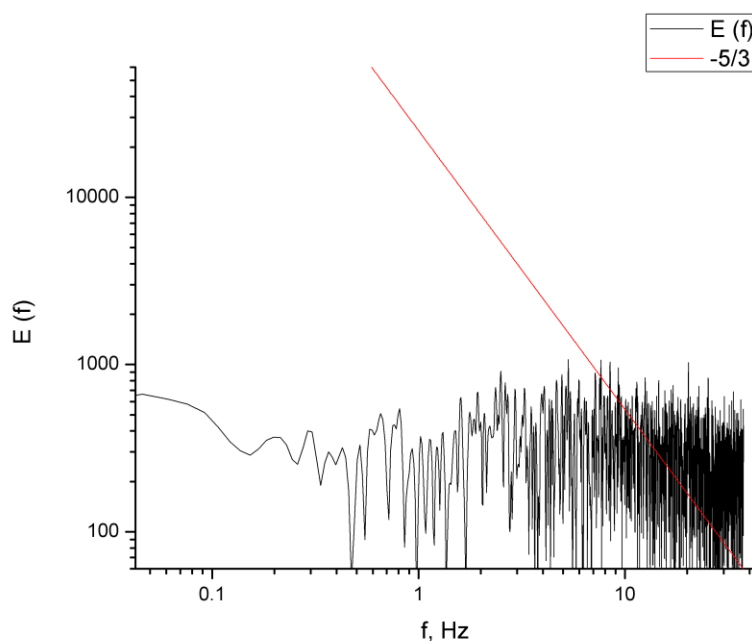


Attēls 8 - pulsāciju sadalījuma salīdzinājums ar skaitliskiem aprēķiniem

Salīdzinājumā redzams, ka abu lielumu u_{mean} un u_{RMS} grafikos pie dažādām ātrumu vērtībām ir slikta sakritība starp skaitlisko aprēķinu aksiālai plūsmai un eksperimentā novēroto. Vidējoto ātrumu vērtības ir aptuveni atbilstošas, taču sadalījuma līkne nav atbilstoša (eksperimentā tā ir asimetriska, bet skaitliskajā aprēķinā ir simetriska), bet pulsāciju sadalījumā sakritības nav ne pēc vērtībām, ne pēc līknes rakstura. Tāpēc tika izdarīts vēl viens skaitlisks aprēķins, apsverot iemeslus, kas nesakritību varēja radīt – tika pieļauts, ka fēns, iespējams, nav pūtis gaisu tieši aksiālā virzienā, kā arī gaisu iegriezis. Uzliekot šādus nosacījumus, līknes kļūst līdzīgākas, kaut arī joprojām pēc vērtībām atšķiras. Tas ļauj spriest, ka precīzie nosacījumi, kas uzdoti aprēķinā, atšķiras no reālās situācijas, bet līkņu rakstura līdzība ļauj apgalvot, ka tieši fēna asimetrija pret cauruli un plūsmas iegriešana ir pie vainas tam, ka eksperimentālie rezultāti nesakrīt ar sagaidāmo.

3) Spektrālā sadalījuma salīdzinājums ar Kolmogorova teoriju:

Tika ievākti arī dati par plūsmas jaudas spektrālo sadalījumu:



Attēls 9 - Plūsmas jaudas spektrs log-log asīs

Dati tiek salīdzināti ar Kolmogorova teoriju, kas apgalvo, ka pie lieliem Reinoldsa skaitļiem ir vērojama proporcionalitāte $E(f) \sim f^{-5/3}$. Redzams, ka pie lielākām frekvenču vērtībām sakarība tuvināti izpildās, tomēr, lai varētu korekti spriest, būtu nepieciešami dati pie lielākām frekvencēm, jo šobrīd no spektra sakrītošās daļas ar taisni redzama vien maza daļa, kas neļauj izdarīt konkrētus spriedumus.

Šajā daļā spektrs un taisne $f^{-5/3}$ pēc slīpuma tomēr labi nesakrīt, bet tas visticamāk ir skaidrojams, ka nav sasniegti augsti Reinoldsa skaitļi šajā eksperimentā.

Secinājumi un darba analīze

Darbā iegūtās plūsmu sadalījuma līknes neatbilda sagaidāmajam raksturam – to parāda lielā atšķirība starp eksperimentu un skaitlisko aprēķinu aksiālas, turbulentas plūsmas gadījumā. Būtu sagaidāms, izejot no fakta, ka caurule ir simetriska, ka arī plūsma būs simetriska, kas arī ieraugāms skaitliskajos aprēķinos, taču eksperimentāli ir bijis kāds faktors, kas simetriju nojauc. Tika izvirzīta hipotēze, ka tas bijis fēna asimetrijas dēļ pret caurules asi, kā arī tāpēc, ka fēns plūsmu iegriež. Salīdzinot šādi iegūtus rezultātus, redzams, ka vismaz līkņu raksturi ir līdzīgi gan vidējotajiem ātrumiem, gan pulsācijām, kaut arī precīzas vērtības pēc lieluma nav iegūtas. Jāpiemetina, ka konkrētu vērtību novērtēšanai vajadzētu lietot precīzāku ierīci par to diferenciālo manometru, kas tika lietots darbā, jo ātrumu novērtēšana pēc kalibrācijas līknes bija aptuvena. Tam par iemeslu bija voltmetra mērījumu asā mainīšanās, kas neļāva nolasīt konkrētu vērtību. To ietekmē plūsmas turbulence – lai no šī atbrīvotos, būtu sprieguma vērtības jāuzkrāj laikā un jāatrod vidējā vērtība, kuru tad varētu lietot.

Kaut arī manometra precizitāte neļāva iegūt vienādus rezultātus skaitliskajos aprēķinos un eksperimentāli, ar šo precizitāti pilnīgi pietika, lai kvalitatīvi novērtētu un salīdzinātu procesus plūsmā.

Vēl grafikos, kas ataino pulsācijas un ātrumu sadalījumus, redzams, ka, palielinoties ātrumam, pieaug vidējo pulsāciju ātrums, kas arī ir sagaidāms – palielinoties ātrumam, palielinās Reinoldsa skaitlis, tātad plūsma paliek arvien turbulentāka.

Salīdzinot plūsmas jaudas spektrālo sadalījumu ar teorētisko paredzējumu, ka $E(f) \sim f^{-5/3}$, pie $f > 10 \text{ Hz}$ nojaušama eksperimentālo rezultātu tuvināšanās šim paredzējumam. Tomēr dati ir iegūti pārāk mazā frekvenču diapazonā, lai izdarītu kvalitatīvus spriedumus. No tā datu daudzuma, kas ir iegūts, var izdarīt secinājumu, ka jaudas spektrs gluži nesakrīt ar Kolmogorova paredzēto, kas varētu būt skaidrojams ar to, ka Reinoldsa skaitļu vērtības nav ļoti lielas.