

3. Lamināras plūsmas pāreja uz turbulentu.

1. Darba mērķi

1. Iepazīties ar plūsmu mērīšanu ar konstantas temperatūras anemometru.
2. Eksperimentā iegūt pāreju no lamināras plūsmas uz turbulentu gaisa plūsmai cilindriskā caurulē un noteikt šīs pārejas Reinoldsa skaitļa vērtību.

2. Teorētiskais apskats

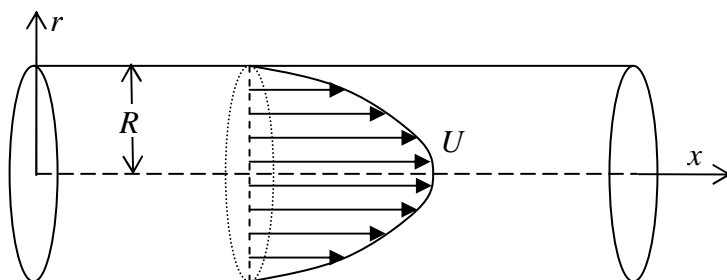
2.1. Ievads

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

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

kur $U = -\frac{R^2}{4\mu} \frac{dp}{dx}$ – maksimālais plūsmas ātrums uz ass.



1.att. Lamināra plūsma cilindrā.

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

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

kur $\bar{U} = \frac{U}{2}$ - vidējais plūsmas ātrums.

Reinoldsa skaitlis raksturo inerces un viskozo spēku attiecību un tas nosaka vai plūsma ir *lamināra* vai *turbulenta*. Reinoldsa skaitlis ir arī līdzības kritērijs – ja divu plūsmu Reinoldsa skaitļi sakrīt, tad plūsmu īpašības arī sakrīt. Šo īpašību izmanto plūsmu modelēšanā.

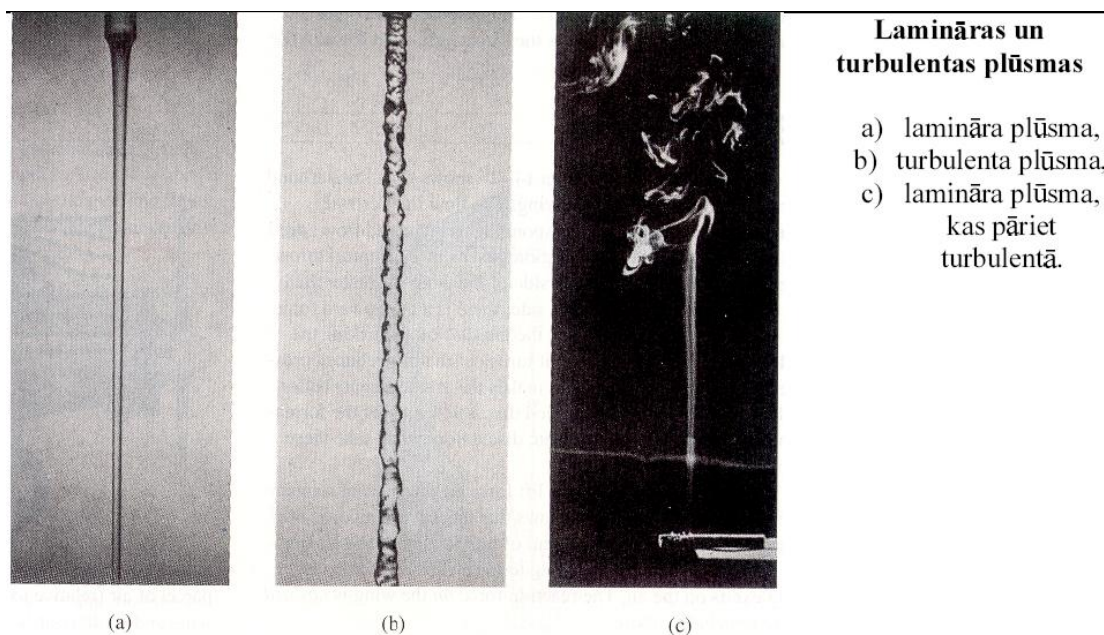
Reinoldsa skaitlis nosaukts Osborne Reynolds vārdā, kurš to piedāvāja 1883.gadā. Caurulei Reinoldsa skaitli definē šādi:

$$\text{Re} = \frac{UR}{\nu} = \frac{\bar{U}d}{\nu},$$

kur

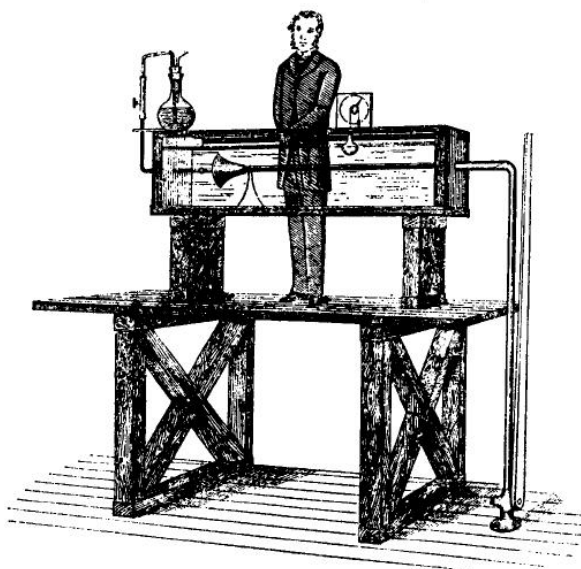
$d=2R$ – raksturīgais izmērs (caurules diametrs),

ν - kinemātiskās viskozitātes koeficients.



2.att. Lamināras un turbulentas plūsmas vizuālās atšķirības.

Turbulence ir parādība, kas novērojama daudzās plūsmās un tā būtiski ietekmē impulsa, siltuma un masas pārnese procesu norisi. Turbulence ietekmē arī enerģijas zudumus šķidrumos un plūsmas radīto troksni. Tas nosaka turbulences pētījumu nepieciešamību un praktisko nozīmi.

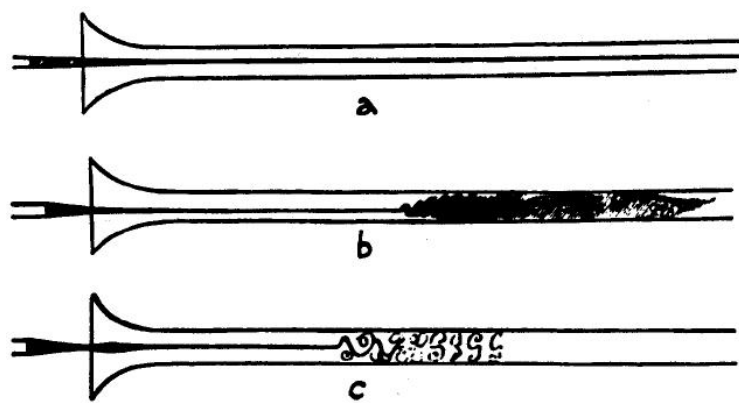


Osborns Reynolds demonstrē pāreju no lamināras plūsmas uz turbulentu

O.Reynolds, On the Experimental Investigation of the Circumstances Which Determine Whether the Motion of Water Shall be Direct or Sinuous, and the Law of Resistance in Parallel Channels, *Philos. Trans. R.Soc.*, vol.174, pp.435-982, 1883.

3.att. Vēsturiskais O.Reinoldsa eksperiments.

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



Pāreja no lamināras plūsmas uz turbulentu

No a) uz c) palielinās plūsmas ātrums caurulē. Caurules centrālajā daļā ievadīta krāsviela plūsmas vizualizācijai.

$Re < 2000$ lamināra plūsma

4.att. Pāreja no lamināras plūsmas uz turbulentu.

Turbulentām plūsmām nav iespējams uzrakstīt vienkāršas sakarības līdzīgi kā analoģu plūsmu gadījumā. Ņemot vērā, ka mērāmie parametri (ātrums, spiediens, temperatūra, koncentrācija) katrā telpas punktā laikā mainās, turbulentu plūsmu gadījumā apskata fizikālo lielumu $\varphi(t)$ vidējās vērtības (parasti laikā) $\bar{\varphi}$ un to pulsācijas φ' :

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

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \varphi(t) dt$$

Turbulenci pēta ar specializētas aparātūras palīdzību – konstantas temperatūras

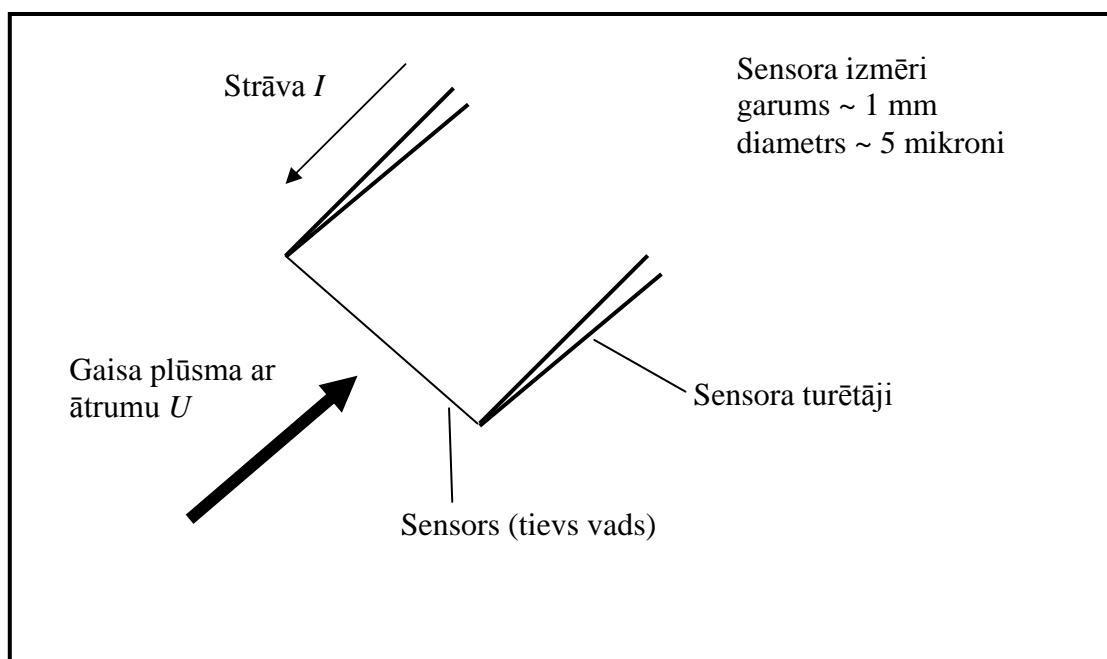
anemometriem KTA (CTA – constant temperature anemometer), lāzeru Doplera anemometriem LDA (LDA – laser Doppler anemometer), daļiņu attēlu apstrādes ātruma mērīšanas metodi (PIV – particle-imaging velocimetry). Mērījumus bieži papildina ar skaitliskās hidrodinamikas rezultātiem (CFD – computational fluid dynamics).

KTA anemometrs darbības princips balstās uz kustīgas vides konvektīvo siltuma pānesi no sensora, kura temperatūra ir augstāka par vides temperatūru. Izmantojot sensora izveidei ļoti maza diametra vadu, kā arī attiecīgās elektroniskās mērījumu shēmas, iespējams mērīt maza mēroga augstas frekvences ātruma fluktuācijas. KTA priekšrocības salīdzinot ar citām metodēm ir:

- vienkārša izmantošanā,
- izejā ir analogs signāls (nav informācijas zudumu),
- ļoti augsta izšķiršanas spēja laikā, ideāli piemērota spektru mērīšanai,
- lētāka nekā LDA vai PIV sistēmas.

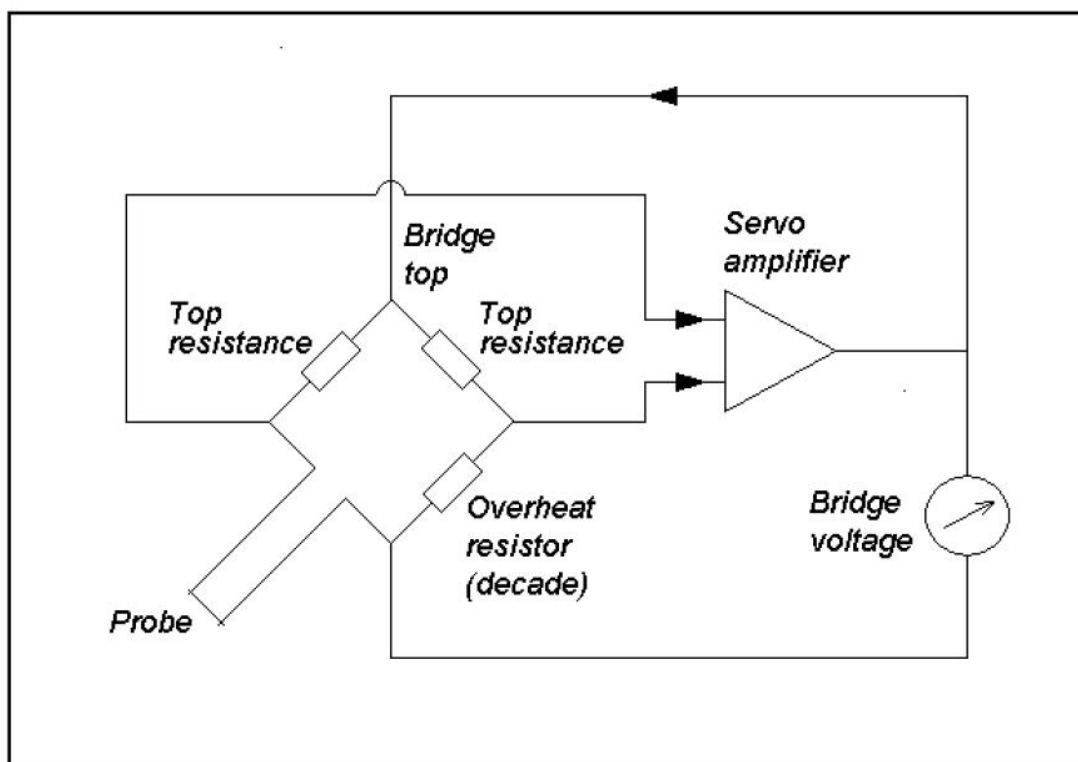
2.2. Konstantas temperatūras anemometra (KTA) darbības princips.

KTA veido tievs vads, kas piestiprināts turētājiem (5.att.). Caur vadu tiek laista strāva, kas to sasilda līdz temperatūrai T_w . Apkārtējā vide ar temperatūru T_0 un plūsmas ātrumu U dzesē sensoru.



5.att. Konstantas temperatūras anemometra darbības princips.

Lai noturētu sensoru pie konstantas temperatūras, strāvai caur to jānodrošina siltuma daudzuma izdalīšanās, kāds ir vienāds ar kustīgās vides aiznesto. To nodrošina ar elektroniskās shēmas palīdzību (6.att.). Signāls shēmas izejā ir nelineāri saistīts ar plūsmas ātrumu, ko parāda sekojošā analīze.



6.att. Konstantas temperatūras anemometra slēguma shēma.

Strāvas izdalītā jauda var aiziet sensora enerģijas izmaiņai un tikt aiznesta ar kustīgās vides palīdzību:

$$W = Q + \frac{dQ_i}{dt},$$

kur

$W = I^2 R_w$ – strāvas izdalītā jauda,

$R_w = R_w(T_w)$ – sensora pretestība, kas ir atkarīga no temperatūras,

Q – apkārtējās vides pārnestā jauda,

$Q_i = C_w T_w$ – sensorā uzkrātais siltuma daudzums,

C_w – sensora siltumietilpība,

T_w – sensora temperatūra.

Stacionārā gadījumā:

$$W = Q = I^2 R_w = hA(T_w - T_0)$$

$$I^2 R_w = \frac{A}{d} Nu k_f (T_w - T_0)$$

kur

h – konvektīvās siltumapmaiņas koeficients,

A – siltumapmaiņas laukums,

d – sensora diametrs,

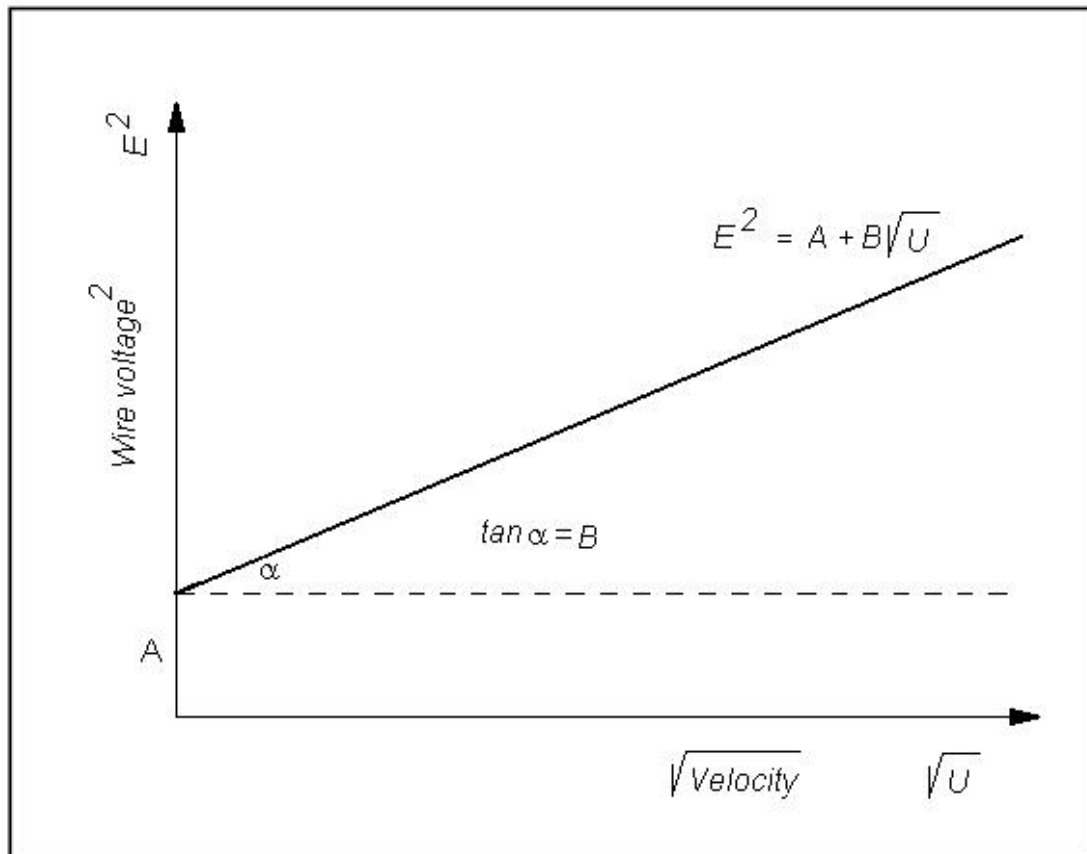
Nu – Nusselta skaitlis, bezdimensiju siltuma pārnese koeficients

$$Nu = \frac{q_{konv}}{q_{kond}} = \frac{hA(T_w - T_0)}{Ak_f \frac{(T_w - T_0)}{d}} = \frac{hd}{k_f} \Rightarrow h = Nu \frac{k_f}{d}$$

Piespiedu konvekcijas gadījumā ($0.02 < Re < 140$):

$$Nu = A_1 + B_1 Re^n = A_2 + B_2 U^n$$

$$I^2 R_w^2 = E^2 = (T_w - T_0)(A + BU^n) - \text{sk.7.att.}$$



7.att. Konstantas temperatūras anemometra signāla atkarība no plūsmas ātruma.

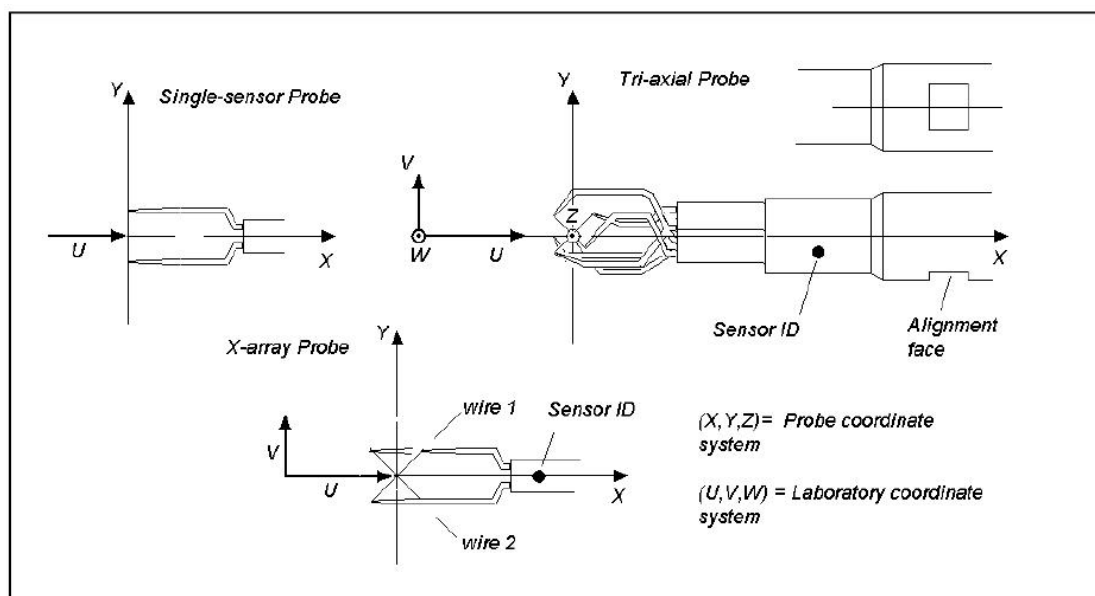
Lai mērītu plūsmas ātrumu, katrā konkrētā KTA sensora gadījumā jāveic kalibrēšana, izmantojot plūsmu ar zināmu ātrumu. Konkrētā KTA konstrukcija tiek veidota kā zonde, kas sastāv no 1, 2 vai 3 sensoriem un, attiecīgi, var mērīt 1, 2 vai trīs ātruma komponentes vienlaicīgi (sk.8.att.). Šajā darbā tiks izmantota zonde ar vienu sensoru. Zondes slēguma shēma parādīta 9.att., attiecīgās iekārtas parādītas 10.att. Izmantotā zonde 55P11 shematiski attēlota 11.att., tās fotogrāfija – 12.att.

Piezīme. Pievērst uzmanību tam, ka sensora izveidei izmantots vads ar ļoti mazu diametru (~5 mikrometri), līdz ar to tā mehāniskā izturība ir neliela. **NEKĀDOS APSTĀKĻOS NEPIESKARTIES SENSORAM AR ROKĀM VAI KĀDU CITU PRIEKŠMETU!** Tas var neatgriezeniski sabojāt sensoru!

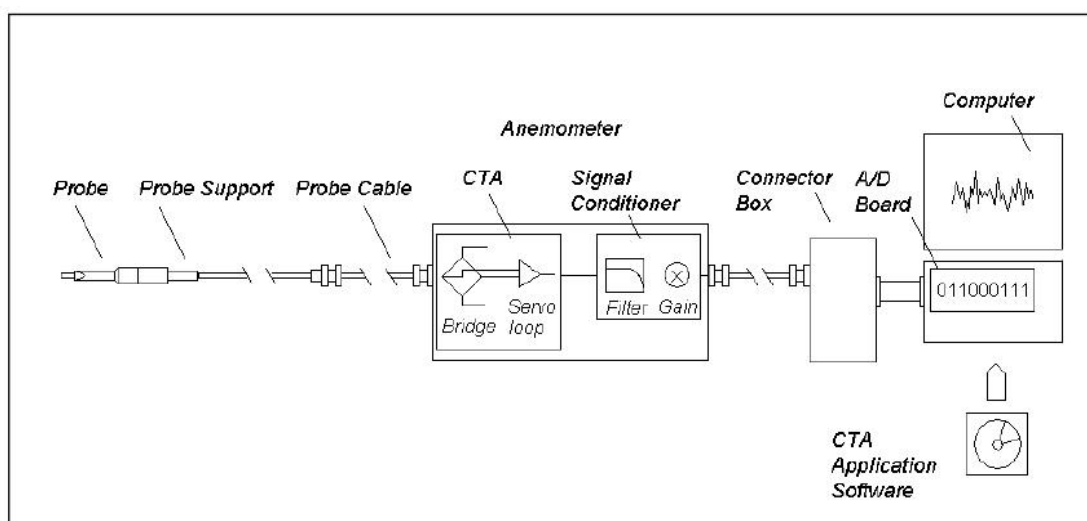
2.3. Eksperimentālā iekārta gaisa plūsmas mērīšanai ar KTA.

Lai precīzi pozicionētu zondes sensoru telpā, izmanto koordinātu galdu (sk.13.att.), kas tiek vadīts ar vadības bloka un datora palīdzību. Avārijas slēdzi ļauj operatīvi apturēt zondes kustību nepareizi uzdotas koordinātes vai citu neparedzētu apstākļu gadījumā.

Piezīme. Šajā darbā sensors jau būs pozicionēts mērījuma vietā un nav jāpārvieto!

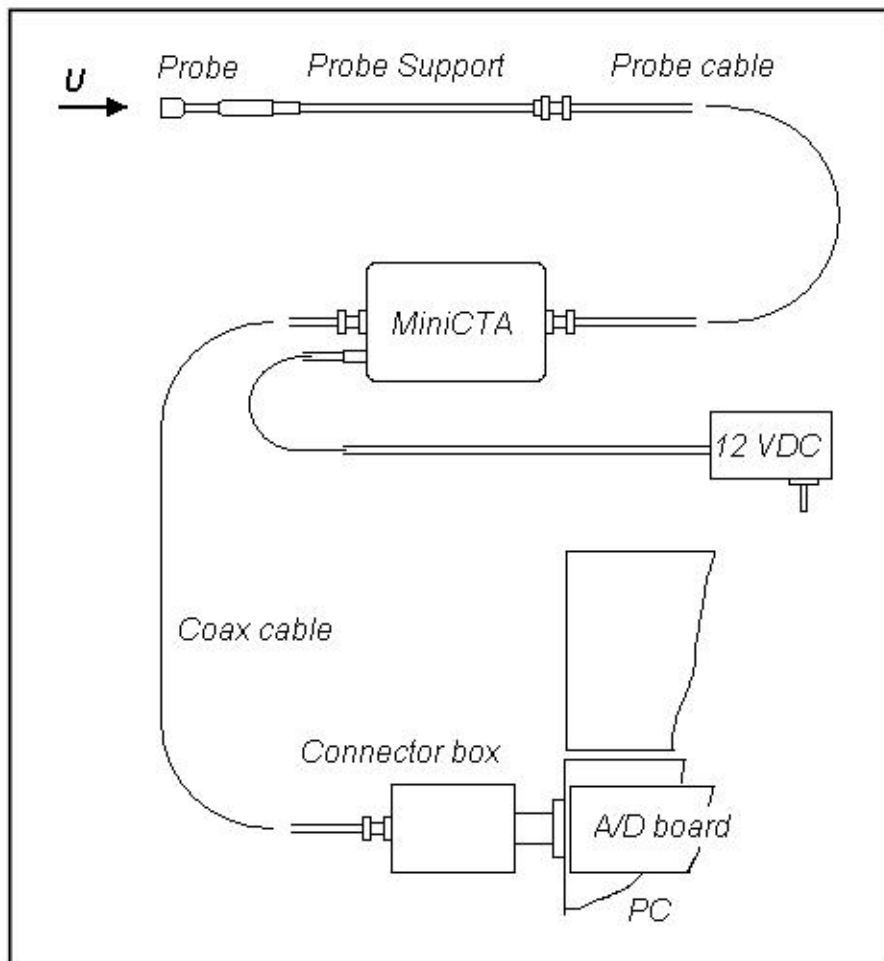


8. att. Konstantas temperatūras anemometru tipi un zondes koordinātu sistēma. (eksperimentā izmantotais attēlots augšējā stūrī).

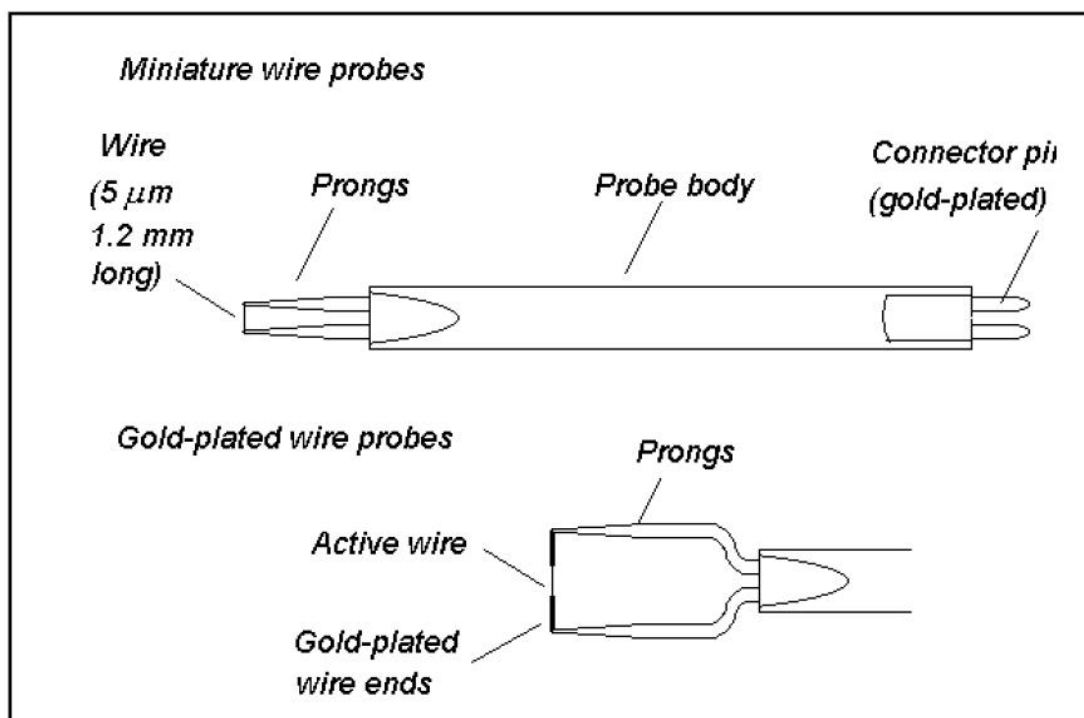


9.att. Konstantas temperatūras anemometra eksperimentālās mērsistēmas

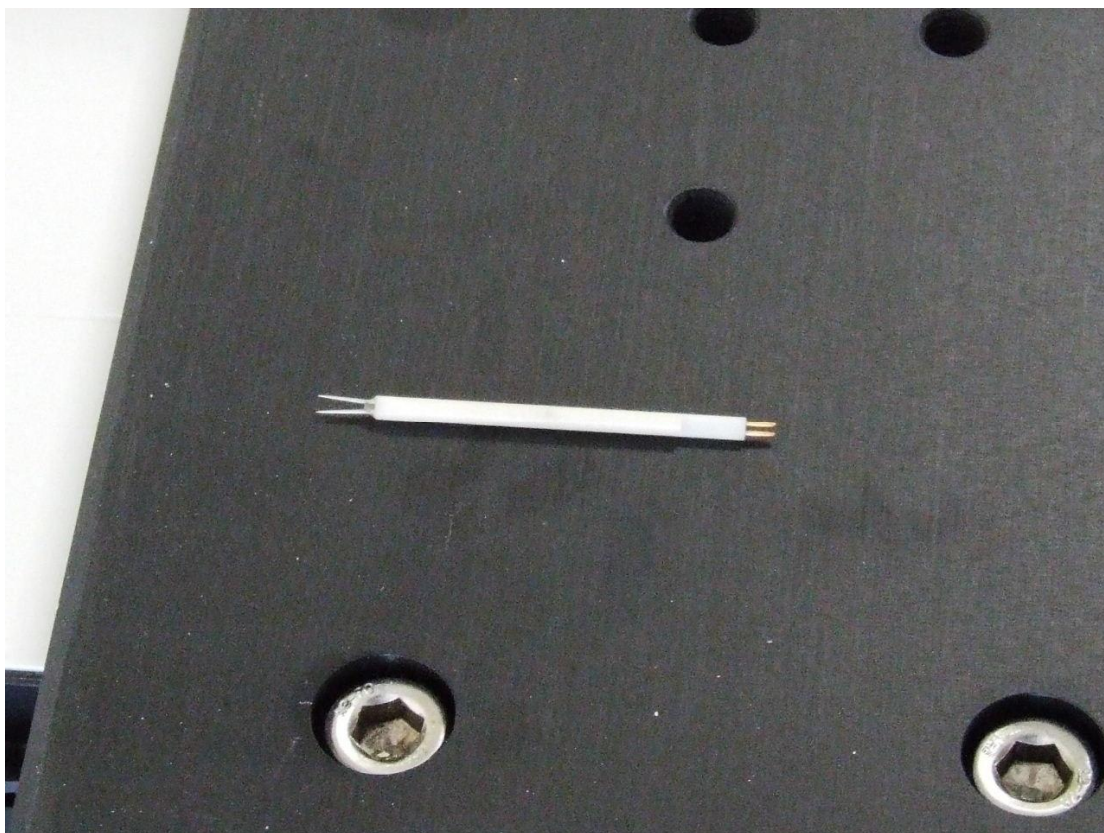
konfigurācija.



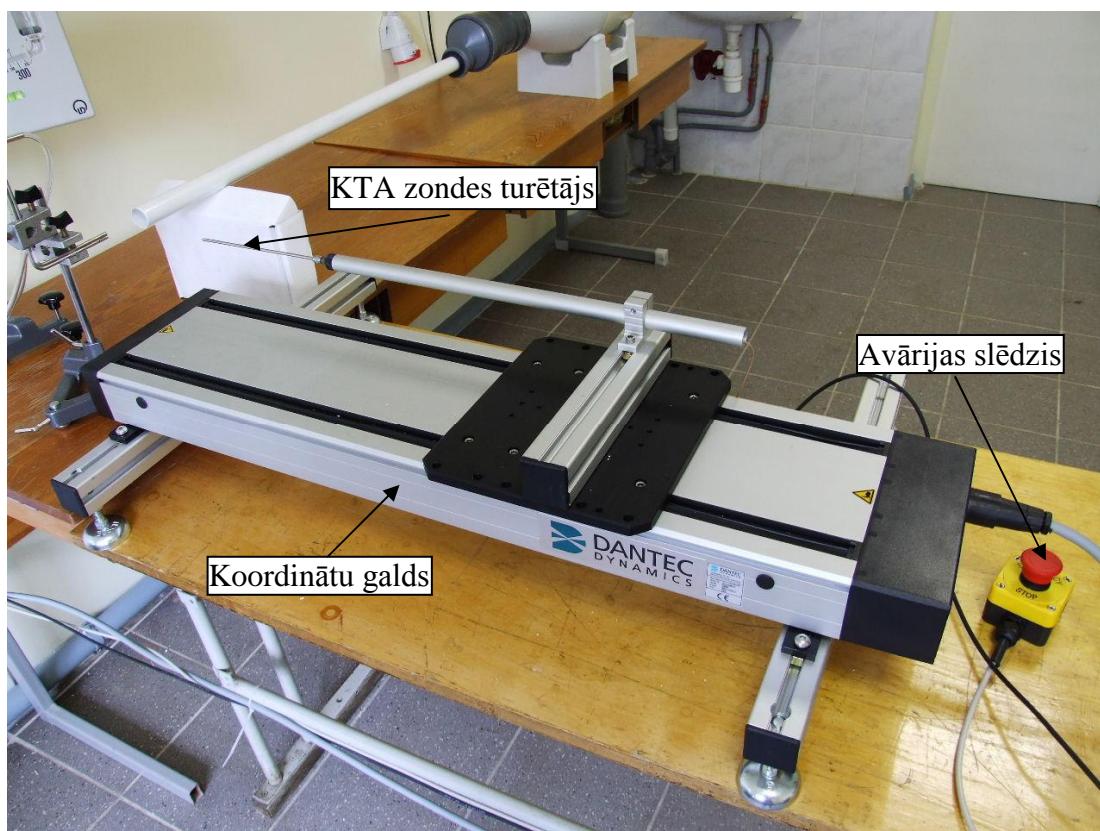
10.att. KTA slēguma shematisks attēlojums.



11.att. Konstantas temperatūras zonde 55P11.

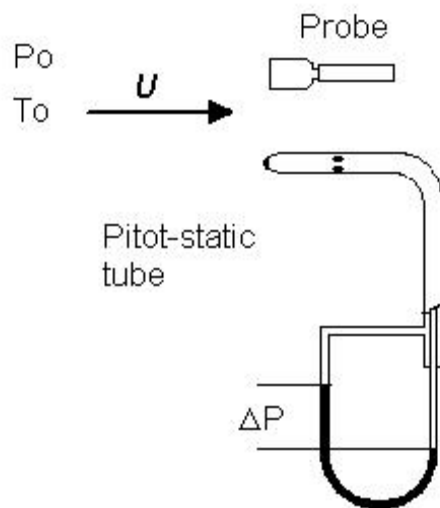


12.att. Konstantas temperatūras zonde 55P11.



13.att. Koordinātu galds ar KTA zondes turētāju un zondi.

2.4. Gaisa plūsmas mērīšana ar Pito cauruli.



14.att. Pito caurules darbības princips.

Lai veiktu zonde kalibrāciju jāizmanto gaisa plūsma ar zināmu ātrumu. Gaisa plūsma darba ietvaros tiek radīta ar ventilatora palīdzību, tās ātrums tiek noteikts ar Pito caurules palīdzību. Pito caurules darbības princips attēlots 14.att. Diferenciālais manometrs rāda spiediena starpību starp nobremzētu un kustīgu plūsmu, t.i. izmantojot Bernulli likumu:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho U^2,$$

kur

Δp - diferenciālā manometra izmērītā spiediena starpība,

ρ - gaisa blīvums,

U – plūsmas ātrums,

no kurienes var noteikt plūsmas ātrumu

$$U = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}.$$

Darbā izmantotā Pito caurule attēlota 15.att. Kā redzams apakšējā caurulē tiek mērīts kustīgās vides, augšējā – nekustīgās vides spiediens.



15.att. Eksperimentā izmantotās Pito caurules uzbūve.

Spiedienu starpība tiek mērīta ar diferenciālā manometra palīdzību (15.att.), kuram ir 2 skalas – spiediena starpībai (apakšējā, Pa) un plūsmas ātrumam gaisā (augšējā m/s).



16.att. Eksperimentā izmantotā diferenciālā manometra uzbūve.

***Piezīme.** Pievērst uzmanību tam, lai mērījumu laikā diferenciālā manometrs būtu horizontālā stāvoklī, ko kontrolē ar līmeņrāža palīdzību (dzeltenī-zaļā krāsā 15.att.).*

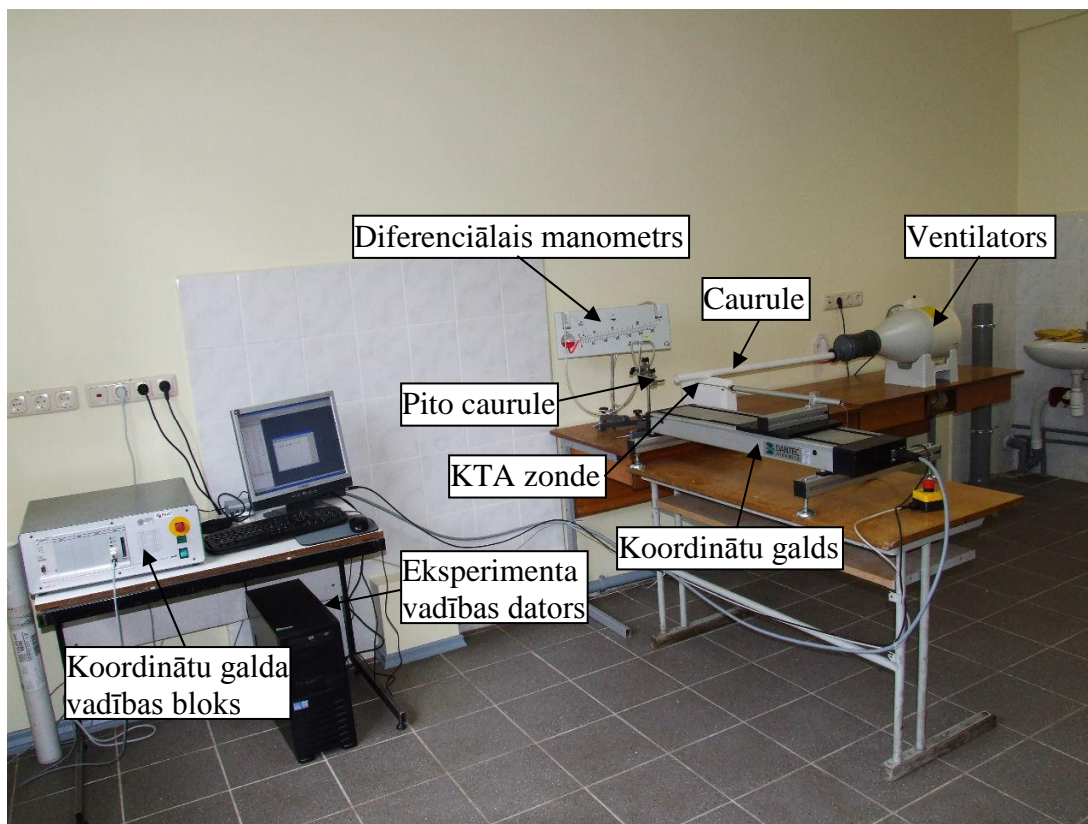
3. Darba uzdevumi

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

4. Darba veikšanas apraksts

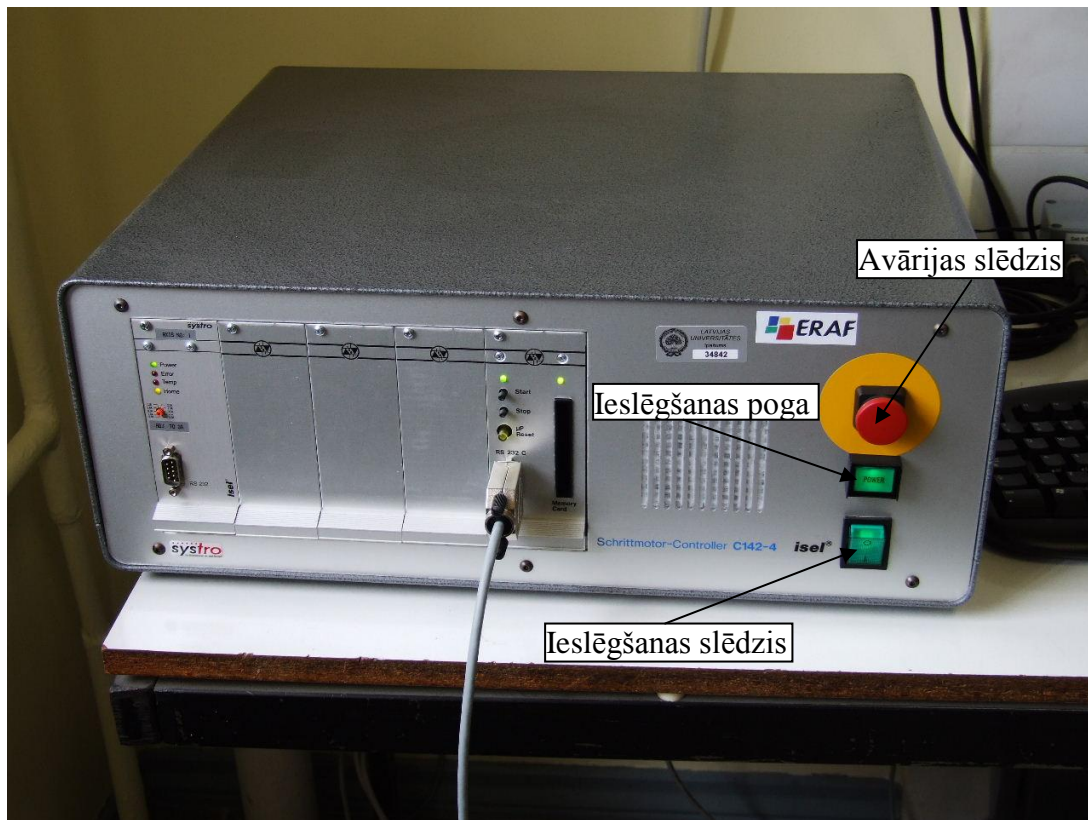
4.1. Kalibrēt KTA zondi.

Termoaņemometra kalibrēšanas mērķis ir noteikt funkcionālo sakarību starp spriegumu un plūsmas ātrumu (sk.7.att.). Izmantotās eksperimentālās iekārtas kopskats attēlots 17.att.

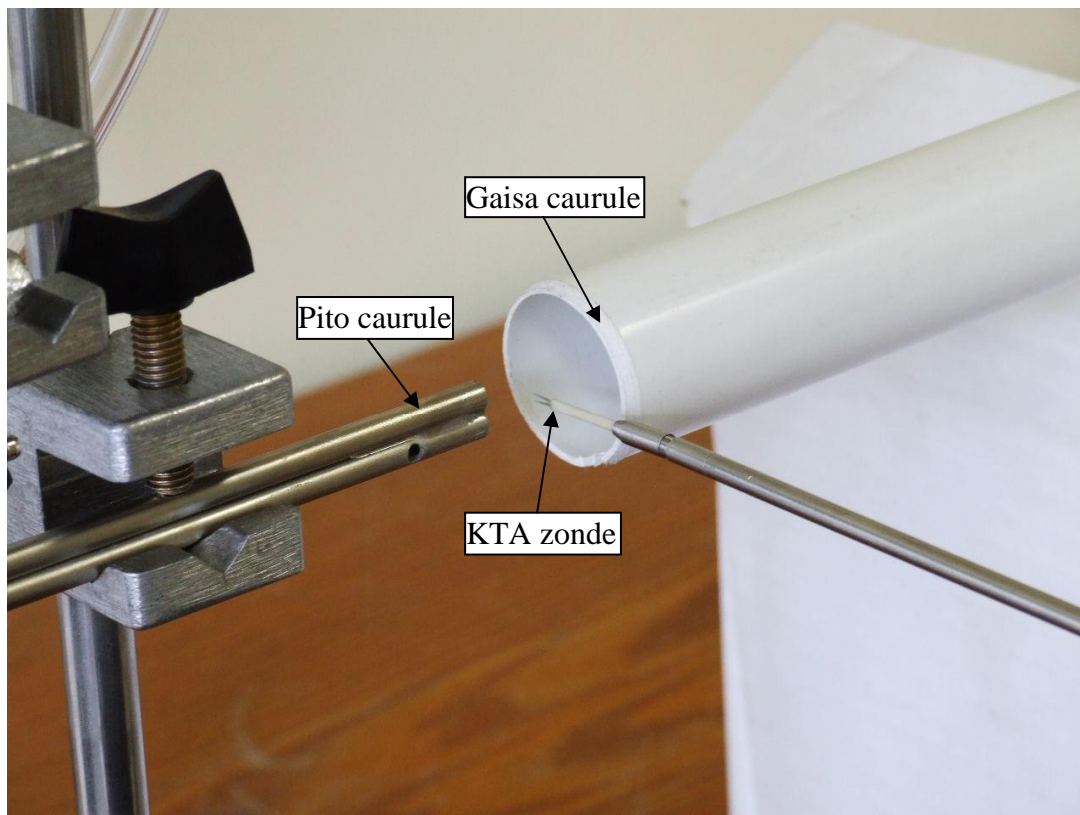


17.att. Eksperimentālās iekārtas kopskats.

Koordinātu galda vadības bloku ieslēdz ar slēdzi un pēc tam ar pogu (18.att.).



18.att. Koordinātu galdiņa vadības bloks



19.att. Pito caurules un KTA zondes novietojums kalibrēšanas gaitā.

Zondei jābūt pozicionētai attiecībā pret gaisa cauruli un Pito cauruli kā parādīts 19.att., lai zondes sensors atrastos uz gaisa caurules garenass.

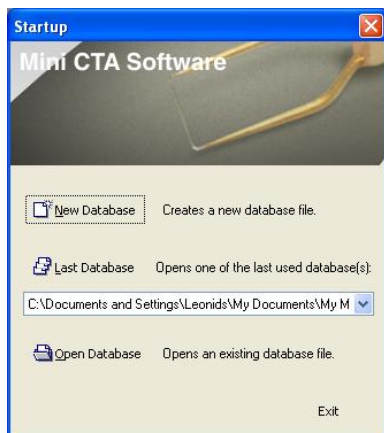
Piezīme. Atšķirīgas zondes stāvokļa gadījumā lūgt laboranta palīdzību.

Startē programmu **MiniCTA** no Desktop:



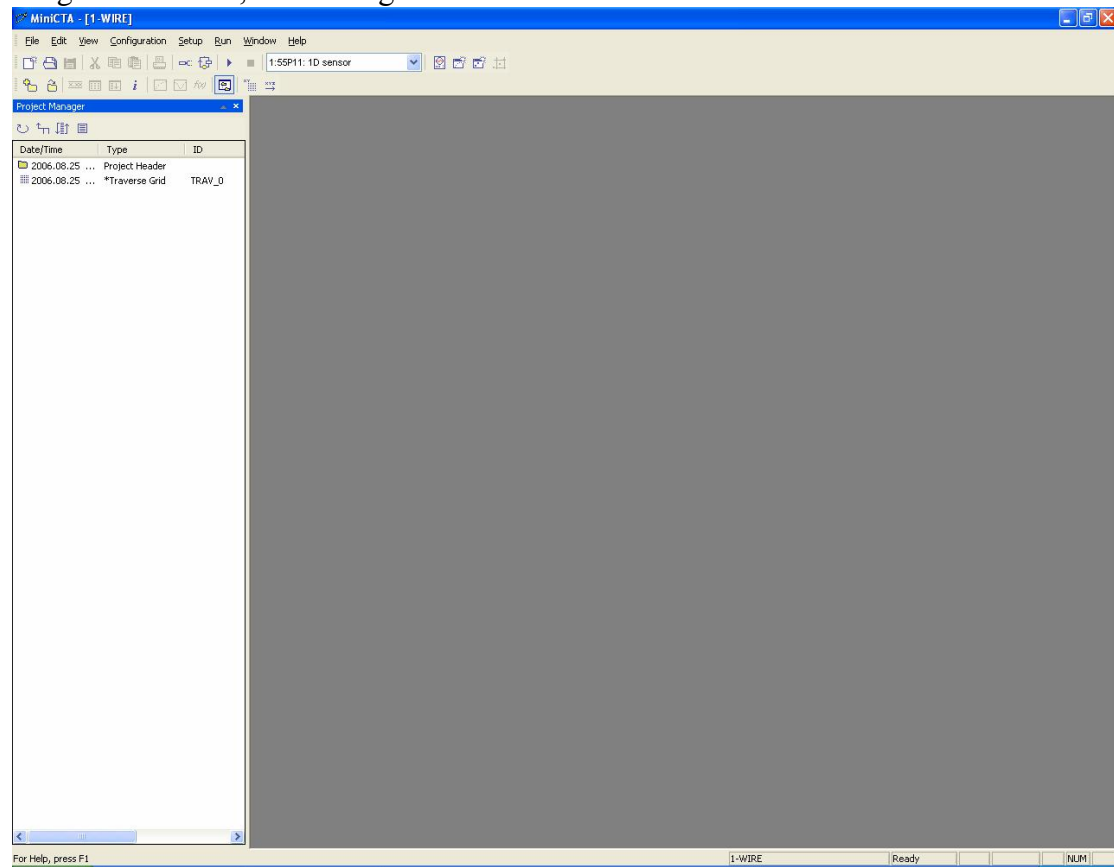
20.att. Ekrāna kopija

Izvēlas **Last Database:**



21.att. Ekrāna kopija

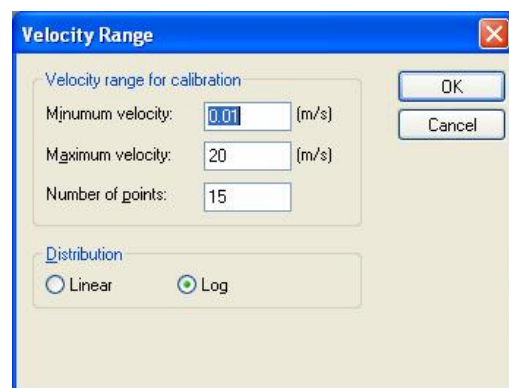
Programma startē, atveras logs:



22.att. Ekrāna kopija

Veic KTA zondes kalibrēšanu:

Setup-Velocity calibration



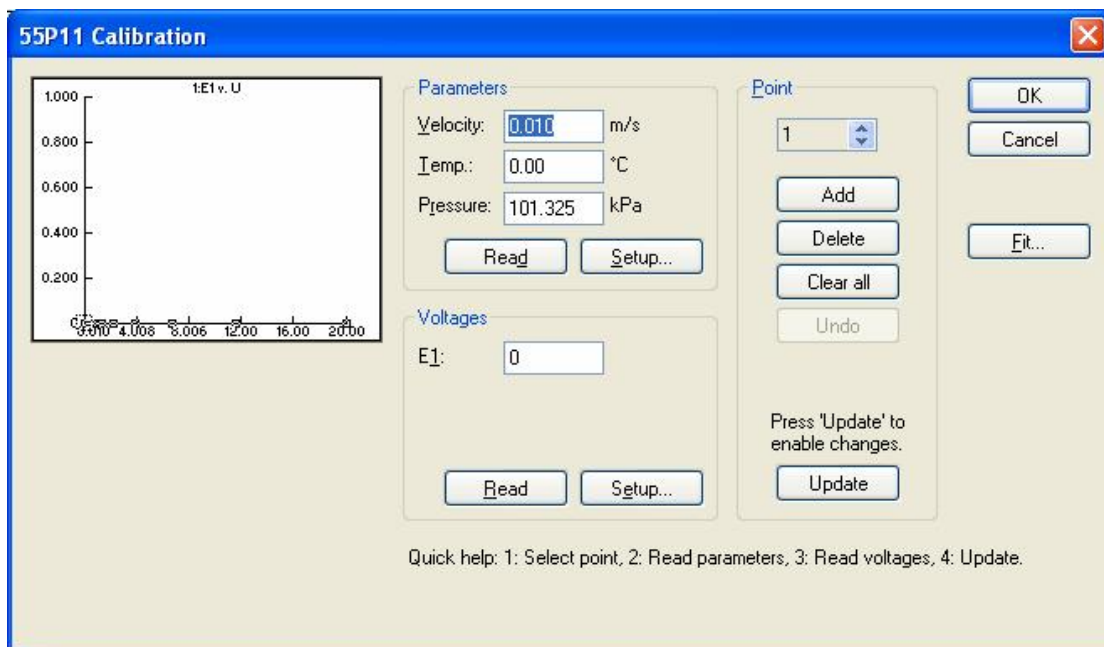
23.att. Ekrāna kopija

OK

Ieslēdz ventilatoru (24. att.) un ar potenciometru ieregulē nepieciešamo gaisa plūsmas ātrumu.



24.att. Ventilatora ieslēgšanas slēdzis un gaisa plūsmas regulēšanas potenciometrs.



25.att. Ekrāna kopija

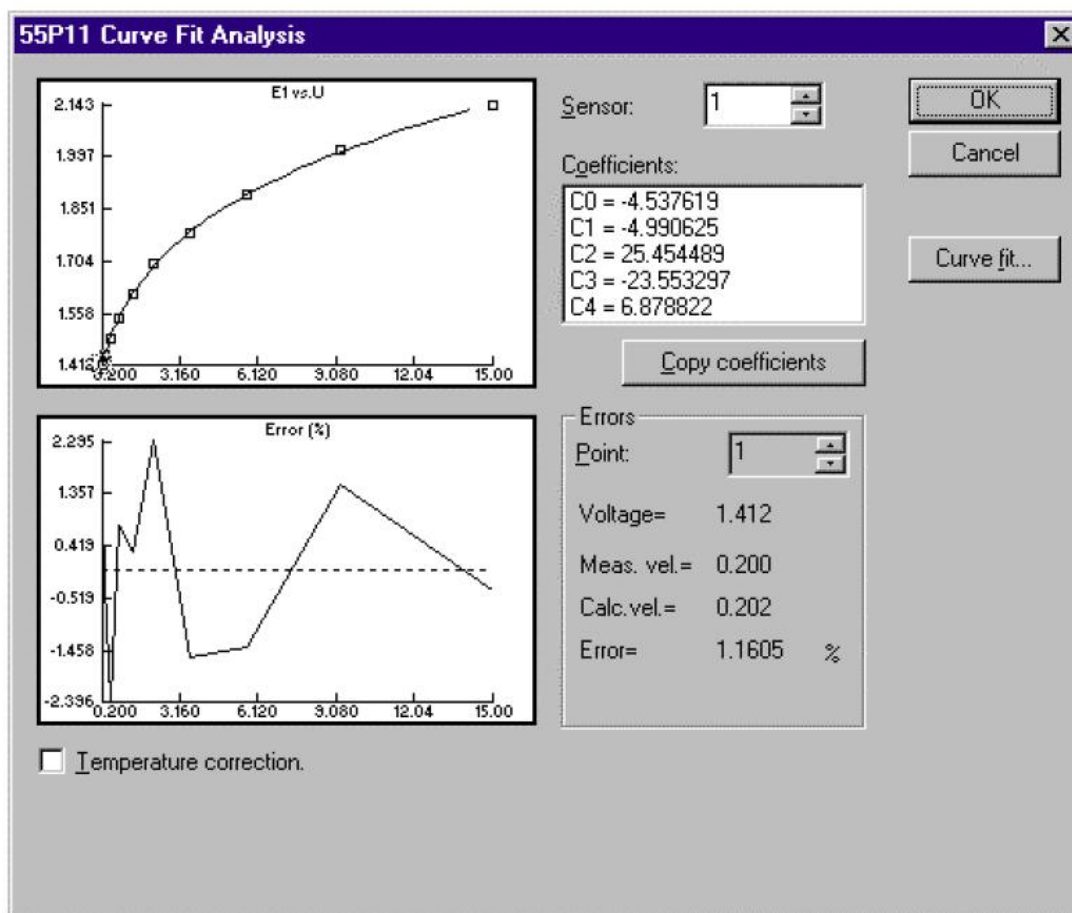
Katram kalibrācijas punktam veic sekojošas darbības:

1. Izvēlas punktu (no 1 līdz maksimālajam uzdotajam kalibrācijas punkta numuram).
2. Ar ventilatora palīdzību iestāda nepieciešamo ātruma vērtību, kuru nolasa no

diferenciālā manometra ātruma skalas. Ieraksta šo vērtību **Parameters Velocity**: logā.

Piezīme. Izmainot griešanās ātrumu ventilatoram nepieciešamas apmēram 30 sekundes, līdz tas sasniedz izmainīto ātruma vērtību.

3. Ievada temperatūras vērtību **Parameters Temp.**: logā.
4. Nospiež **Parameters Read** taustiņu ar kursora un peles kreisā taustiņa palīdzību.
5. Nospiež **Voltages Read** taustiņu. KTA zondes spriegums tiek nolasīts ar A/C kartes palīdzību.
6. Nospiež **Update** taustiņu. Ātruma, temperatūras un zondes sprieguma vērtības tiek noglabātas kalibrācijas tabulā.
7. Izvēlas nākamo punktu un turpina no 1. līdz visiem punktiem ir veikti attiecīgie mērījumi.
8. Nospiež **Fit ...**. Tiek atvērts **Curve Fit Analysis** logs. **Temperature correction** opciju neizmanto. Apskata kalibrācijas līknes aproksimāciju un kļūdas katrā punktā.



26.att. Ekrāna kopija

Piezīme. Pievērst uzmanību mazo ātrumu diapazonam, īpaši, lai kalibrācijas funkcija nodrošinātu viennozīmīgu atbilstību starp zondes spriegumu un plūsmas ātrumu. Neapmierinošas aproksimācijas gadījumā veikt atkārtotus mērījumus punktos, kuros ir vislielākā aproksimācijas kļūda.

9. Ja kalibrācijas aproksimācija ir apmierinoša, nospiež **OK** taustiņu.
Kalibrācijas dati tiek ierakstīti tabulā.

Kalibrācijas rezultātā funkcionālā sakarība $U(E)$ tiek aproksimēta ar funkcijas $U = C_0 + C_1 E + C_2 E^2 + C_3 E^3 + C_4 E^4$ palīdzību.

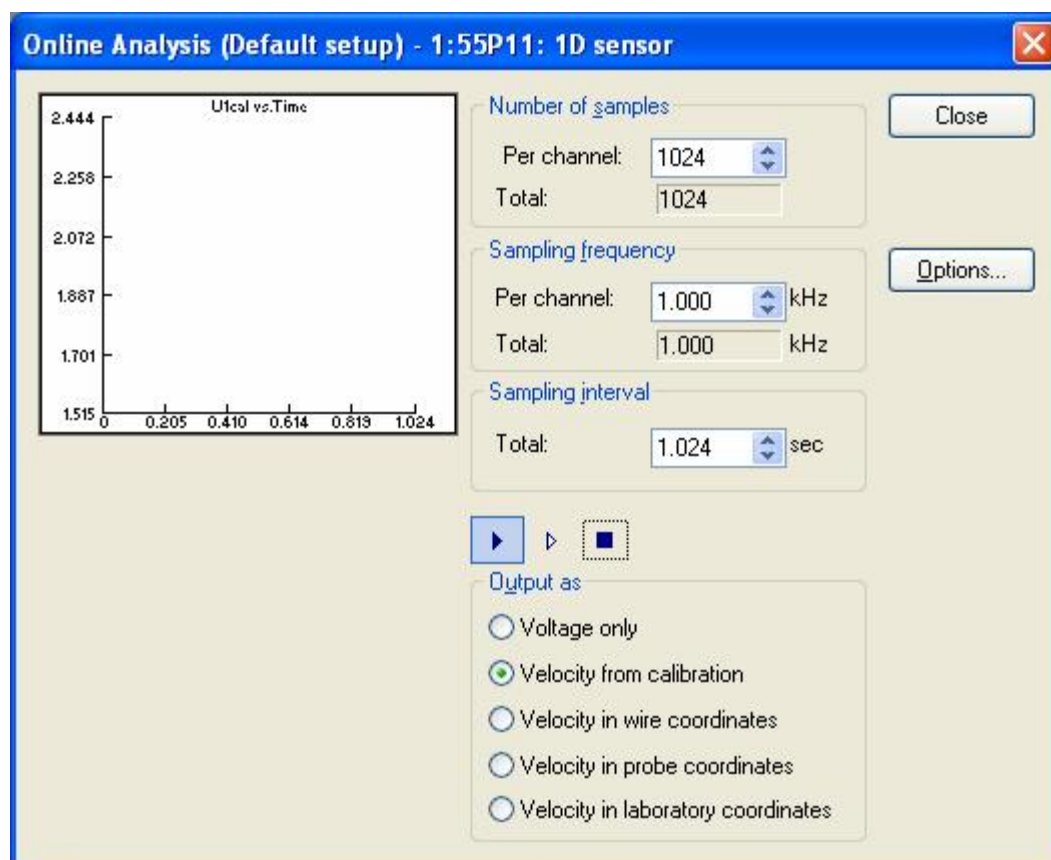
Aizvērt un saglabāt kalibrācijas notikumu.

1. 2x noklikšķināt uz **Menu Control box** datu tabulas kreisajā augšējā stūrī.
Atveras **Save event** dialoga logs.
2. Uzdot nosaukumu (piemēram v_0.01_20) un nospiež **OK**. Dialoga logs tiek aizvērts un tiek piedāvāts izveidot pārveidošanas notikumu, kas balstās uz izveidoto zondes kalibrāciju.
3. Atbildēt **Yes**. Tiek atvērts **Save event** dialoga logs.
4. Uzdot nosaukumu un apstiprināt ar **OK**. Tiek piedāvāts izmantot nedefinēto pārveidojumu par izmatoto pēc noklusēšanas. Atbildēt **Yes**.

Veikto darbību rezultātā projekta menedžerī tiek pievienoti 2 notikumi – kalibrācijas un pārveidošanas notikumi. Abiem tiek piekārtotas zvaigznītes, kas norāda, ka šie notikumi tiks izmantoti pēc noklusēšanas.

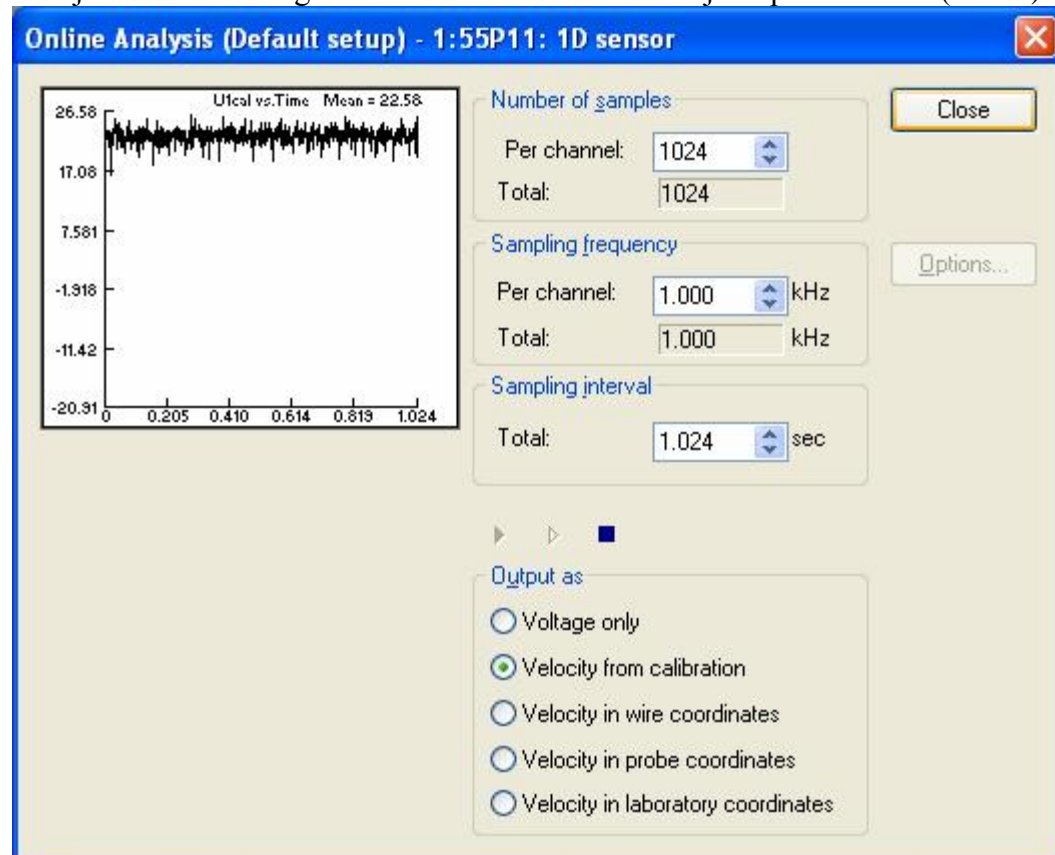
Mērījumu veikšana bez rezultātu saglabāšanas (Run Online).

1. Izvēlas **Run – Online analysis**. Nospiež start taustiņu (iezīmēts gaiši zils 27.att.).



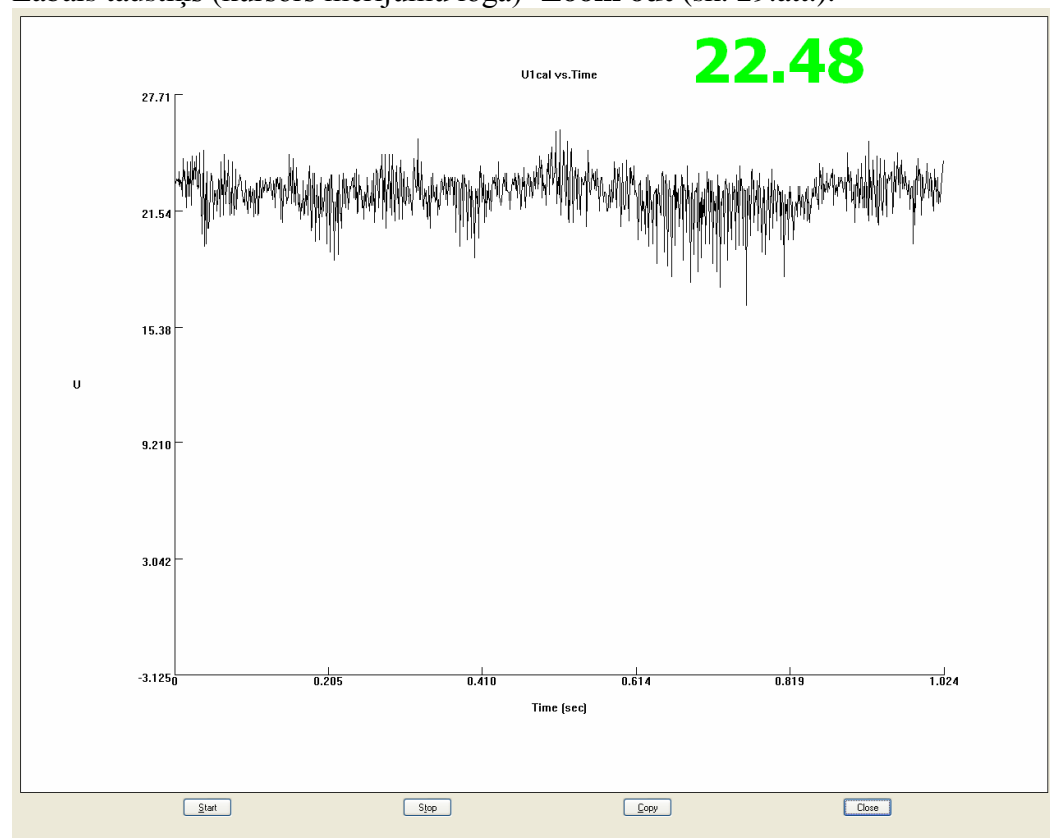
27.att. Ekrāna kopija

Mērījumi tiek attēloti grafiskā veidā atbilstoši izvēlētajiem parametriem (28.att.).



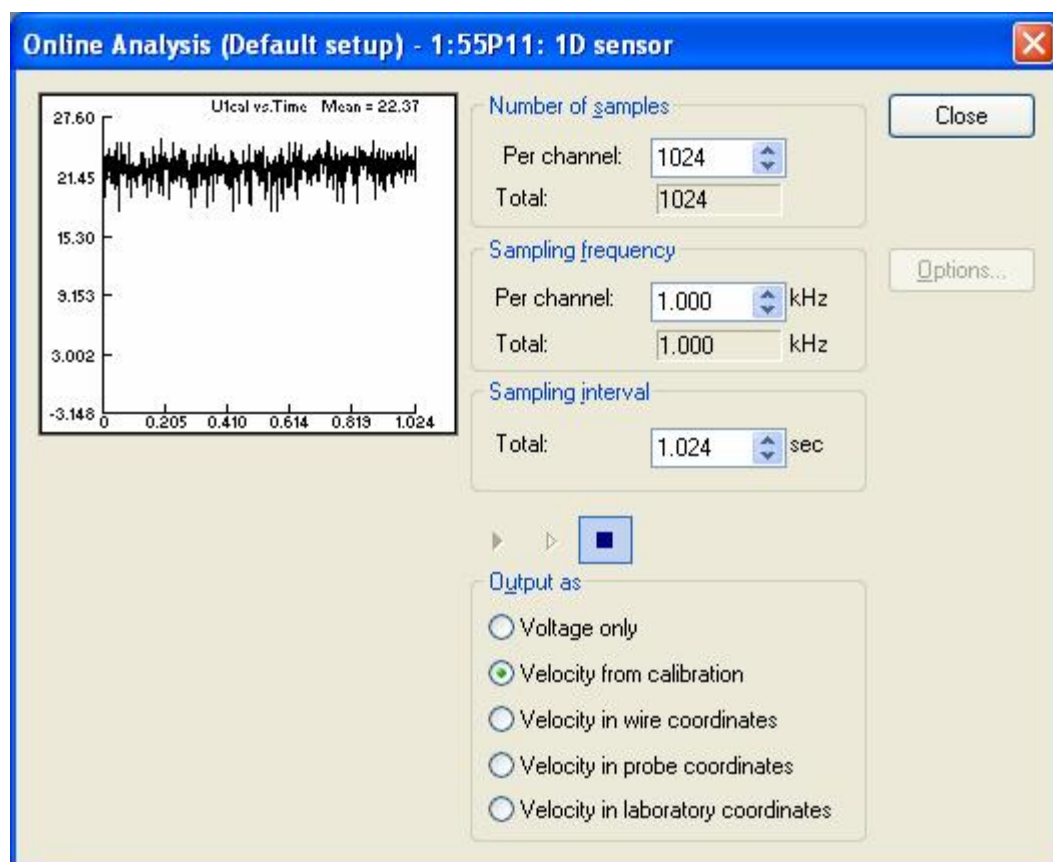
28.att. Ekrāna kopija

Labais taustiņš (kursors mērījumu logā)- **Zoom out** (sk. 29.att.).



29.att. Ekrāna kopija

Šo režīmu ērti izvēlēties, lai neregulētu noteiktu plūsmas ātrumu. Pāriet atpakaļ ar taustiņa **Esc** palīdzību, mērījumus aptur ar stop taustiņu (iekrāsots gaiši zilā krāsā 29.att.).



30.att. Ekrāna kopija
Close

4.2. Izmērīt plūsmas ātrumu ar termoanemometru.

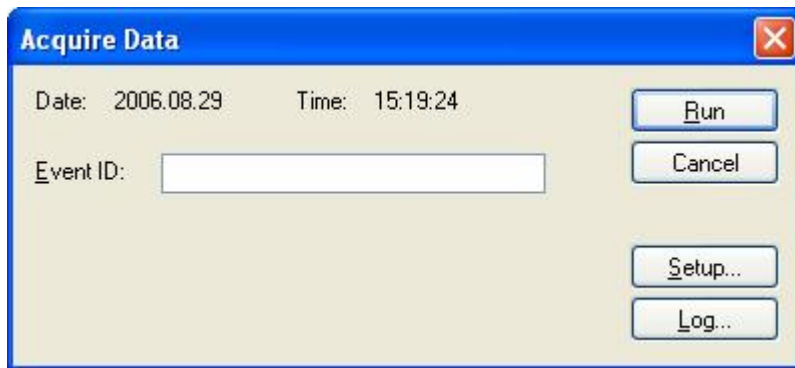
Mērījumu veikšana ar rezultātu saglabāšanu (Run Default).

Mērījumus veic sekojošā veidā:

1. Iestāda nepieciešamo ātruma (Reinoldsa skaitļa) vērtību ar ventilatora potenciometra palīdzību.

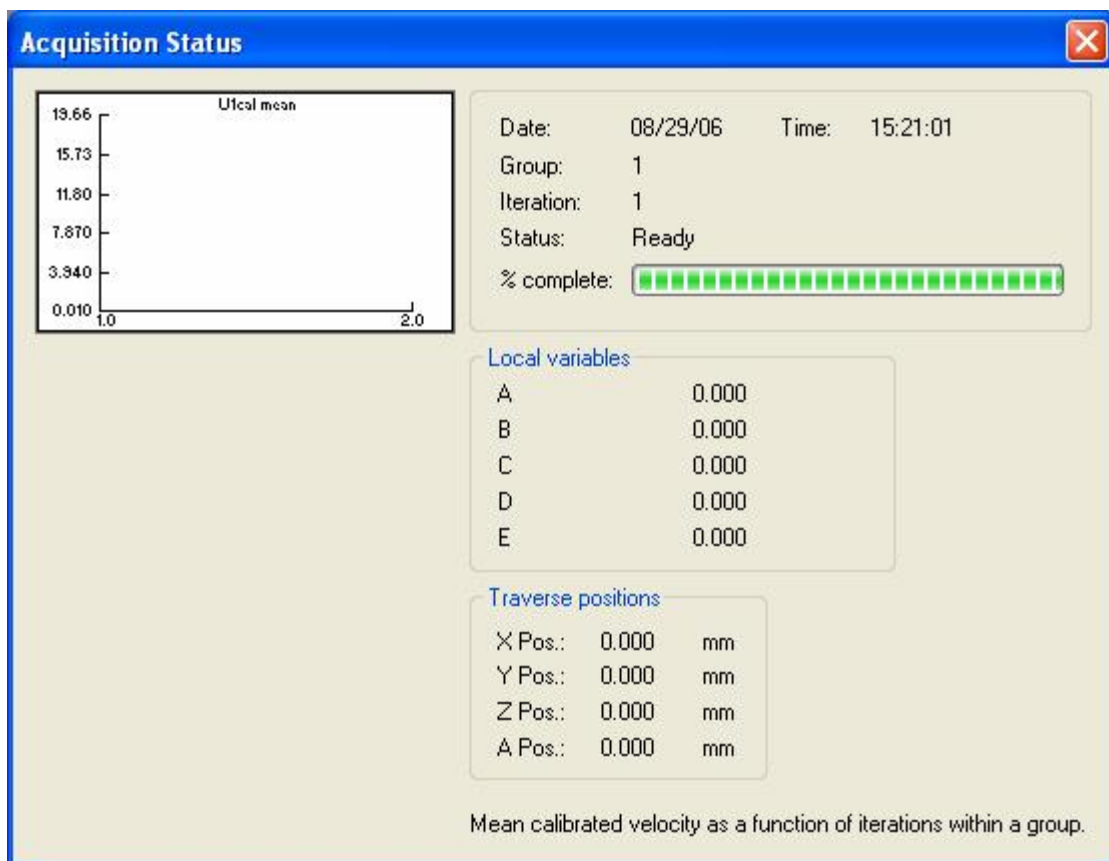
Piezīme. Izmainot griešanās ātrumu ventilatoram nepieciešamas apmēram 30 sekundes, līdz tas sasniedz izmainīto ātruma vērtību.

2. Izvēlas **Run – Run Default Setup**



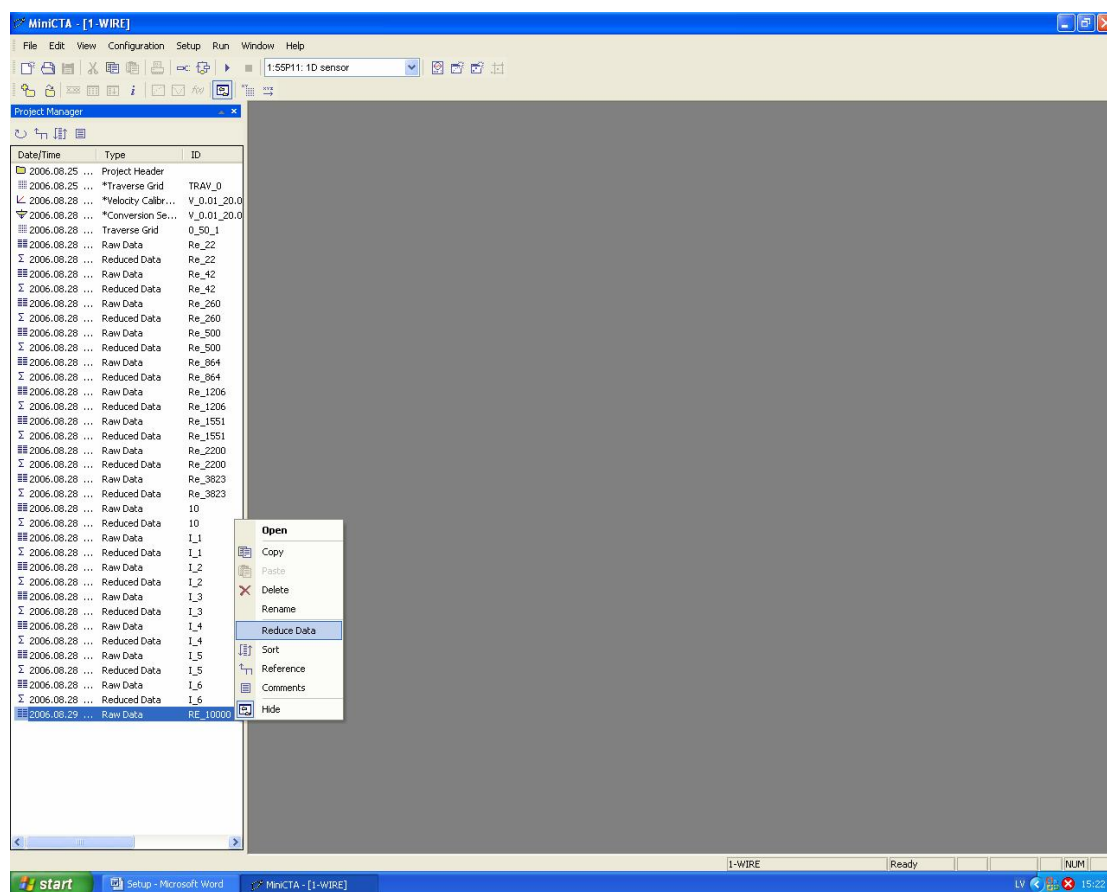
31.att. Ekrāna kopija

3. Uzdod mērīšanas notikuma nosaukumu, piem. Re_10000. Nospiež **Run**.

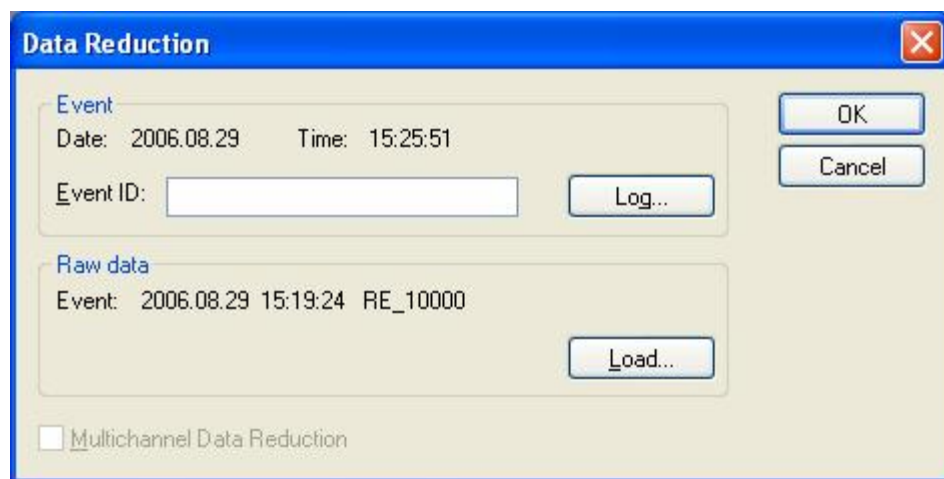


32.att. Ekrāna kopija

4. Kad mērījums ir veikts (32.att.), projekta menedžerī parādās mērīšanas notikums ar attiecīgo nosaukumu. Aizver logu ar **X**
5. Nospiež labo taustiņu laukā ... **Raw Data** un izvēlas **Reduce Data**

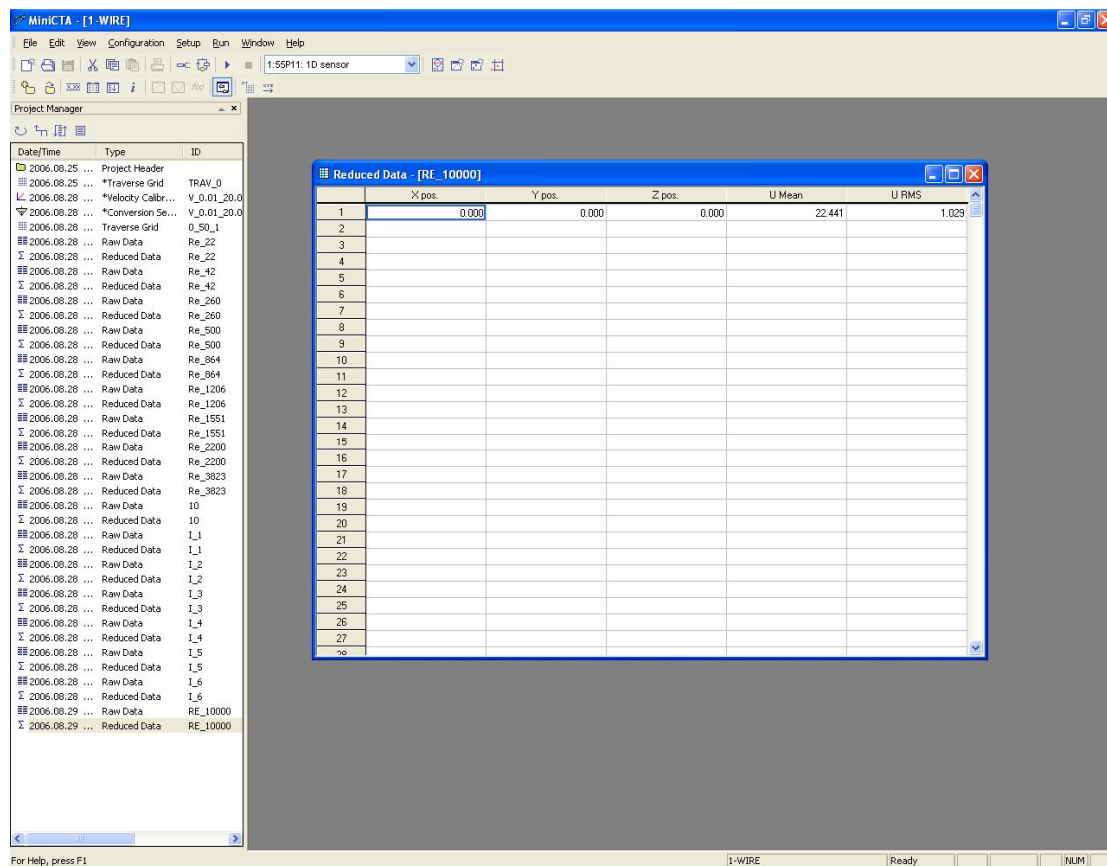


33.att. Ekrāna kopija



34.att. Ekrāna kopija

6. Uz dod RE_10000 **OK**. Projekta notikumu sarakstā parādās ... Reduced Data RE_10000
7. 2x noklikšķina uz tā kreiso taustiņu, atveras tabula:



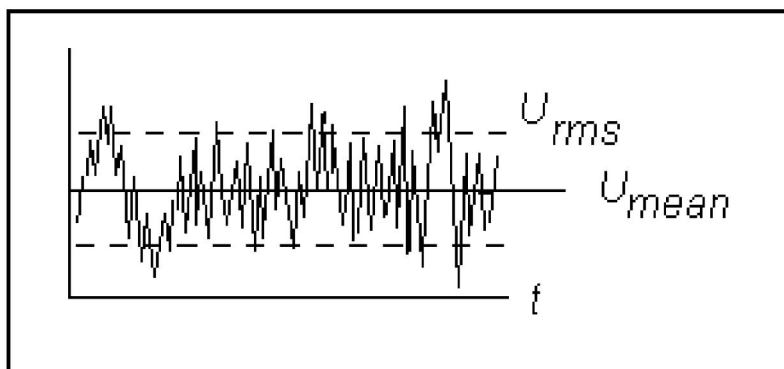
35.att. Ekrāna kopija

Vidējais ātrums U_{mean} un ātruma vidējā kvadrātiskā novirze U_{rms} un turbulences intensitāte Tu tiek aprēķināti aprēķināti pēc formulām:

$$U_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i$$

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - U_{mean})^2}$$

$$Tu = \frac{U_{rms}}{U_{mean}}$$



36.att. Vidējais ātrums U_{mean} un ātruma vidējā kvadrātiskā novirze U_{rms}

8. 2x noklikšķina uz ...Raw Data Re_10000 kreiso taustiņu:

Raw Data Selection

Probe
 Select: 1:55P11: 1D sensor

Data
 Pos: 1 Range: {1-1}

Corresponding traverse position:
 (0.00, 0.00, 0.00) (0.00)

Load
 Close
 Options...

37.att. Ekrāna kopija

9. Load

atveras tabula:

MiniCTA - [1-WIRE]

File Edit View Configuration Setup Run Window Help

1:55P11: 1D sensor

Project Manager

Date/Time	Type	ID
2006.08.25 ...	Project Header	
2006.08.25 ...	*Traverse Grid	TRAV_0
2006.08.28 ...	*Velocity Calbr...	V_0.01_20.0
2006.08.28 ...	*Conversion Se...	V_0.01_20.0
2006.08.28 ...	Traverse Grid	0_50_1
2006.08.28 ...	Raw Data	Re_22
2006.08.28 ...	Reduced Data	Re_22
2006.08.28 ...	Raw Data	Re_42
2006.08.28 ...	Reduced Data	Re_42
2006.08.28 ...	Raw Data	Re_260
2006.08.28 ...	Reduced Data	Re_260
2006.08.28 ...	Raw Data	Re_500
2006.08.28 ...	Reduced Data	Re_500
2006.08.28 ...	Raw Data	Re_864
2006.08.28 ...	Reduced Data	Re_864
2006.08.28 ...	Raw Data	Re_1206
2006.08.28 ...	Reduced Data	Re_1206
2006.08.28 ...	Raw Data	Re_1551
2006.08.28 ...	Reduced Data	Re_1551
2006.08.28 ...	Raw Data	Re_2200
2006.08.28 ...	Reduced Data	Re_2200
2006.08.28 ...	Raw Data	Re_3823
2006.08.28 ...	Reduced Data	Re_3823
2006.08.28 ...	Raw Data	10
2006.08.28 ...	Reduced Data	10
2006.08.28 ...	Raw Data	I_1
2006.08.28 ...	Reduced Data	I_1
2006.08.28 ...	Raw Data	I_2
2006.08.28 ...	Reduced Data	I_2
2006.08.28 ...	Raw Data	I_3
2006.08.28 ...	Reduced Data	I_3
2006.08.28 ...	Raw Data	I_4
2006.08.28 ...	Reduced Data	I_4
2006.08.28 ...	Raw Data	I_5
2006.08.28 ...	Reduced Data	I_5
2006.08.28 ...	Raw Data	I_6
2006.08.28 ...	Reduced Data	I_6
2006.08.29 ...	Raw Data	RE_10000
2006.08.29 ...	Reduced Data	RE_10000

Calib. velocity [RE_10000]

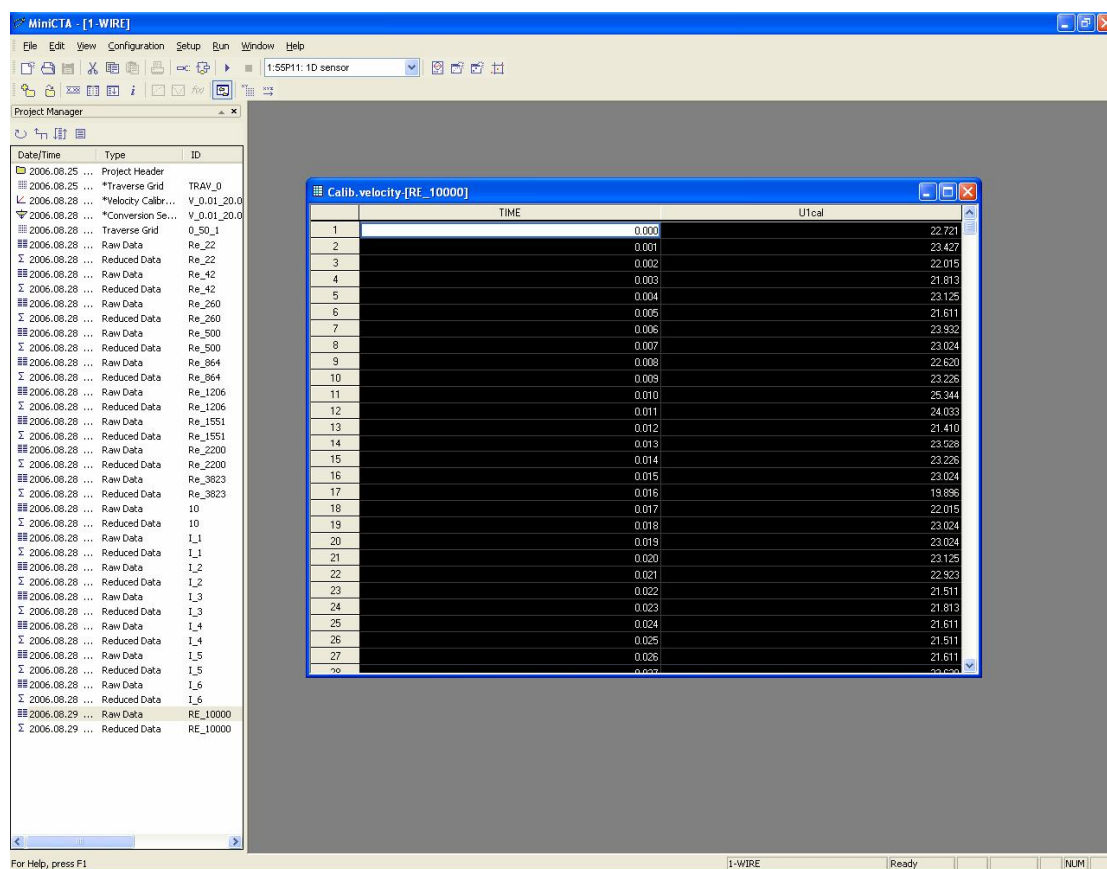
	TIME	U1cal
1	0.000	22.721
2	0.001	23.427
3	0.002	22.015
4	0.003	21.813
5	0.004	23.125
6	0.005	21.611
7	0.006	23.932
8	0.007	23.024
9	0.008	22.620
10	0.009	23.226
11	0.010	25.344
12	0.011	24.033
13	0.012	21.410
14	0.013	23.528
15	0.014	23.226
16	0.015	23.024
17	0.016	19.896
18	0.017	22.015
19	0.018	23.024
20	0.019	23.024
21	0.020	23.125
22	0.021	22.923
23	0.022	21.511
24	0.023	21.813
25	0.024	21.611
26	0.025	21.511
27	0.026	21.611
28	0.027	

For Help, press F1

1-WIRE Ready NUM

38.att. Ekrāna kopija

10. Iezīmē visus mērījumu rezultātus (nospiež kreiso augšējo tabulas šūnu):

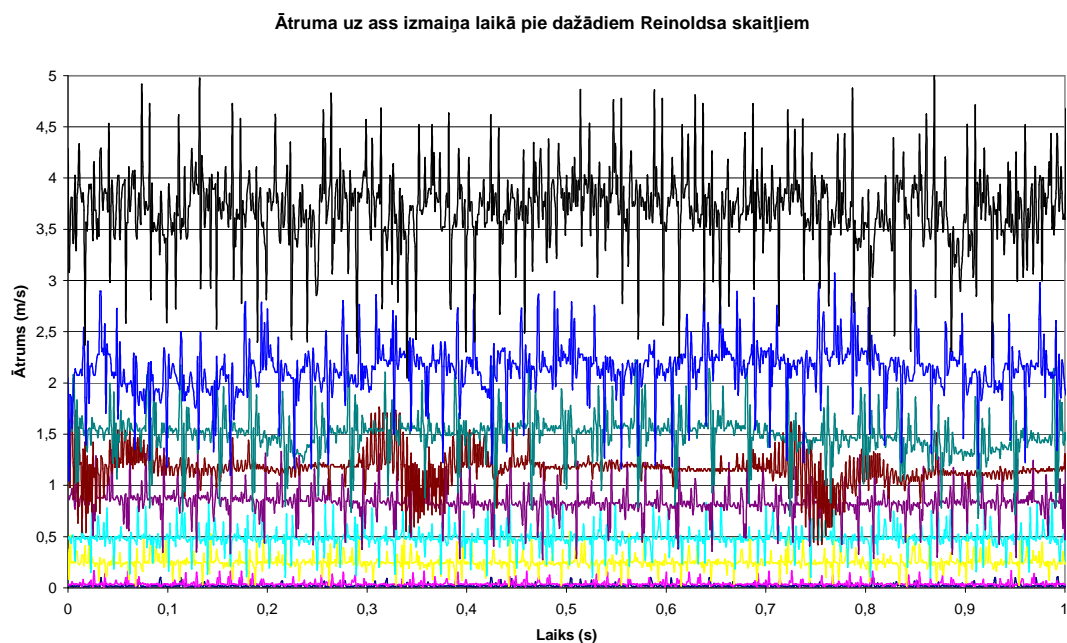


39.att. Ekrāna kopija

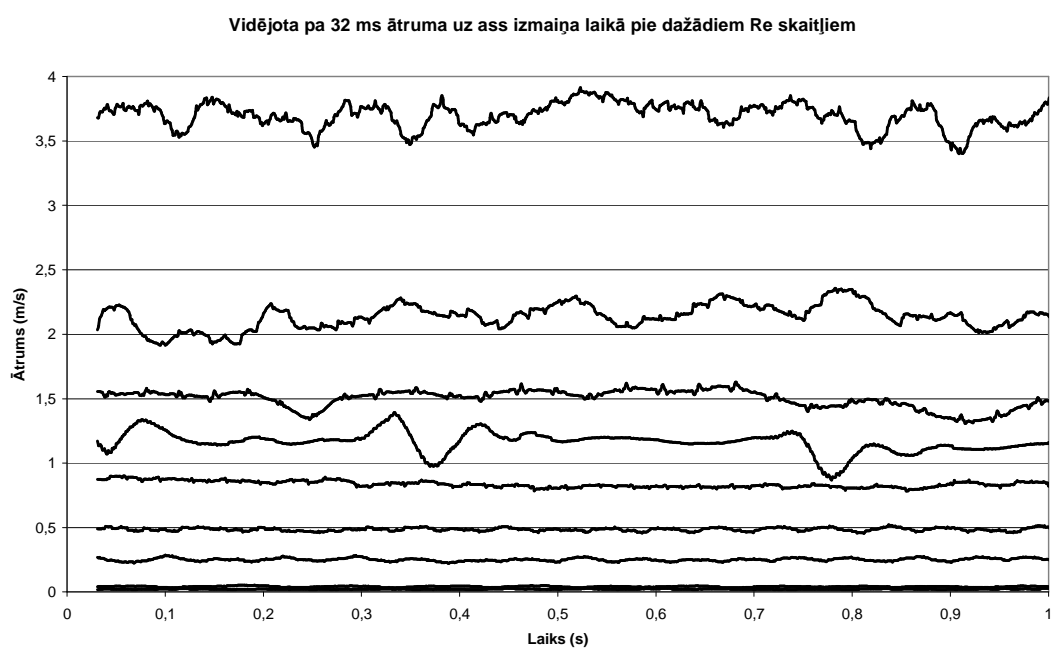
11. Nospiež labo taustiņu melni iekrāsotajā laukā – **Copy**
12. Pārkopē mērījumus Excel tabulā – **Paste**.
13. Uzzīmē $U(t)$.

4.3. Mainot plūsmas ātrumu novērot plūsmas pāreju no lamināras uz turbulentu.

1. Veic mērījumus pie 7-10 Reinoldsa skaitļiem diapazonā 100-4000. Mērījumus veic pie parametriem, kas attēloti 30.att.
2. Rezultātus no MiniCTA programma iekopē Excel tabulā.
3. Uzzīmē vienās asīs $U(t)$ pie dažādiem Reinoldsa skaitļiem (sk. 40.att.). Kā redzams no rezultātiem, pie visiem Reinoldsa skaitļiem vērojamas ātruma fluktuācijas, kas apgrūtina plūsmas režīma novērtēšanu (lamināra vai turbulenta).
4. Aprēķina katram $U(t)$ vidējo pa 32 mērījumiem (32 ms) un uzzīmē grafiku (41.att.). Kā redzams šāda ātruma vidējošana ļauj kvalitatīvi novērtēt plūsmas raksturu. No 9 mērījumiem 5, kas atbilst mazākiem Reinoldsa skaitļiem kvalificējami kā lamināra plūsma, 2 – kā pārejas, un 2 ar lielākajiem Reinoldsa skaitļiem – kā turbulenta plūsma.
5. Atbilstoši mērījumu rezultātiem izdara secinājumus par Re skaitļa vērtībām, pie kurām plūsma no lamināras pāriet turbulentā.



40.att. Ātrums uz caurules ass pie dažādām Reinaldsa skaitļa vērtībām.



41.att. Vidējotais ātrums uz caurules ass pie dažādām Reinaldsa skaitļa vērtībām.

6. Kontroljautājumi

1. Ideāla šķidruma plūsmas ātrums horizontālā caurulē ir 12 m/s. Caurules rādiuss samazinās 2 reizes. Kāds ir plūsmas ātrums šaurākajā caurule daļā?
 - a) 12 m/s
 - b) 24 m/s
 - c) 36 m/s
 - d) 48 m/s
 - e) 60 m/s
2. Ar enerģijas saglabāšanā likumu šķidrumos ir saistīts:
 - a) Arhimēda likumu
 - b) Bernulli likumu
 - c) Paskāla likumu
 - d) Nepārtrauktības vienādojumu
 - e) Nevienu no minētajiem
3. Ūdens plūsmā horizontālā caurulē ar ātrumu 12 m/s spiediens ir $3.0 \times 10^4 \text{ N/m}^2$. Kāds ir spiediens platākajā caurules daļā, ja tās rādiuss palielinās 2 reizes?
 - a) $3.0 \times 10^4 \text{ N/m}^2$
 - b) $4.9 \times 10^4 \text{ N/m}^2$
 - c) $7.4 \times 10^4 \text{ N/m}^2$
 - d) $9.8 \times 10^4 \text{ N/m}^2$
 - e) $11.2 \times 10^4 \text{ N/m}^2$
4. Divas putuplasta bumbiņas ar rādiusiem R un 2 R vienlaicīgi bez sākuma ātruma tiek sviestas zemē no augsta torņa. Kura sasniegs zemi pirmā?
 - a) abas sasniegs vienlaicīgi
 - b) lielākā
 - c) mazākā
 - d) tas atkarīgs no atmosfēras spiediena
 - e) tas atkarīgs no temperatūras
5. Šķidrums plūst caurulē ar diametru 5 cm un ātrumu 1 m/s. Kāds šķidruma tilpums izplūst cauri caurulei 1s?
 - a) $2.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
 - b) $7.9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$
 - c) $20 \text{ m}^3/\text{s}$
 - d) $79 \text{ m}^3/\text{s}$
 - e) $130 \text{ m}^3/\text{s}$

7. Literatūra

1. B.Hof, A.Juel, T.Mullin. Scaling of the Turbulence Transition Threshold in a Pipe. Phys.Rev.Lett.Vol.91, No 24, (2003) 244052