

### Teorētiskais pamatojums:

Šķidrumu un gāzu plūsmas iedala 2 veidos: lamināras un turbulentas plūsmas. Lamināras plūsmas raksturo kā sakārtotas, tās var būt kā stacionāras tā arī nestacionāras. Turbulentas plūsmas raksturo kā nesakārtotas, haotiskas, tās vienmēr ir nestacionāras.

Lamināru plūsmu cilindriskā caurulē apraksta Puazeja likums. Tas apraksta viskoza šķidruma ar viskozitātes koeficientu  $\mu$  kustību caurulē ar rādiusu  $R$ , ja tās garenvirzienā pielikts spiediena gradients  $dp/dx$ :

$$v(r) = -\frac{1}{4}(R^2 - r^2) \frac{dp}{dx} = \frac{U}{R^2}(R^2 - r^2),$$

kur  $U$  – maksimālais plūsmas ātrums uz ass.

No ātruma sadalījuma var iegūt šķidruma tilpumu, kas laika vienībā izplūst cauri cilindram:

$$Q = \frac{V}{t} = -\frac{\pi R^4}{8\mu} \frac{dp}{dx} = \bar{U} \pi R^2,$$

kur  $\bar{U} = U/2$  – vidējais plūsmas ātrums.

Reinoldsa skaitlis raksturo inerces un viskozo spēku attiecību un tas nosaka vai plūsma ir lamināra vai turbulenta, to definē šādi:

$$Re = \bar{U} d / \nu,$$

kur  $d$  – raksturīgais izmērs (caurules diametrs),  $\nu$  – kinemātiskā viskozitāte.

Osborns Reinoldss savos eksperimentos noskaidroja, ka pāreja no lamināras plūsmas uz turbulentu notiek pie noteiktas Reinoldsa skaitļa vērtības, kas caurulēm ir apmēram 2000.

Turbulentās plūsmās mērāmie parametri (ātrums, spiediens, temperatūra, koncentrācija) katrā telpas punktā laikā mainās, tāpēc tās apraksta fizikālo lielumu  $\varphi(t)$  vidējās vērtības  $\bar{\varphi}$  un to pulsācijas  $\varphi'$ :

$$\begin{aligned}\varphi(t) &= \bar{\varphi} + \varphi' \\ \bar{\varphi} &= \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \varphi(t) dt\end{aligned}$$

Turbulenci pēta ar specializētas aparatūras palīdzību, piemēram, konstantas temperatūras anemometriem. To darbības princips balstās uz kustīgās vides konvektīvo siltuma pārnēsi no sensora, kur temperatūra ir augstāka par vides temperatūru. Izmantojot sensora izveidei ļoti maza diametra vadu, kā arī attiecīgas elektroniskās mērījumu shēmas, iespējams izmērīt maza mēroga augstas frekvences ātruma fluktuācijas.

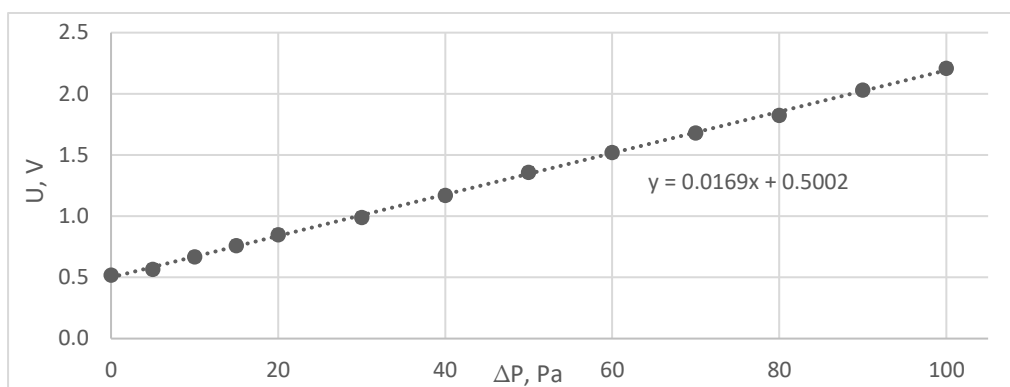
### Darba uzdevumi:

1. Kalibrēt KTA zondi;
2. Izmērīt plūsmas ātrumu ar termoanemometru;
3. Mainot plūsmas ātrumu novērot plūsmas pāreju no lamināras uz turbulentu.

## Mērījumu rezultāti un datu apstrāde:

Tabula 1. Elektroniskā diferenciālā manometra kalibrēšana.

$\Delta P \pm 0.5, Pa$	$U, V$	$\Delta U, V$
0	0.519	0.005
5	0.567	0.006
10	0.668	0.006
15	0.760	0.007
20	0.850	0.008
30	0.990	0.009
40	1.170	0.010
50	1.360	0.012
60	1.520	0.013
70	1.680	0.014
80	1.825	0.016
90	2.030	0.017
100	2.210	0.019



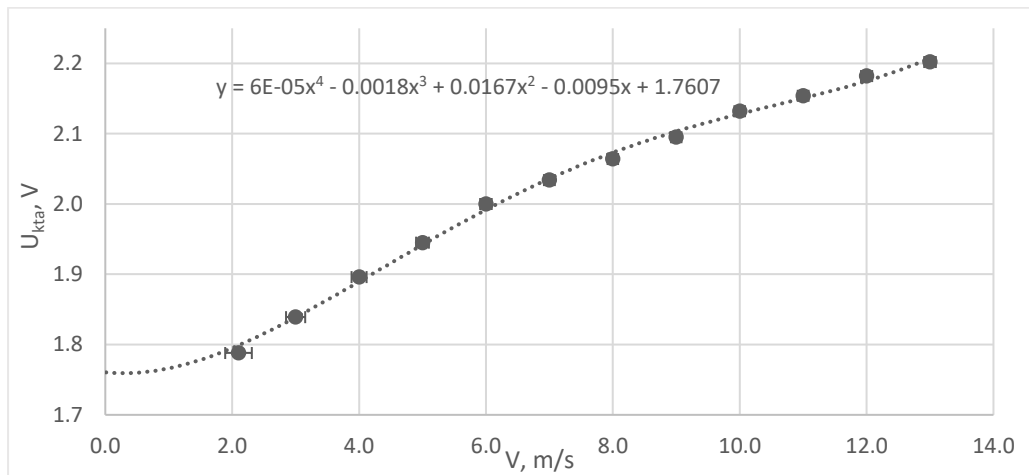
Attēls 1. Elektroniskā diferenciālā manometra kalibrēšanas taisne.

Tabula 2. Elektroniskā diferenciālā manometra kalibrēšanas taisnes koeficienti, to kļūdas.

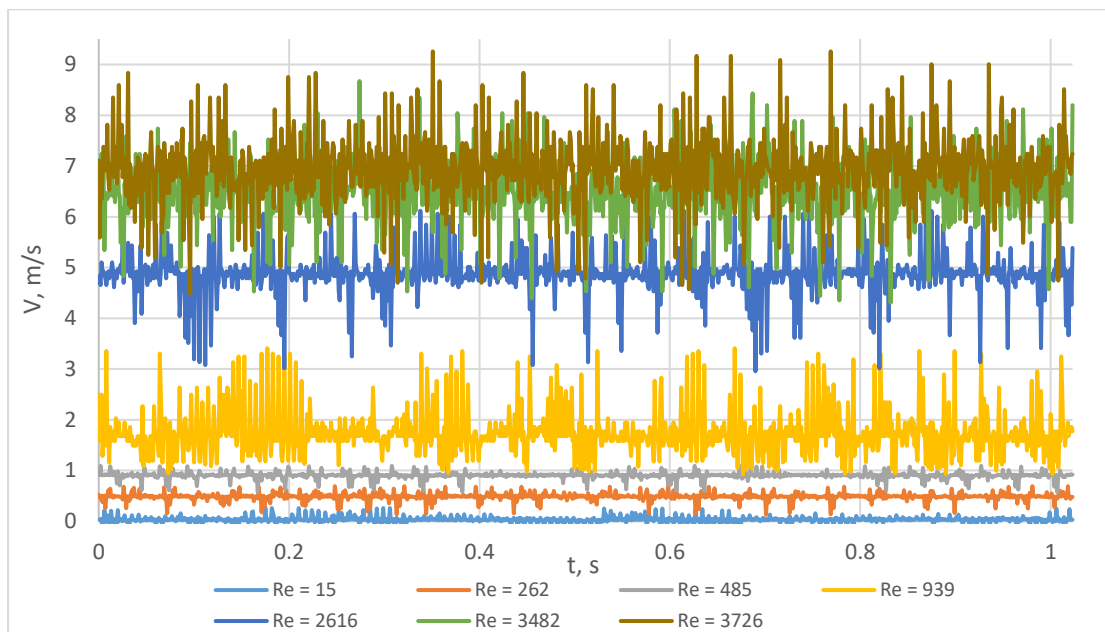
	Vērtība	$\Delta$	$r, \%$
B	0.50015	0.00710	1.44
A	0.01693	0.00013	0.78

Tabula 3. Konstantas temperatūras anemometra kalibrēšana.

$V, m/s$	$U, V$	$\Delta V, m/s$	$U_{kta}, V$
2.1	0.545	0.21	1.788
3.0	0.592	0.15	1.839
4.0	0.663	0.12	1.896
5.0	0.755	0.10	1.945
6.0	0.867	0.09	2.000
7.0	1.000	0.09	2.034
8.0	1.153	0.08	2.064
9.0	1.326	0.08	2.095
10.0	1.520	0.08	2.132
11.0	1.734	0.09	2.154
12.0	1.969	0.09	2.182
13.0	2.223	0.09	2.202



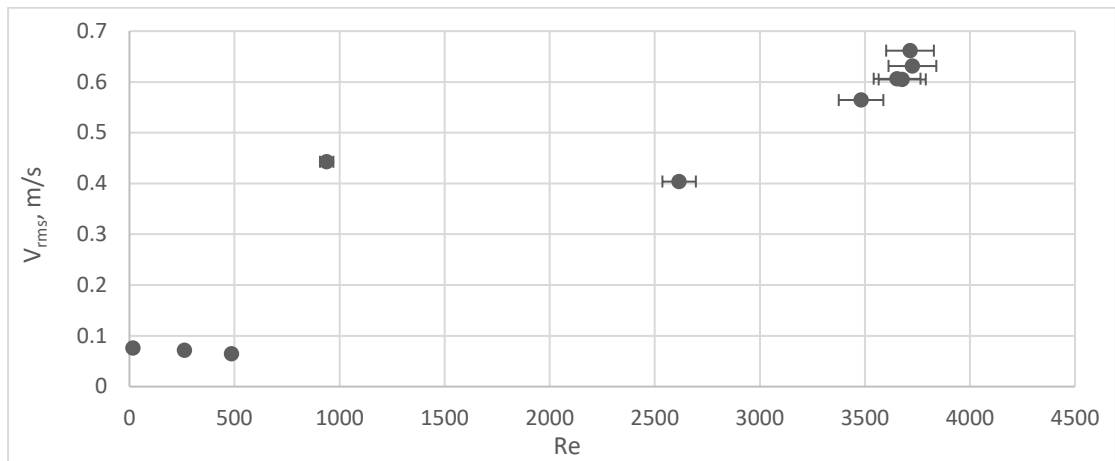
Attēls 2. Konstantas temperatūras anemometra kalibrēšanas līkne.



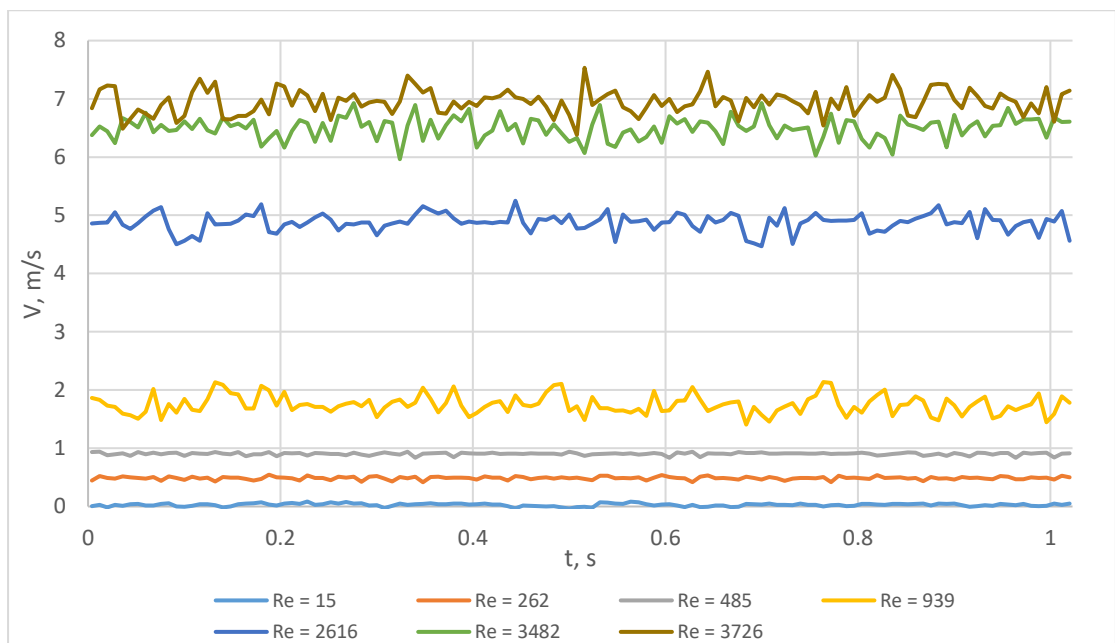
Attēls 3. Ātrums uz caurules ass pie dažādām Reynolds skaitļa vērtībām.

Tabula 4. Darbā apskatītie vidējie plūsmas ātrumi, tiem atbilstošās Reynolds skaitļa un ātruma pulsāciju vērtības.

$\bar{V}, m/s$	$Re$	$\Delta\bar{V}, m/s$	$\Delta Re$	$V_{rms}, m/s$
0.029	17.1	0.005	2.8	0.076
0.488	261.7	0.015	8.2	0.071
0.905	485.1	0.027	14.7	0.064
1.751	938.7	0.059	31.7	0.443
4.879	2615.9	0.148	79.6	0.404
6.494	3481.8	0.198	106.1	0.564
6.814	3653.3	0.208	111.4	0.606
6.859	3677.7	0.209	112.1	0.605
6.929	3714.9	0.212	113.6	0.662
6.950	3726.2	0.212	113.7	0.632



Attēls 4. Ātruma pulsācijas vērtības atkarībā no Reinoldsa skaitļa vērtības.



Attēls 5. Ik pa 8 ms vidējots ātrums uz caurules ass pie dažādām Reinoldsa skaitļa vērtībām.

Aprēķinu piemēri:

- 1) Sprieguma kļūda kalibrējot elektronisko diferenciālo manometru ( $\Delta P=0$  Pa) [1]:

$$\Delta U = 0.008U + 0.001 = 0.008 \cdot 0.519 + 0.001 = 0.005 \text{ V}$$

- 2) Nepieciešamais voltmetra spriegums un plūsmas ātruma kļūda kalibrējot KTA ( $V=2.1$  m/s) [2,3]:

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} ; \Delta P = (U - B)/A \rightarrow$$

$$U = A\rho V^2/2 - B = 0.0169 \cdot 1.205 \cdot 2.1^2/2 - 0.5 = 0.545 \text{ V} ;$$

$$\Delta V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial U} \Delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial A} \Delta A\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial B} \Delta B\right)^2} = 0.21 \text{ m/s}$$

3) Reinoldsa skaitlis ( $\bar{V}=0.029 \text{ m/s}$ ) [3]:

$$Re = \frac{\bar{V}d}{2\nu} = \frac{0.029 \cdot 16.2/1000}{1.51 \cdot 10^{-5}} = 17.1$$

4) Ātruma pulsācijas vērtība ( $\bar{V}=0.029 \text{ m/s}$ ):

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{1024-1} \sum_{i=1}^{1024} (V_i - 0.029)^2} = 0.076 \text{ m/s}$$

### **Secinājumi:**

Laboratorijas darbā tika izmantota konstantas temperatūras anemometra (KTA) kalibrācija un novērota lamināras plūsmas caurulē pāreja uz turbulentu.

KTA kalibrācija veikta 5. laboratorijas darbā – “Vidējoto ātrumu un pulsāciju sadalījumi turbulentās plūsmās”. Kalibrācijas process un rezultāti attēloti Tabulās 1,2,3 un Attēlos 1,2.

Lai novērotu lamināras plūsmas pāreju uz turbulentu, uz caurules ass ar frekvenci 1 kHz tika mērīts ātrums 1024 milisekundes pie dažādām plūsmas ātruma vērtībām (Attēls 3, Tabula 4). Apskatot Attēlu 4, uzskatāmi redzams, ka starp Reinoldsa skaitļu vērtībām 485 un 939 notiek straujš lēcienš ātruma pulsācijas vērtībā. Šis novērojums liek domāt, ka notiek plūsmas rakstura izmaiņa – tā no lamināras kļūst turbulenta. Arī Attēlā 3 novērojams, ka pie Reinoldsa skaitļa vērtības 939 momentānās plūsmas ātruma vērtībās ap vidējo vērtību sāk svārstīties ar ievērojami lielāku amplitūdu. Attēlā 5, redzams ka kvalitatīvi plūsmas raksturs palielinot Reinoldsa skaitli nemainās.

Laminārai plūsmā novērojams Puazeja ātruma sadalījums, tātad, mērot ātruma vērtības caurules centrā, tiek iegūts plūsmas ātrums, kas ir divas reizes lielāks kā telpiski vidējais ātrums caurulē. Šī parādība tika ņemta vērā Reinoldsa skaitļa aprēķinā. Turbulentās plūsmās ātruma sadalījums vairs nav parabolisks, labā tuvinājumā to var uzskatīt kā konstantu pa visu caurules diametru [4]. Tas nozīmē, ka, lai iegūtu korektus Reinoldsa skaitļus turbulentai plūsmai, šajā darbā apskatītās vērtības sākot ar  $Re = 939$  nepieciešams reizināt ar 2. Tātad šajā darbā iegūts, ka lamināras plūsmas pāreja uz turbulentu notiek robežās starp Reinoldsa skaitļa vērtībām 485 un 1878, kas ir mazāk par O. Reinoldsa iegūto vērtību ( $Re = 2000$ ). Šī nesakritība varētu būt saistīta ar ne pietiekami precīzo KTA zondes novietojumu uz caurules ass, kā arī KTA kalibrācija, iespējams, nebija veikta pietiekami precīzi.

Uzskatāmi novērot plūsmas pāreju no lamināras uz turbulentu varētu arī apskatīt vidējotā plūsmas ātruma sadalījuma izmaiņas pa caurules diametru atkarībā no Reinoldsa skaitļa.

### **Izmantotā literatūra:**

1. <http://www.farnell.com/datasheets/1490819.pdf>
2. [https://estudijas.lu.lv/pluginfile.php/357238/mod\\_resource/content/2/1.darbs\\_v0.pdf](https://estudijas.lu.lv/pluginfile.php/357238/mod_resource/content/2/1.darbs_v0.pdf)
3. [http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d\\_156.html](http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html)
4. [http://pillars.che.pitt.edu/student/slide.cgi?course\\_id=10&slide\\_id=13.0](http://pillars.che.pitt.edu/student/slide.cgi?course_id=10&slide_id=13.0)