

# **MECANICA FLUIDELOR**

## **ÎNDRUMAR DE LABORATOR**

**Florin POPESCU**  
**Lizica Simona PARASCHIV**  
**Spiru PARASCHIV**  
**Michael FRĂȚIȚA**  
**Ioan ALEXANDRU**

**2018**

---

## Cuprins

STUDIUL FENOMENELOR HIDROSTATICE .....	3
Descrierea standului .....	3
Forța Arhimedică .....	5
Capilaritate .....	8
Forțe de presiune .....	12
DETERMINAREA REGIMURILOR DE CURGERE ALE LICHIDELOR – EXPERIMENTUL REYNOLDS .....	19
Descrierea standului .....	19
Breviar teoretic.....	21
TEOREMA IMPULSULUI - ACȚIUNEA UNUI JET DE FLUID ASUPRA UNOR SUPRAFEȚE PLANE ȘI CURBE .....	24
Descrierea standului .....	24
Breviar teoretic.....	25
STUDIUL HIDRODINAMICII CURGERII ÎN CONDUCTE SUB PRESIUNE .....	29
Descrierea standului .....	29
Breviar teoretic.....	33
Măsurarea debitului cu ajutorul diafragmei, ajutorului sau tubului Venturi.....	37
Măsurarea presiunii și a vitezei maxime într-o conductă cu ajutorul tubului Pitot sau ale unei prize de presiune statică .....	38
Determinarea coeficienților de pierdere uniform distribuită de sarcină pentru diferite tipuri de conducte...42	
Determinarea coeficienților de pierdere locală de sarcină pentru diferite singularități întâlnite în sistemele de conducte (cot, curbă, micșorare de secțiune, lărgire de secțiune) .....	43
Măsurarea debitelor fluidelor cu ajutorul rotametrelor .....	46
Descrierea standului .....	46
STANDUL HELLE-SHAW PENTRU VIZUALIZAREA CURGERILOR POTENȚIALE .....	54
Descrierea standului .....	54
Simularea curgerii potențiale în jurul unor profile diferite .....	55
STUDIUL FENOMENULUI LOVITURII DE BERBEC.....	63
Descrierea standului .....	63
Studiul experimental al fenomenului loviturii de berbec în instalații .....	65

## STUDIUL FENOMENELOR HIDROSTATICE

### Descrierea standului

Standul este destinat studiului fenomenelor hidrostactice. Acesta permite efectuare mai multor experimente în acest domeniu.

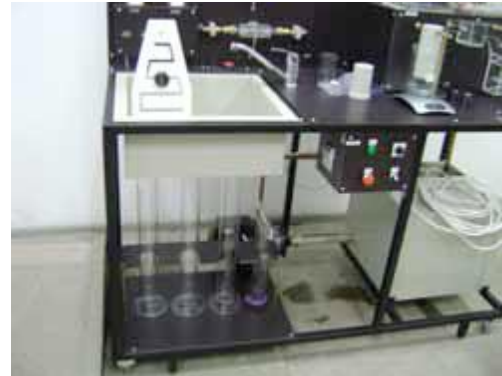


### Lista experimentelor:

- Determinarea densității apei
- Determinarea densității relative a uleiului
- Determinarea tensiunii superficiale a apei
- Determinarea coeficientului cinematic de vâscozitate pentru trei fluide diferite (apa, ulei, glicerina)
- Demonstrarea principiului lui Arhimede
- Determinarea poziției metacentrului pentru un plutitor
- Determinarea excentricității
- Familiarizarea cu diferite metode de măsurarea presiunii
- Măsurarea presiunii cu doua manometre tub U diferite (apa; mercur), manometru cu tub Bourdon, traductor de presiune
- Demonstrarea legii lui Pascal
- Măsurarea presiunii statice si dinamice într-un fluid cu ajutorul prizelor de presiune statice si a tubului Pitot
- Demonstrarea transformării izoterme a gazelor (Boyle-Mariotte)

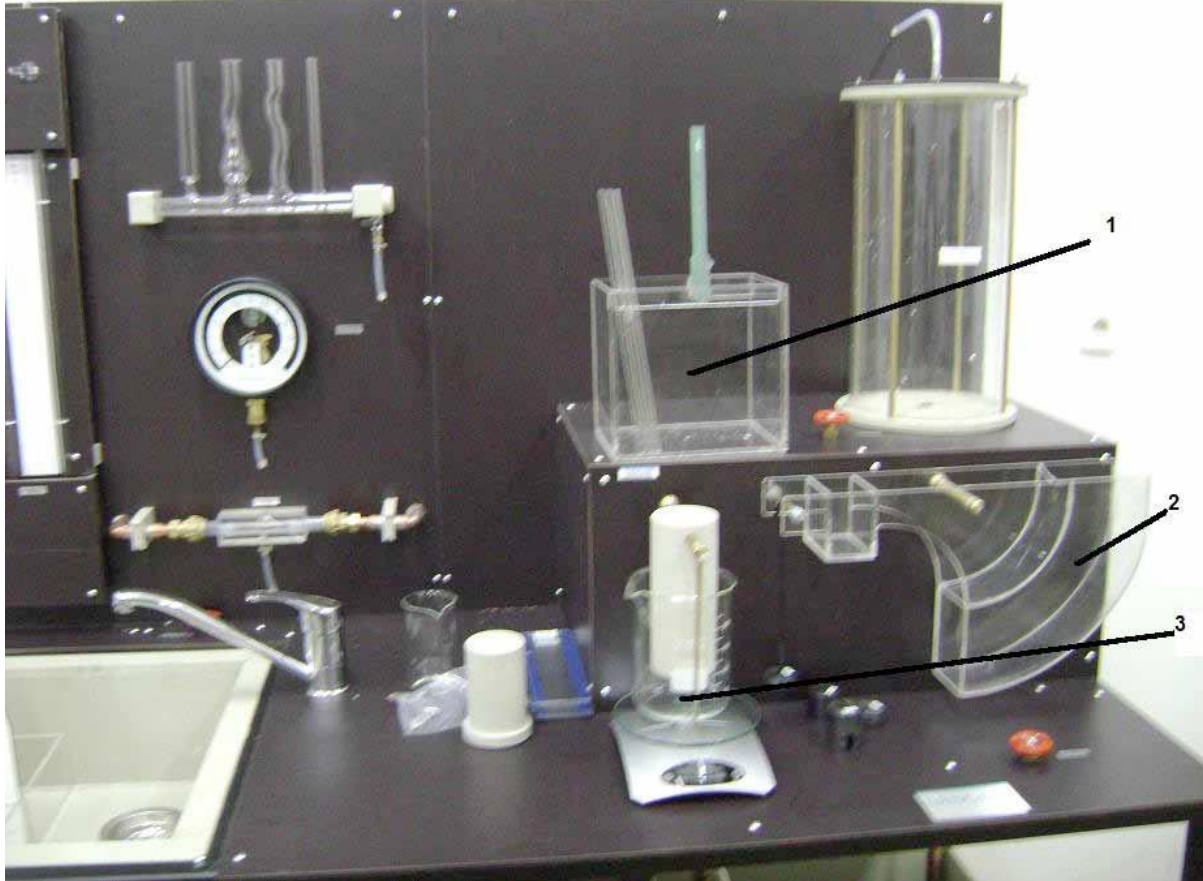
**Standul cuprinde:**

- cântar cu taler
- pahare cilindrice gradate
- densimetru
- rezervor paralelipipedic
- tubulatura capilara
- 2 placi de sticla si distanțiere
- sfera calibrate
- cronometru
- cilindru opac
- rigla gradata
- plutitor
- balanță
- coloana circulara
- 2 manometre tip U (apa, mercur)
- manometru tip Bourdon
- traductor de presiune
- tub Pitot
- prize presiune statica
- rezervor alimentare
- pompa



## Forța Arhimedică

În cadrul acestui experiment va fi verificată prin măsurători legea lui Arhimede. Această lucrare se va desfășura în zona 3 a standului de proprietăți ale fluidelor și hidrostatică (vezi fig. 1).



**Fig. 1. Standul de proprietăți ale fluidelor și hidrostatică**

Pentru realizarea măsurătorilor avem la dispoziție un recipient cilindric (vezi fig. 2), un cilindru din material plastic prevăzut cu posibilitatea de susținere la partea superioară pe o bară orizontală, o riglă gradată și o balanță.

Forța Arhimedică acționează asupra oricărui corp scufundat într-un lichid și este definită ca fiind egală cu greutatea volumului de lichid dezlucuit. În cazul acestui experiment volumul de apă dezlucuit de cilindru din material plastic este:

$$V_{cil} = \frac{\pi d^2}{4} h$$

În consecință, conform enunțului de mai sus, forța Arhimedică rezultă:

$$F_A = V_{cil} \rho g = \frac{\pi d^2}{4} h \rho g$$

Forța Arhimedică poate fi deci determinată dacă se cunosc înălțimea  $h$  și diametrul cilindrului din material plastic.

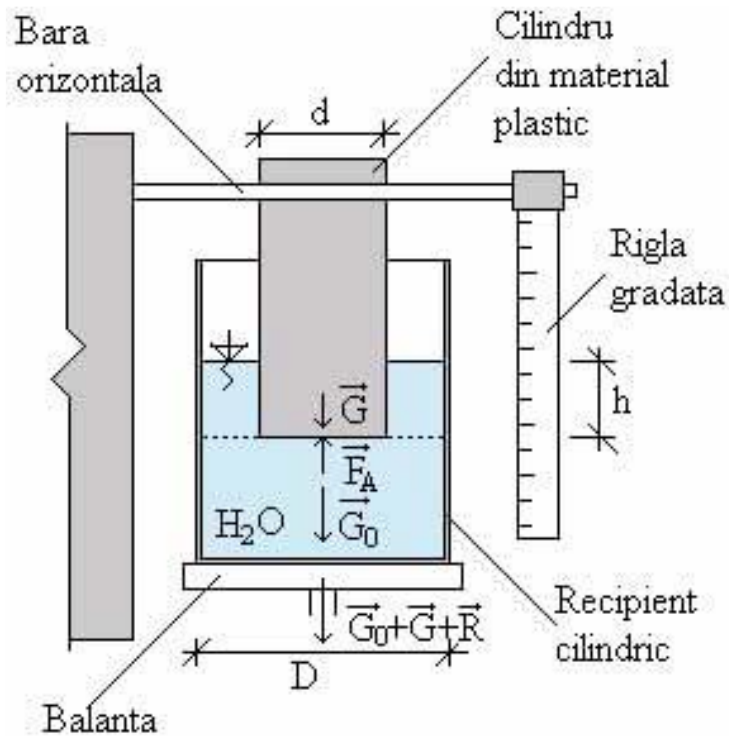


Fig. 2. Determinarea mărimii forței Arhimedice

În cazul în care montajul este așezat pe balanță (fig. 2), asupra platanului acesteia acționează o forță egală cu  $\vec{G}_0 + \vec{G} + \vec{R}$ , unde:

$\vec{G}_0$  reprezintă greutatea apei considerate până la limita inferioară a cilindrului din material plastic;

$\vec{G}$  reprezintă greutatea apei cuprinse în spațiul dintre cilindrul din material plastic și recipientul cilindric;

$\vec{R}$  reprezintă reacțiunea exercitată de cilindrul din material plastic față de fluid (egală și de sens contrar forței Arhimedice).

Suma acestor forțe pentru o anumită înălțime  $h$  poate fi calculată d echilibrarea balanței cu masa  $m$ , ca fiind:

$$G_0 + G + R = mg$$

Experimentele se vor desfășura adăugând succesiv apă în recipientul cilindric (pentru circa 6 valori distincte ale înălțimii  $h$ ), înregistrând masa de echilibrare a balanței și înălțimea  $h$  corespunzătoare.

Diametrele cilindrului din material plastic  $d$  și al recipientului circular  $D$  trebuie măsurate înainte de începerea experimentului.

Trebuie înregistrată de asemenea masa  $m_0$  de echilibrare a balanței pentru momentul în care suprafața liberă a lichidului ajunge la limita inferioară a cilindrului din material plastic suspendat.

- Determinați formula de calcul a reacțiunii  $R$  pornind de la valorile  $m_0, m_i, h_i, d, D$ .

Calculați pentru fiecare pereche de valori  $m_i, h_i$  măsurate, valorile corespunzătoare  $R_i$  și  $F_{Ai}$ .

- Determinați eroarea relativă între valorile  $R_i$  și  $F_{Ai}$  cu relația:

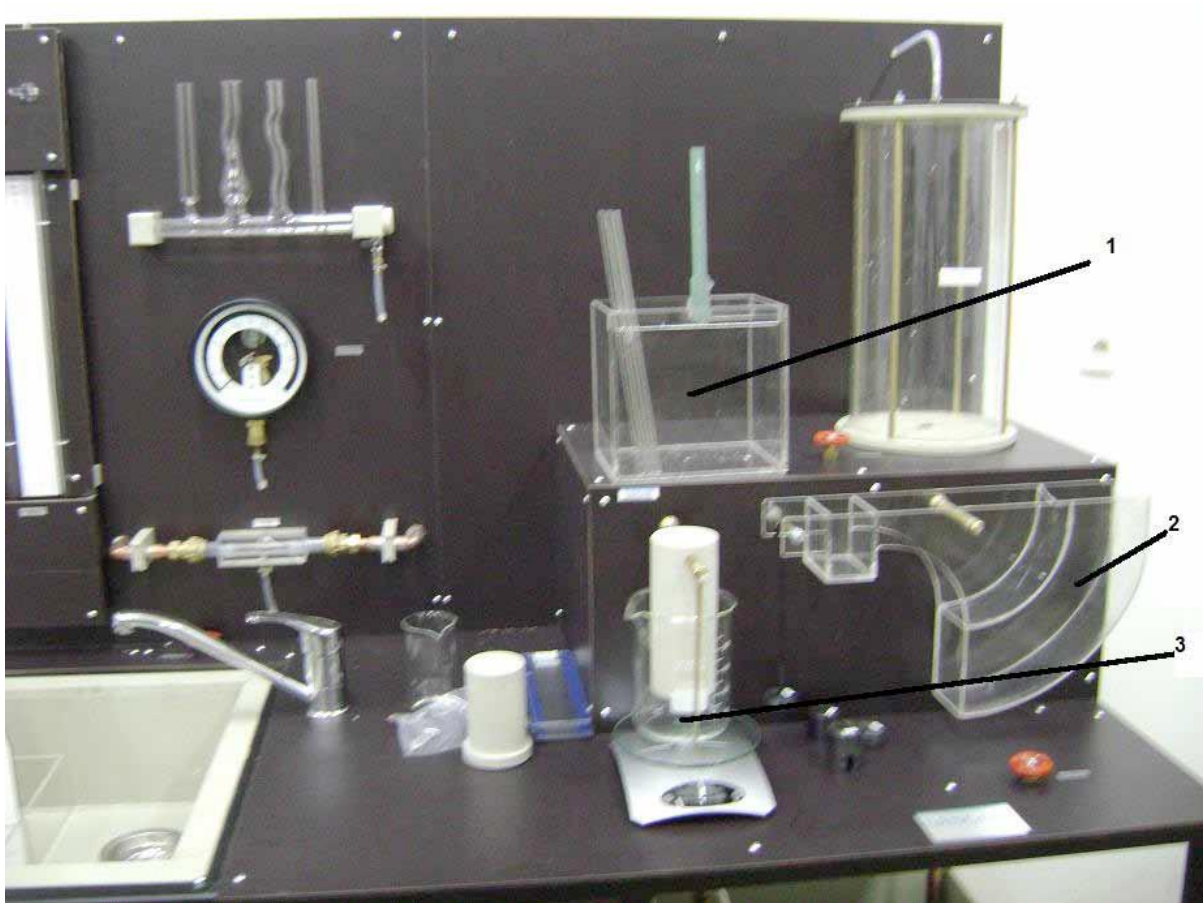
$$\varepsilon_i = \frac{|F_{Ai} - R_i|}{F_{Ai}} 100$$

Faceți comentarii asupra mărimii erorii relative în funcție de înălțimea măsurată  $h_i$ , sau oricare alte elemente care vi se par semnificative.

## Capilaritate

În cadrul acestui experiment va fi dedusă și verificată variația produsului  $hb$  ( $h$  – înălțimea la care se ridică apa între două plăci plane paralele distanțate cu  $b$  una față de cealaltă) în funcție de distanța  $b$  dintre plăci.

Această lucrare se va desfășura în zona 1 a standului de proprietăți ale fluidelor și hidrostatică (vezi fig. 1)



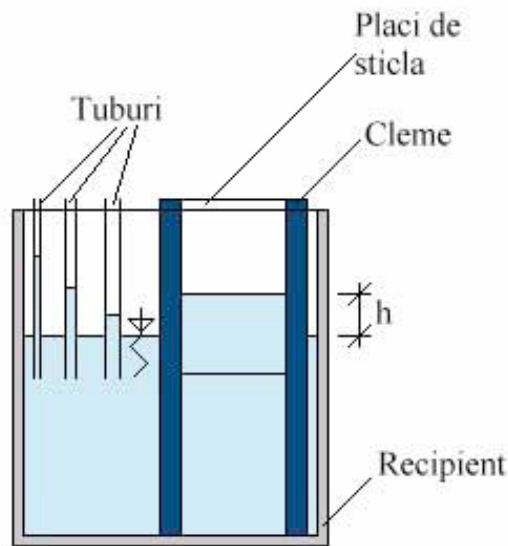
**Fig.1. Standul de proprietăți ale fluidelor și hidrostatică**

Pentru realizarea măsurătorilor avem la dispoziție un recipient dreptunghiular (vezi fig. 2), trei tuburi cilindrice de sticlă cu diametrele interioare: 0,4 mm; 0,8 mm și 1,6 mm, două plăci de sticlă și două cleme (pentru prinderea plăcilor) precum și fâșii din material plastic de diferite grosimi care permit distanțarea diferită a plăcilor. Grosimile fâșiilor din plastic sunt:



- Albastru închis 0,005 mm
- Verde 0,075 mm
- Portocaliu 0,1 mm
- Violet 0,125 mm
- Gris 0,19 mm
- Negru 0,25 mm
- Roșu 0,4 mm
- Galben 0,5 mm

Ascensiunea în tuburile capilare (vezi fig. 3) se produce până la echilibrarea forței rezultante  $F$  verticale datorate tensiunii superficiale  $\sigma$  de către greutatea coloanei de lichid din tub  $G$ .



**Fig. 2. Recipientul în care se desfășoară experimentul de capilaritate**

Tensiunea superficială acționează în zona de contact dintre fluid și peretele solid, tangentă la suprafața meniscului. Forța rezultantă verticală poate fi calculată ca:

$$F = \pi d \sigma \cos \theta$$

unde  $\pi d$  reprezintă lungimea zonei de contact dintre fluid și peretele solid, iar produsul  $\sigma \cos \theta$  reprezintă componenta verticală a tensiunii superficiale.

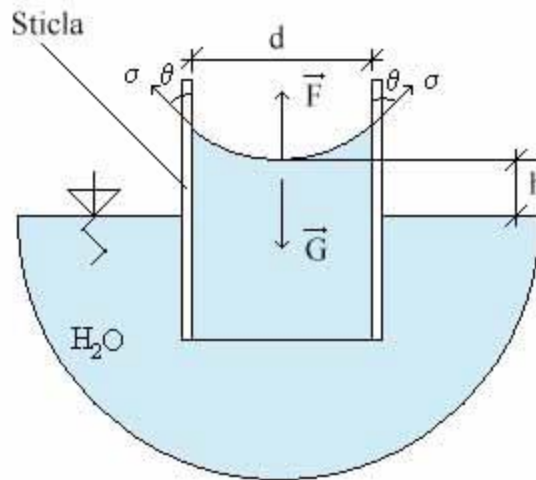


Fig. 3. Ascensiunea capilară într-un tub de sticlă

Greutatea coloanei de lichid din tubul capilar este:

$$G = \frac{\pi d^2}{4} h \rho g$$

unde  $\frac{\pi d^2}{4}$  reprezintă volumul de apă conținut în tubul capilar (datorită diametrului mic acesta este aproximat ca fiind volumul unui cilindru),  $\rho$  reprezintă densitatea apei iar  $g$  reprezintă accelerația gravitațională.

Echilibrarea celor două forțe duce la:

$$\pi d \sigma \cos \theta = \frac{\pi d^2}{4} h \rho g$$

sau

$$\sigma \cos \theta = \frac{d h \rho g}{4}$$

Măsurând cele trei denivelări din tuburi și cunoscând diametrele tuburilor, putem calcula valoarea produsului  $\sigma \cos \theta$  pentru apă – sticlă – aer folosind formula:

$$\sigma \cos \theta = \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{d_i h_i \rho g}{4}}{3}$$

Echilibrul forțelor mai poate fi scris și sub forma:

$$\pi d \sigma \cos \theta = \frac{\pi d^2}{4} h \rho g$$

care reprezintă legea Jurin-Borelli. Produsul  $hd$  este o constantă pentru un anumit grup lichid-solid-gaz.

- Să se determine o relație asemănătoare legii Jurin-Borelli pentru cazul a două plăci plane paralele distanțate cu  $b$  (vezi fig. 4), pentru care se neglijează acțiunea tensiunii superficiale pe porțiunile din perimetrul de contact lichid-solid de lungime  $b$ .
- Folosind relația obținută și valoarea produsului  $\sigma \cos \theta$  determinată experimental cu cele trei tuburi capilare, calculați valoarea constantei  $hb$ .
- Folosind distanțierile din plastic, modificați distanța între plăcile de sticlă și măsurați ascensiunea capilară pentru fiecare caz.
- Reprezentați grafic valorile experimentale  $hb$  în funcție de  $b$  și comparați-le cu valoarea constantei obținute teoretic.

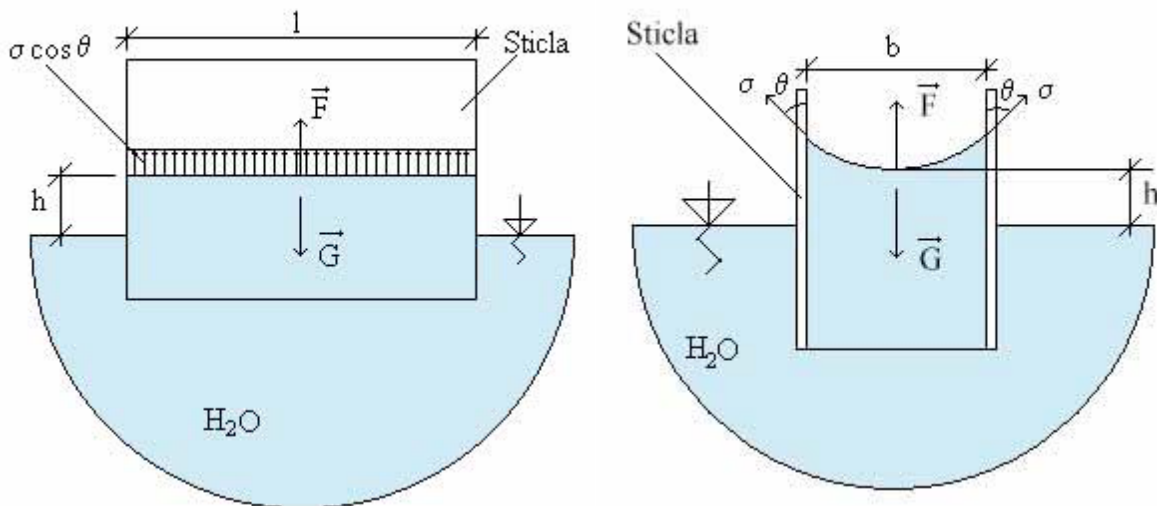


Fig. 4. Ascensiunea capilară între două plăci plane paralele

## Forțe de presiune

În cadrul acestui experiment va fi determinat punctul de aplicație al forței de presiune ce acționează pe o suprafață plană și va fi calculată excentricitatea acestuia față de centrul de greutate al suprafeței.

Această lucrare se va desfășura în zona 2 a standului de proprietăți ale fluidelor și hidrostatică (vezi fig. 1).



Fig. 1. Standul de proprietăți ale fluidelor și hidrostatică

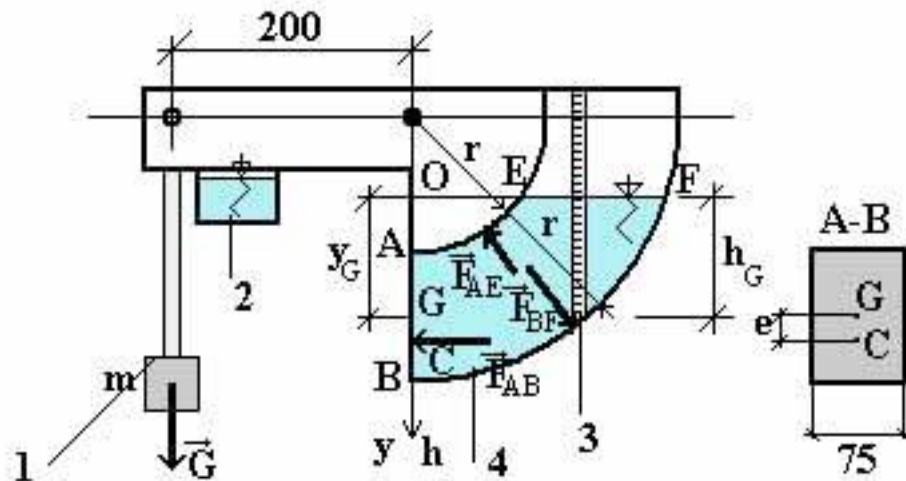
Pentru realizarea măsurătorilor avem la dispoziție o balanță cu o construcție specială (vezi fig. 2) și un set de greutăți etalonate.

Această balanță are brațul din dreapta construit sub forma unui recipient semicircular. Axa de rotație a balanței coincide cu centrul laturilor semicirculare ale recipientului, astfel încât, atunci când în recipient se introduce lichid, forțele de presiune ce apar pe suprafețele BF și AE să nu dea moment față de punctul O. În acest mod singura forță de presiune care dă moment față de axul de rotație al balanței este forța care apare pe suprafața plană dreptunghiulară AB ( $\vec{F}_{AB}$ ).

Mărimea acestei forțe poate fi calculată cu relația:

$$F_{AB} = p_G A_{AB}$$

unde  $p_G$  reprezintă presiunea în centrul de greutate al suprafeței AB iar  $A_{AB}$  reprezintă aria suprafeței dreptunghiulare AB.



**Fig. 2. Balanța pentru determinarea punctului de aplicație al forțelor de presiune ce acționează pe suprafețe plane. 1- greutăți etalonate; 2- Recipient de echilibrare; 3- rigletă gradată; 4- recipient semicircular**

Această relație de definiție mai poate fi scrisă exprimând valoarea presiunii în funcție de înălțimea lichidului din rezervor (față de centrul de greutate G al suprafeței AB)  $h_G$ , ca:

$$F_{AB} = \rho g h_G A_{AB}$$

Înălțimea  $h_G$  se poate măsura pe o rigletă gradată atașată recipientului semicircular.

Înainte de începerea experimentărilor propriu zise, balanța trebuie echilibrată. Pentru aceasta se umple treptat recipientul de echilibrare existent pe brațul din stânga al balanței până când partea de sus a acesteia devine perfect orizontală. Dacă este nevoie să înlăturăm o parte din apa aflată în recipientul de echilibrare, se poate folosi pipeta existentă la standul de proprietăți ale fluidelor și hidrostatică.

După echilibrare se umple recipientul semicircular cu apă până când suprafața AB este complet imersată în lichid (cu balanța menținută în poziție orizontală).

Se echilibrează apoi, pe cât posibil, balanța cu greutățile etalonate. Pentru o echilibrare fină a balanței se adaugă sau se înlătură apă în/din recipientul semicircular.

Se înregistrează înălțimea  $h_c$  corespunzătoare și valoarea masei de echilibrare. În continuare se adaugă o masă suplimentară pe brațul din stânga al balanței și se reia echilibrarea prin introducerea apei în recipientul din dreapta. Această procedură se repetă până când există minimum 6 perechi de valori  $h_{G_i}, m_i$ .

Punctul de aplicație C al forței de presiune  $\vec{F}_{AB}$ , numit centru de presiune, se află poziționat mai jos decât centrul de greutate G al suprafeței AB cu o valoare  $e$  numită excentricitate.

Valoarea excentricității se poate determina cu relația teoretică:

$$e_t = \frac{I_{Gx}}{S_x}$$

unde:

$I_{Gx}$  - reprezintă momentul de inerție al suprafeței dreptunghiulare AB față de o axă x care trece prin centrul ei de greutate;

$S_x$  - reprezintă momentul static al suprafeței AB față de axa x a unui sistem de coordonate cu originea și axa x în planul manometric (planul suprafeței libere a lichidului din recipientul semicircular – punctul O din figura 2) iar axa y verticală, în jos, trecând prin centrul de greutate al suprafeței.

Momentul static se determină cu formula:

$$S_x = y_G A_{AB}$$

unde  $y_G$  este coordonata y a centrului de greutate al suprafeței AB față de sistemul de axe considerat.

- Din ecuația de moment față de centrul de rotație al balanței, determinați formula de calcul a excentricității măsurate  $e_m$  în funcție de înălțimea  $h_c$  și masa  $m$  care echilibrează balanța.

- Pentru setul de valori  $h_{G_i}$  înregistrate, calculați valoarea excentricității  $e_i$  folosind relația teoretică.

- Determinați eroarea relativă între valorile  $e_{ii}$ ,  $e_{mi}$  cu relația:

$$\varepsilon_i = \frac{|e_{ii} - e_{mi}|}{e_{ii}} 100$$

• Faceți comentarii asupra mărimii erorii relative  $\varepsilon_i$  în funcție de înălțimea  $h_{Gi}$ , masa  $m_i$ , sau oricare alte elemente care vi se par semnificative.

## REGULI DE SIGURANȚĂ

### 1. Instrucțiuni generale

Înainte de a încerca să instalați, să echipați sau să operați echipamentul, toate instrucțiunile relevante de instalare de la furnizorii / producătorii și reglementările locale ar trebui să fie înțelese și puse în aplicare.

Este iresponsabil și periculos să se utilizeze necorespunzător echipamentul sau să ignorați instrucțiunile, reglementările sau avertismentele.

A nu se depăși condițiile maxime de operare specificate (ex. temperatura, presiunea, viteza etc.)

### 2. Instalare

(a) Utilizați unelte de ridicare, dacă este posibil, pentru a instala echipamente grele. Purtați pantofi de siguranță, dacă este cazul.

(b) Deosebită atenție ar trebui să fie acordată pentru a evita avarierea echipamentului în timpul manipularii și despachetării.

(c) În cazul în care sunt necesare fundații speciale, urmați instrucțiunile furnizate și nu improvizați. Localizați echipamente grele la nivel jos.

(d) Echipamentele care folosesc lichide corozive sau inflamabile ar trebui să fie amplasate într-o zonă de control cu o capacitate de 50% mai mare decât valoarea maximă a conținutului echipamentului.

(e) Asigurați-vă că toate echipamentele sunt montate pe sol și conectate la o sursă de alimentare electrică, la tensiunea corectă. Sursa de alimentare electrică trebuie să includă un dispozitiv rezidual de curent (RCD) (alternativ numit disjunctoare de scurgeri în pământ - ELCB) pentru a proteja operatorul de șocuri electrice în caz de utilizare necorespunzătoare sau în caz de accident.

(f) Lăsați întotdeauna suficient spațiu între echipamente și pereți.

### 3. Comisionare

Utilizatorul trebuie să se asigure că echipamentele sunt instalate și controlate de către un membru competent înainte de a permite studenților să opereze cu acestea.

### 4. Operare

(a) Să se asigure că studenții sunt pe deplin conștienți de riscurile potențiale, atunci când operează cu echipamentele.

(b) Studenții ar trebui să fie supravegheați de către un membru competent al personalului în orice moment, atunci când sunt în laborator. Nimeni nu ar trebui să opereze singur un echipament. Nu lasați echipamentele să funcționeze nesupravegheate.

(c) Nu permiteți studenților să ruleze propriile proceduri experimentale cu excepția cazului în care aceștia sunt competenți pentru a face acest lucru.

## 5. Întreținere

(d) Un echipament întreținut prost este un potențial pericol. Asigurați-vă că un membru competent al personalului este responsabil pentru organizarea de întreținere și reparațiile planificate.

(e) Nu permiteți operarea echipamentului defect. Asigurați-vă că reparațiile sunt efectuate competent și verificate înainte ca studenților să li se permită să opereze echipamentul.

## 6. Utilizarea electricității

(a) Cel puțin o dată pe lună, verificați că ELCB (RCCB) operează corect apăsând butonul de test. Disjunctorul trebuie să de declanșeze în momentul în care butonul este apăsător (nedeclanșarea înseamnă că operatorul nu este protejat și o reparație trebuie să fie efectuată de către un electrician competent, înainte ca echipamentele să fie folosite).

(b) Energia electrică este cauza celor mai frecvente accidente din laborator. Asigurați-vă că toți membrii personalului și studenții îl respectă.

(c) Asigurați-vă că sursa de alimentare electrică a fost deconectată de la echipament înainte de încercarea de reparații sau modificări.

(d) Apă și electricitatea nu sunt compatibile și pot cauza un prejudiciu grav, dacă acestea ajung în contact.

(e) Deconectați întotdeauna echipamentele de la sursele electrice, atunci când nu sunt folosite.

## 7. Evitarea incendiilor și exploziei

(a) Să se asigure că laboratorul este prevăzut cu extincitoare adecvate de foc pentru pericolele potențiale.

(b) În cazul în care sunt folosite lichide inflamabile, trebuie să fie interzis fumatul. Anunțurile ar trebui afișate pentru a impune acest lucru.

(c) Aveți grijă, deoarece pudra și praful pot să se aprindă spontan, în anumite condiții. Vasele goale care au conținut substanțe inflamabile pot conține vapori și să explodeze dacă sunt aprinse.

(d) Cantități mari de lichide inflamabile trebuie să fie depozitate în afara laboratorului, în conformitate cu reglementările locale.

(e) Rezervoarele de stocare pe echipament nu ar trebui să fie supraumplute. Toate scurgerile ar trebui să fie imediat curățate cu atenție. Aveți grijă la podele alunecoase.

(f) Când lichide care exertează vapori inflamabili sunt manipulate în laborator, domeniul ar trebui să fie ventilat de un sistem de extracție. Ventilatoarele de pe echipamente ar trebui să fie conectate la sistemul de extracție.

(g) Studenților nu ar trebui să li se permită să pregătească amestecuri pentru analiză sau alt scop fără supraveghere competentă.



## 8. Manipularea materialelor otrăvitoare, corozive sau toxice

(a) Anumite lichide esențiale pentru funcționarea echipamentului, de exemplu, mercur, sunt otrăvitoare sau poate exerta vapori otrăvitori. Purtați îmbrăcăminte adecvată de protecție atunci când manipulați o astfel de substanță. Stergeți orice stropitură imediat și ventilați zonele din abundență cu ajutorul echipamentelor de extracție. Aveți grijă la podele alunecoase.

(b) Nu permiteți introducerea sau consumarea mâncării în laborator. Nu folosiți paharele de laborator ca vase de băut.

(c) În cazul în care sunt implicați vapori otrăvitori, fumatul trebuie să fie interzis. Ar trebui afișate anunțuri pentru a impune acest lucru.

(d) Otrava și materialele foarte toxice trebuie păstrate într-un dulap încuiat sau stocate și verificate cu regularitate. Utilizarea unor astfel de substanțe ar trebui să fie supravegheată.

## 9. Evitarea tăieturilor și arsurilor

(a) Aveți grijă atunci când manipulați componente cu colțuri tăioase.

(b) Suprafețe fierbinti nu pot fi, în cele mai multe cazuri, în totalitate acoperite și pot produce arsuri grave chiar și atunci când nu este "vizibil fierbinte".

Folosiți-vă simțul pentru a recunoaște partile din echipament care ar putea fi fierbinti.

## 10. Protecție pentru ochi

(a) Trebuie purtați ochelari, ori de câte ori există un risc pentru ochi. Riscul ar putea să apară de la pulberi, stropi de lichide, vapori. Aveți grijă, de fluxurile de aer care se mișcă rapid. Soluțiile alcaline sunt deosebit de periculoase pentru ochi.

(b) Nu priviți direct la o sursă puternică de lumină, cum ar fi o lampă cu arc de xenon sau cu laser. Asigurați-vă că echipamentul care folosește o astfel de sursă este poziționat astfel încât trecătorii să nu poată să vadă accidental sursa sau razele reflectate.

(c) Facilități pentru irigarea ochiilor trebuie să fie întotdeauna disponibile.

## 11. Protecția urechilor

Trebuie purtate protecții pentru urechi atunci când se operează cu echipamente zgomotoase.

## 12. Îmbrăcăminte

(a) În laborator ar trebui purtată îmbrăcăminte adecvată. Îmbrăcăminte largă poate provoca vătămare gravă dacă este prinsă în mașini rotative. Cravate, inele de pe degete etc ar trebui să fie scoase în aceste situații.

(b) Îmbrăcăminte suplimentară de protecție ar trebui să fie disponibilă pentru toți membrii personalului și studenții, după caz.

## 13. Protecție și dispozitive de siguranță

(a) Dispozitivele de securitate și protecție sunt instalate pe echipamente pentru a proteja operatorul. Echipamentele nu trebuie operate fără astfel de dispozitive.

(b) Supape de siguranță, cut-outs sau alte dispozitive de siguranță vor fi setate pentru a proteja echipamentele. Interferințe cu aceste dispozitive pot crea un potențial pericol.

(c) Nu este posibil să protejezi operatorul împotriva tuturor pericolelor neprevăzute. Folosiți-vă rațiunea, în orice moment, atunci când sunteți în laborator.

(d) Înainte de a porni o mașină de rotație, asigurați-vă că sunt personal conștienți cum să-l oprească într-un caz de urgență.

(e) Asigurați-vă că dispozitive de control de viteză sunt întotdeauna setate la zero înainte de a porni echipamentul.

#### **14. Primul ajutor**

(a) Dacă se produce un accident în laborator, este esențial ca echipamentul de prim ajutor să fie disponibil și ca supraveghetorul să știe cum să îl folosească.

(b) Un anunț oferind detalii cu privire la primul ajutor eficient ar trebui să fie afișat permanent.

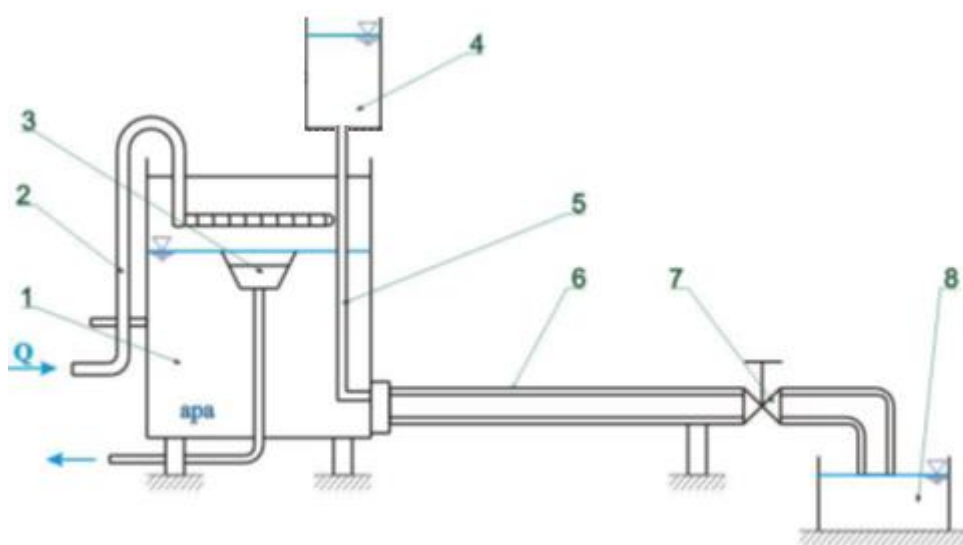
(c) O "listă scurtă" de antidoturi pentru substanțele chimice utilizate în laborator ar trebui să fie afișată permanent.

## DETERMINAREA REGIMURILOR DE CURGERE ALE LICHIDELOR – EXPERIMENTUL REYNOLDS

### Descrierea standului

Scopul acestei lucrări este de a studia regimurile de curgere a fluidelor, de a determina viteza de curgere laminară a unui fluid și, pe această bază, de a calcula numărul lui Reynolds. Fluidele reale au proprietatea de vâscozitate, care produce frecări și pierderi de energie.

În cadrul acestui experiment, se vizualizează modul în care curge un anumit fluid și în final se clasifică curgerea fluidelor în următoarele regimuri de curgere: **laminar**, **tranzitoriu**, **turbulent**. Instalația cuprinde:



**Figura 1 – Instalația experimentală**

(1)- rezervor de nivel constant (menține adâncimea apei constantă, astfel încât viteza cu care intră apa în tubul de sticlă este aproximativ  $gh^2$  și se obține în final un debit și un regim de curgere constant.

(2)- dispozitiv de alimentare cu orificii multiple

(3)- dispozitiv de preaplin. (evacuează surplusul de debit)

(4)- vas cu colorant

(5)- tub injector (permite accesul coloranților în tubul de sticlă)

(6)- tub de sticlă pentru vizualizarea curgerii

(7)- robinet pentru reglarea debitului

(8)- menșurător gradat pentru colectarea volumului de apă scursă din tubul de sticlă într-un anumit timp.

Se deschide robinetul (6) și se introduce colorant prin acul injector.

La viteze și debite mici, colorantul are aspectul din figura 2 și corespunde unui **regim laminar**.

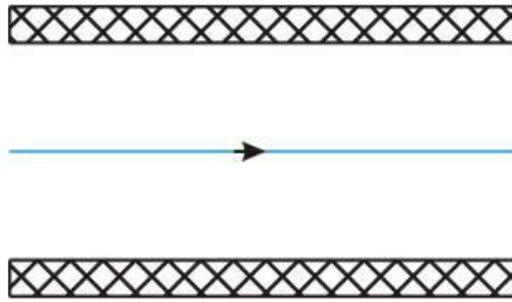


Figura 2 - Regim laminar de curgere

Particulele de fluid au o singură componentă de viteză  
Fluidul curge în straturi, nu există schimburi de particule și de impuls între straturile de fluid.

Se deschide în continuare robinetul (6) până se observă oscilații aleatorii ale firului de colorant ca în figura 3 ce corespunde unui **regim tranzitoriu**.

Apar pulsații de viteză după alte direcții decât direcția curgerii ce determină schimb de particule și impuls între straturi.

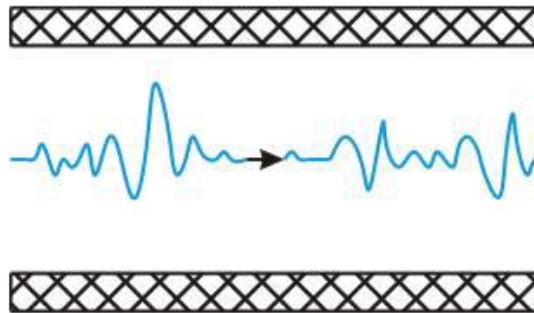


Figura 3 – Regim tranzitoriu de curgere

La o deschidere și mai pronunțată a robinetului (6) se obțin debite de curgere mari și colorantul are aspectul din figura 4.

În cadrul acestui **regim turbulent**, pulsațiile de viteză aleatorii au valori mari, schimbul de impuls este accentuat și regimul corespunde unor pierderi energetice mari.

Acest regim se întâlnește de obicei în cazul transportului fluidelor în conducte deoarece sunt solicitate de regulă debite mari de fluid.

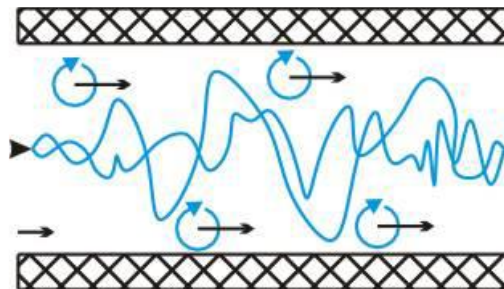


Figura 4 – Regim turbulent de curgere

În cazul experienței, s-a constatat că viteza medie de curgere prin tubul de sticlă, diametrul interior al tubului, precum și vâscozitatea cinematică a lichidului influențează evoluția colorantului.

Pentru prima figură:  $Re < 2300$

Pentru a doua figură:  $Re \approx 2300$

Pentru a treia figură:  $Re > 2300 \rightarrow$  sute de mii

În cadrul fiecărui regim de curgere se măsoară volumul de apă scurs într-un anumit timp și rezultă debitul volumic:

$$\dot{Q} = \frac{V}{t} \quad (1)$$

unde:

$\dot{Q} [m^3 / s]$ , debitul volumic;

$V [m^3]$ , volumul colectat;

$t [s]$ , timpul.

$$\dot{Q} = v \cdot S \Rightarrow v = \frac{\dot{Q}}{S} = \frac{\dot{Q}}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4\dot{Q}}{\pi D^2} \quad (2)$$

$$\Rightarrow Re = \frac{4\dot{Q}}{\pi D^2} \cdot \frac{D}{\nu} \Rightarrow Re = \frac{4\dot{Q}}{\pi D \cdot \nu}$$

## Breviar teoretic

Pentru a studia dinamica unui fluid cu ajutorul noțiunilor asimilate la dinamica punctului material se definește noțiunea de particulă de fluid. Aceasta constituie un element de volum din interiorul fluidului, mult mai mare decât dimensiunea unei molecule; în aceste condiții interacțiunile dintre moleculele dintr-o particulă de fluid nu sunt „simțite” în exteriorul acesteia. Particulele de fluid păstrează toate caracteristicile întregului fluid și interacționează între ele ca entități independente.

În analiza problemelor de dinamica fluidelor este frecvent avantajos să se illustreze geometric câmpurile de curgere. O astfel de reprezentare este realizată prin utilizarea noțiunilor de linie de curgere sau de linie de curent. Prin linie de curgere se înțelege traiectoria unei particule de fluid. Linia de curent este curba imaginară desenată în interiorul unui fluid în mișcare astfel încât în fiecare punct ea are tangent câte un vector viteză al particulelor de fluid. Forma liniilor de curent poate varia de la un moment de timp la altul în cazul în care curgerea este nestaționară. În cazul în care câmpul vitezelor nu depinde de timp (adică viteza într-un punct nu se modifică în timp, deși în puncte diferite vitezele pot fi diferite) sau, altfel spus, curgerea este staționară, forma liniilor de curent nu se modifică în timp (liniile de curent rămân „înghețate”). Aceasta implică faptul că, în cazul curgerii staționare, dacă la un anumit moment o particulă de fluid se află pe o linie de curent dată, ea va rămâne pe acea linie de curent. Prin urmare doar în cazul unei curgeri staționare linia de curgere și linia de curent coincid. Suprafața

---

formată de liniile de curent care trec prin punctele unei curbe închise poartă numele de tub de curent, iar volumul de fluid care trece printr-un tub de curent se numește filament de curent.

Cu ajutorul noțiunilor de mai sus se pot descrie regimurile de curgere ale fluidelor. Astfel, curgerea unui fluid se numește **laminară** dacă liniile de curent sunt paralele între ele. Așa cum spune și numele, curgerea laminară este una în care fluidul curge în straturi paralele între ele, astfel încât particulele de fluid aflate într-un strat nu trec în alte straturi. În cazul unei curgeri laminare un filament de curent apare ca o singură linie, iar dacă filamentul este colorat cu ajutorul unui fluid trasor cu altă culoare decât restul fluidului, nu se va observa nici un fel de dispersare a fluidului trasor în fluidul de bază (cu excepția unei ușoare dispersii datorate mișcării moleculare).

Pe de altă parte, dacă filamentul de fluid trasor se va dispersa rapid în fluidul de bază, spărgându-se în turbioane cu dimensiuni aleatoare curgerea se numește **turbulentă**. Comportarea fluidului în curgere turbulentă se datorează superpoziției unor mici fluctuații de viteză peste viteza medie de curgere, dând naștere vârtejurilor. Amestecarea particulelor de fluid provenite din straturi de fluid diferite dau naștere la dispersarea rapidă a particulelor de fluid trasor, conducând la formarea turbioanelor.

În cazul curgerii printr-un tub cu secțiunea circulară cu raza  $R$  natura curgerii (laminară sau turbulentă) este determinată de valoarea unei mărimi adimensionale numită numărul lui Reynolds, în onoarea fizicianului american Osborne Reynolds (1883) care a studiat experimental tranziția de la curgerea laminară la cea turbulentă:

$$Re = \frac{v_m \cdot 2R}{\nu} = \frac{v_m \cdot D}{\nu} \quad (3)$$

unde:

$\nu = \eta/\rho$  este coeficientul de vâscozitate cinematică a fluidului,

$\eta$  - coeficientul de vâscozitate dinamică,

$\rho$  - densitatea.

$v_m$  reprezintă viteza medie de curgere a fluidului prin tub (viteza cu care ar curge fluidul prin tub dacă ea ar fi aceeași în toate punctele secțiunii transversale a tubului).

S-a constatat experimental că, în general, în cazul lichidelor dacă  $Re < 2000$  curgerea este laminară, iar dacă  $Re > 3000$  curgerea este turbulentă. În domeniul  $2000 < Re < 3000$  curgerea este instabilă (tranzitorie), putând trece de la un regim la altul.

### Realizarea experimentului și prelucrarea rezultatelor

Se deschide robinetul de alimentare de la rețea și se reglează robinetul ca prin tub să curgă un debit redus. Se reglează debitul de lichid colorat pentru a se vizualiza un fir subțire în axul conductei. Se introduce vasul în jet, se colectează un volum  $V$  și se cronometrează timpul  $t$ . Debitul, determinat prin metoda volumetrică, este  $Q = V/t$ .

Cu ajutorul debitului și știind vâscozitatea aproximativă a apei  $\nu = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$  (considerată la  $10^\circ\text{C}$ ) se calculează numărul Reynolds al curgerii.

Datele se înscriu în tabelul 1.

- Se mărește debitul din robinet și se observă comportarea firului colorat. Se fac citirile și se înscriu în tabel.

- Se mărește debitul și dâra de lichid colorat începe să șerpuiască. Se fac citirile și se înscriu în tabel.

- La o nouă mărire a debitului, lichidul colorat se amestecă de la intrare în apă datorită turbulenței. Se fac citirile și se înscriu în tabel.

---

- Se micșorează debitul pentru a prinde momentul revenirii de la regim turbulent la regim laminar. Pe baza datelor obținute se indică valoarea  $Re_{cr}$ .

Se trag concluziile corespunzătoare datelor experimentale.

Tabelul 1

Nr. exp.	V (m <sup>3</sup> )	t (s)	$\dot{Q}$ (m <sup>3</sup> /s)	v (m/s)	Re -	Observații privind vizualizarea curgerii

## TEOREMA IMPULSULUI - ACȚIUNEA UNUI JET DE FLUID ASUPRA UNOR SUPRAFEȚE PLANE ȘI CURBE

Lucrarea are ca scop determinarea pe cale experimentală a forței de impuls dezvoltată de un jet de apă pe suprafețe plane și curbe.

### Descrierea standului

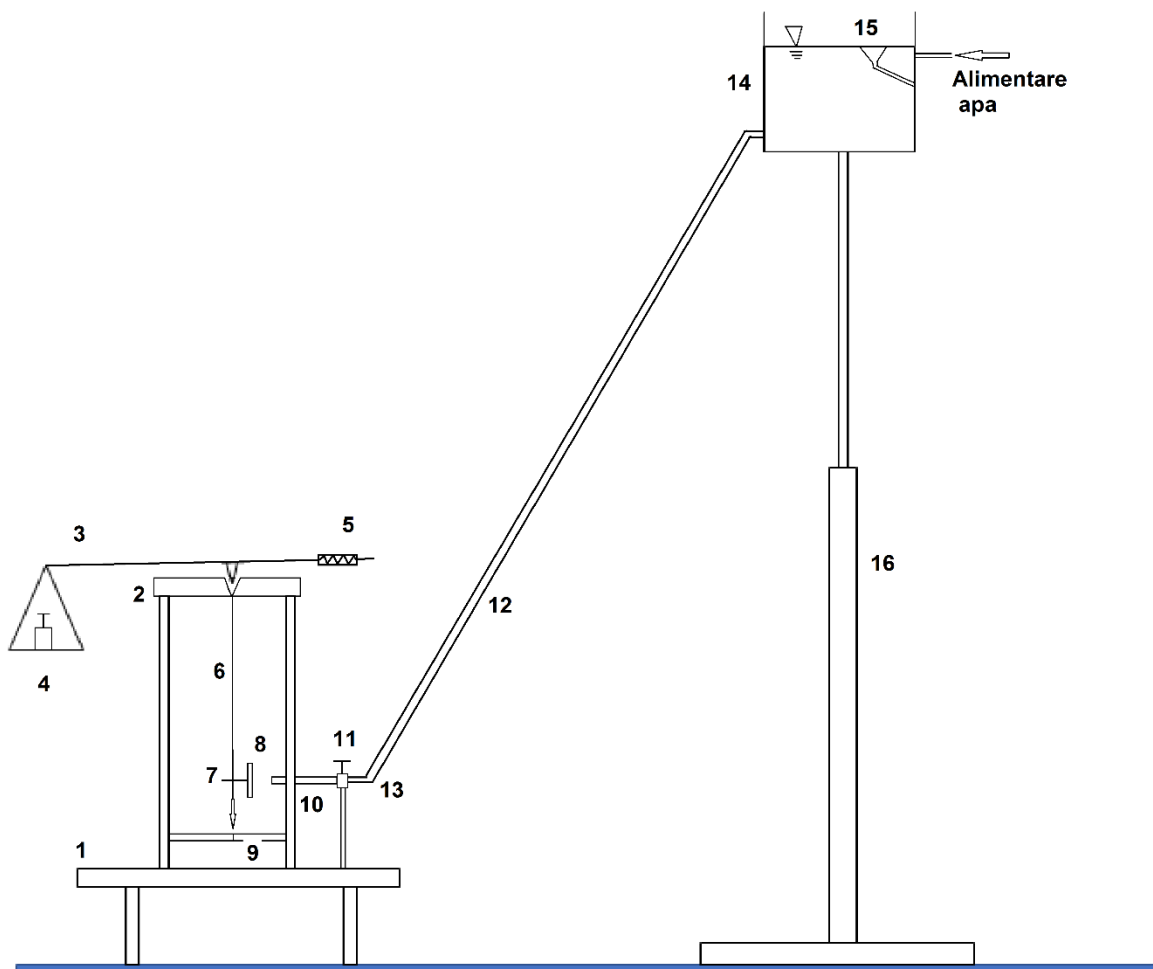


Fig. 1. Standul experimental



Dispozitivul pentru măsurarea forțelor de impuls (Fig. 1) se compune din:

1. suportul balanței
2. cadru
3. brațul balanței
4. platan pentru greutate
5. greutate pentru echilibrarea inițială a balanței
6. axul indicator
7. orificiul filetat practicat în axul vertical al balanței
8. disc de aluminiu cu diametrul de 70 mm., având în centru un șurub pentru fixare în orificiul filetat. Acest disc poate fi schimbat cu un altul din bronz, cu diametrul de 50 mm sau cu o calotă sferică;
9. plăcuța de plexiglas pe care s-a trasat reperul acului indicator
10. ajutoraj
11. șurubul de fixare a ajutorajului
12. tub de cauciuc care face legătura între rezervorul 14 și ajutoraj
13. robinet pentru reglarea debitului
14. rezervorul de alimentare a ajutorajului sub sarcina constantă
15. preaplin de menținere a nivelului constant în rezervorul de alimentare
16. suport telescopic pentru susținerea rezervorului 14.

### Breviar teoretic

Considerăm un jet de apă care cade perpendicular pe un perete plan (Fig. 2), jetul fiind deviat la  $90^\circ$ .

Aplicând teorema impulsului în regim permanent segmentului de lichid indicat prin linie întreruptă, vom putea scrie:

$$\bar{R} = \rho \cdot \dot{Q}_1 \cdot \bar{v}_1 + \rho \cdot \dot{Q}_2 \cdot \bar{v}_2 - \rho \cdot \dot{Q} \cdot \bar{v} \quad (1)$$

$\bar{R}$  fiind reacțiunea peretelui asupra segmentului de lichid considerat. Proiectând ecuația vectorială (1) pe direcția orizontală a vitezei  $\bar{v}$  (sensul lui  $\bar{v}$  fiind ales pozitiv), vom obține:

$$R = \rho \cdot \dot{Q} \cdot v \quad (2)$$

Reacțiunea R va avea același modul ca și acțiunea apei asupra peretelui (forța de impuls F), deci:

$$F = \rho \cdot \dot{Q} \cdot v = \rho \cdot (A \cdot v) \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 \quad (3)$$

S-a ținut seama de faptul ca debitul volumic al curentului este:

$$\dot{Q} = A \cdot v \quad (4)$$

“A” fiind secțiunea jetului la intrarea în segmentul de lichid considerat.

Dacă suprafața peretelui nu este suficient de mare în raport cu secțiunea jetului de apă, viteza apei la părăsirea peretelui va face un unghi  $\alpha < 90^\circ$  cu direcția sa inițială (Fig. 3).

---

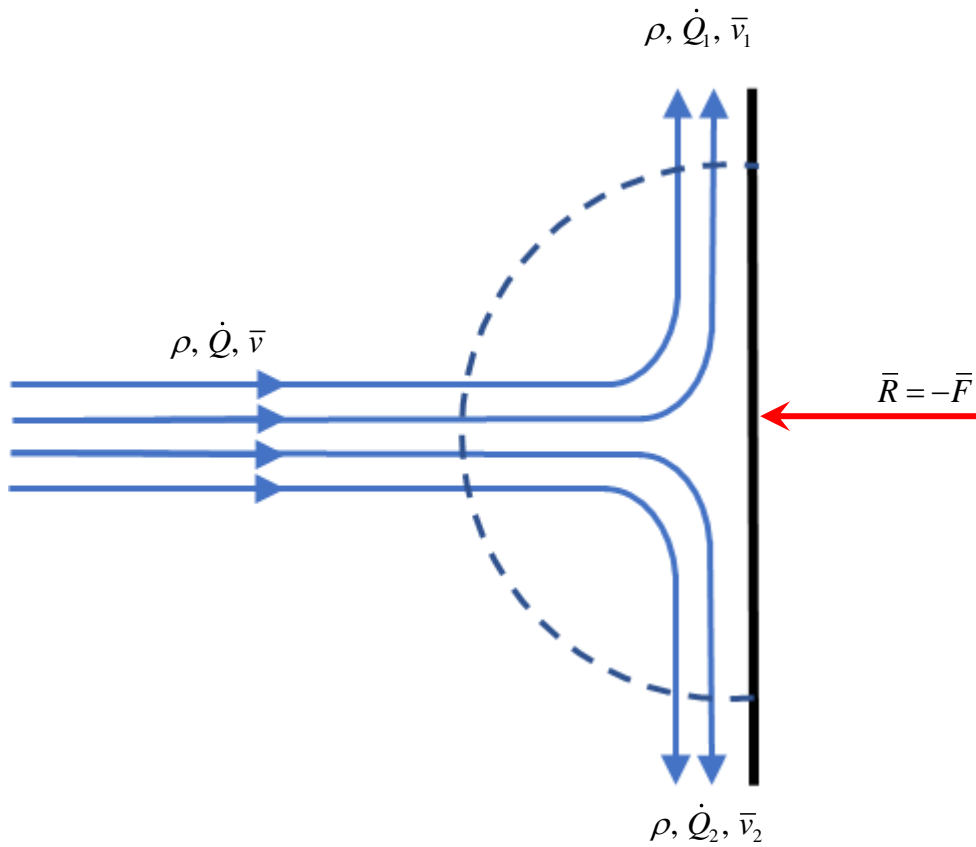


Fig. 2. Devierea cu un unghi de  $90^\circ$  a jetului de apă care cade perpendicular pe un perete plan

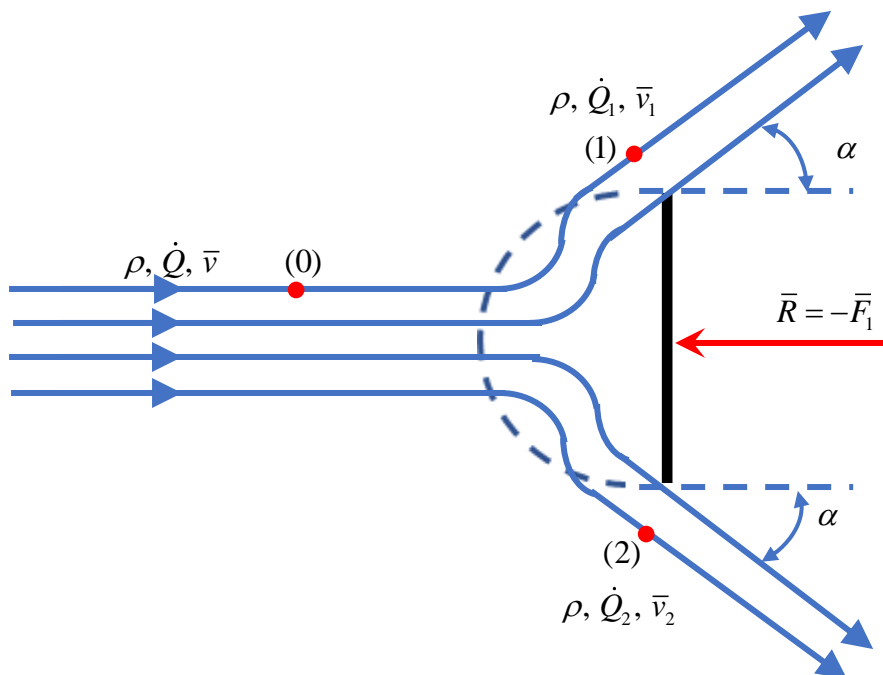


Fig. 3. Unghiul facut de jetul de apa la parasirea suprafetei peretelui cand aceasta nu este suficient de mare în raport cu secțiunea jetului de apă și direcția sa inițială

Scriind teorema impulsului pentru segmentul de lichid indicat cu linie întreruptă, în proiecție pe direcția și sensul vectorului  $\bar{v}$ , vom avea:

$$F_1 = \rho \cdot \dot{Q} \cdot v - \rho \cdot \dot{Q}_1 \cdot v_1 \cdot \cos(\alpha) - \rho \cdot \dot{Q}_2 \cdot v_2 \cdot \cos(\alpha) \quad (5)$$

Aplicând între punctele 0 și 1 ecuația lui Bernoulli cu neglijarea forțelor masice, ținând seama că  $p_1 = p_2 = p_0$  (presiunea atmosferică), rezultă:

$$v_1 = v \quad (6)$$

Tot astfel:

$$v_2 = v \quad (7)$$

Scriind teorema impulsului în proiecție pe direcția peretelui, se obține:

$$\dot{Q}_1 \cdot v_1 = \dot{Q}_2 \cdot v_2 \quad (8)$$

Cum  $v_1 = v_2 = v$ , iar  $\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = \dot{Q}$  (ecuația de continuitate), rezultă:

$$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = \frac{\dot{Q}}{2} \quad (9)$$

Ecuația (5) se poate scrie sub forma:

$$F_1 = \rho \cdot \dot{Q} \cdot v (1 - \cos(\alpha)) = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (1 - \cos(\alpha)) \quad (10)$$

Consideram o calotă sferică asupra căreia cade un jet de apă, conform Fig. 4.

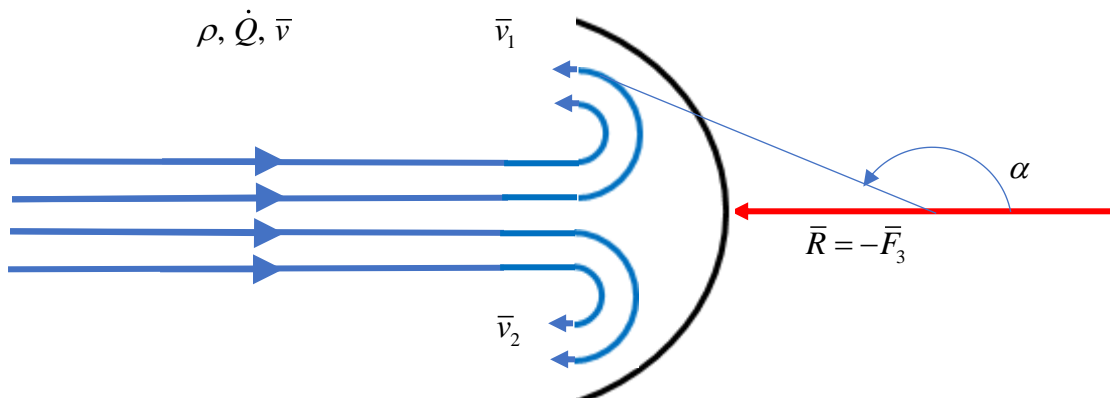


Fig. 4. Forța de impuls în cazul unei calote sferice

Procedând ca în cazul peretelui plan se obține relația:

$$F_2 = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (1 - \cos(\alpha)) \quad (11)$$

Teoretic  $\alpha = 180^\circ$ , deci forța de impuls ar fi în acest caz dublul forței F dată de relația (3). Practic vom constata că  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ .

### Efectuarea lucrării

Se montează mai întâi discul de aluminiu în orificiul filetat (7), echilibrând balanța cu ajutorul greutății (5). Se deschide robinetul (13) încât prin ajutorul (10) să treacă un anumit debit de lichid  $\dot{Q}$ . Balanța se va dezechilibra datorită forței de impuls a jetului care cade pe disc; ea se echilibrează punând greutăți pe platanul (4). Atunci când axul indicator al brațului balanței (6) și reperul de pe plăcuța de plexiglas (9) coincid, suma greutăților de pe platanul (4) va reprezenta tocmai mărimea forței de impuls a jetului.

Considerând că diametrul discului este suficient de mare încât lichidul să-l părăsească sub unghiul de  $90^\circ$  și cunoscând diametrul de ieșire al ajutorului,  $d = 5 \text{ mm.}$ , din relația (3) deducem expresia vitezei jetului la ieșirea din ajutor:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\rho A}} = \sqrt{\frac{4F}{\rho \pi d^2}} \quad (12)$$

forța F (forța de impuls) fiind măsurată cu ajutorul greutăților de pe platanul (4). Se înlocuiește apoi discul de aluminiu cu cel de bronz (mai mic), fără a modifica deschiderea robinetului (13).

Se echilibrează balanța cu greutatea (5), lăsând apoi jetul să cadă pe placa de bronz, măsurând similar forța de impuls  $F_1$ . Utilizând relația (10), vom putea determina unghiul  $\alpha$  sub care lichidul părăsește placa:

$$\cos(\alpha) = 1 - \frac{F_1}{\rho A v^2} = 1 - \frac{F_1}{F} \quad (13)$$

Se înlocuiește apoi discul de bronz cu calotă sferică, operațiile repetându-se, obținând mărimea forței de impuls  $F_2$ .

Din relația (11) rezultă unghiul sub care jetul este întors de către calotă;

$$\cos(\alpha) = 1 - \frac{F_2}{\rho A v^2} = \frac{F_2}{F} \quad (14)$$

Lucrarea se va efectua pentru 3 – 4 deschideri diferite ale robinetului (13), deci pentru 3 - 4 viteze de curgere ale jetului.

## STUDIUL HIDRODINAMICII CURGERII ÎN CONDUCTE SUB PRESIUNE

### Descrierea standului

Hidrodinamica reprezintă studiul curgerii fluidelor și este bazată pe legile de conservare aferente masei, cantității de mișcare și energiei. Studiul curgerii fluidelor în conductele sub presiune este una dintre aplicațiile de bază ale hidrodinamicii. În orice fluid în mișcare apare o disipație internă a energiei mecanice. Cantitatea de energie mecanică disipată, corespunzătoare unității de greutate de fluid care curge de la o secțiune la alta, reprezintă pierderea de sarcină hidraulică totală.

Legea energiilor aplicată între două secțiuni ale unei conducte circulare se numește relația lui Bernoulli generalizată. Relația lui Bernoulli este aplicată în cadrul diferitelor metode de măsurare a presiunii, vitezei și debitului printr-o conductă.

Standul SES 202 permite efectuarea următoarelor lucrări experimentale:

- Măsurarea presiunii dinamice cu ajutorul unui tub Pitot și a unei prize de presiune statică
- Măsurarea vitezei maxime într-o conductă cu ajutorul unui tub Pitot și a unei prize de presiune statică
- Verificarea relației de determinare a debitului sau a vitezei medii, pornind de la viteza maximă în conductă
- Calibrarea unei diafragme pentru măsurarea debitului
- Calibrarea unui ajutaj pentru măsurarea debitului
- Calibrarea unui tub Venturi pentru măsurarea debitului
- Determinarea coeficienților de pierdere uniform distribuită de sarcină pentru diferite tipuri de conducte
- Determinarea coeficienților de pierdere locală de sarcină pentru diferite singularități întâlnite în sistemele de conducte (cot, curbă, micșorare de secțiune, lărgire de secțiune)
- Determinarea pierderilor de presiune pentru o vană, în funcție de gradul de închidere al acesteia.

Schema standului experimental pentru studiul hidrodinamicii curgerii în conducte sub presiune este prezentată în figura 1. Semnificația componentelor standului din figura 1 este prezentată în tabelul 1.

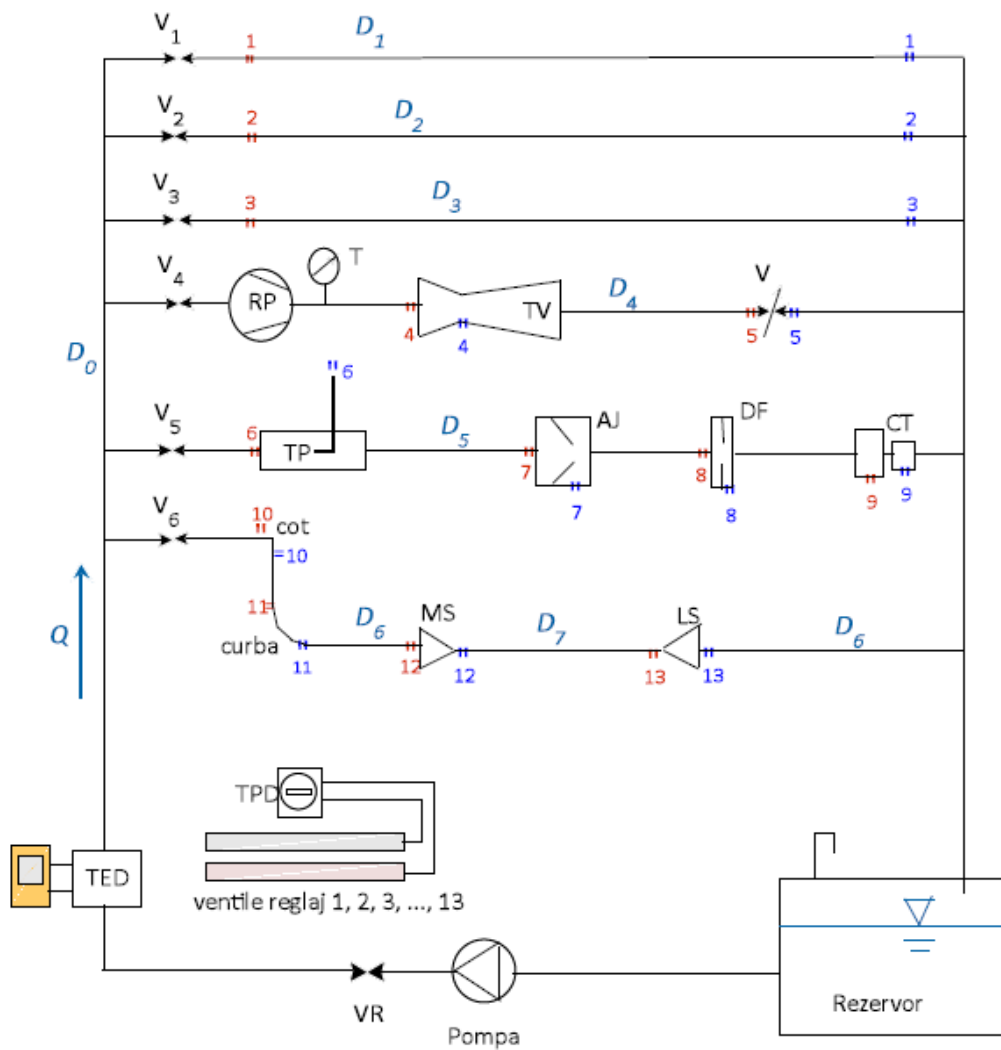


Figura 1 – Schema standului experimental SES 202 (vezi legenda din tabelul 1)

Simbol	Semnificație
$D_0, D_1 \div D_7$	diametrul conductelor: $D_0 = 28 \text{ mm}$ , din cupru $D_1 = 12,5 \text{ mm}$ (1/2"), din oțel galvanizat $D_2 = 18 \times 1 \text{ mm}$ , din cupru $D_3 = 20 \times 1,5 \text{ mm}$ , din PVC $D_4 = D_5 = 18 \text{ mm}$ $D_6 = 20 \text{ mm}$ , din cupru $D_7 = 16 \text{ mm}$ , din cupru

" 1, ..., " 13	prize de presiune amonte, racordate (prin spatele panoului) în amonte de ventilele de reglaj numerotate de la 1 la 13, conectate la TPD
" 1, ..., " 13	prize de presiune aval, racordate (prin spatele panoului) aval de ventilele de reglaj numerotate de la 1 la 13, care sunt conectate la TPD
AJ	ajutaj, cu diametrul secțiunii minime de 5 mm
CT	cameră toroidală
DF	diafragmă, cu diametrul orificiului de 11 mm
LS	lărgire bruscă de secțiune
MR	micșorare (îngustare) bruscă de secțiune
RP	regulator de presiune
T	termometru
TP	tub Pitot (sondă Pitot)
TV	tub Venturi, cu diametrul secțiunii minime de 5 mm
TED	traductor electromagnetic de debit cu afișaj digital
TPD	traductor de presiune diferențială
V	vană de reglaj cu indicarea gradului de închidere
$V_1 \div V_6$	vane de separație pe conducte
VR	vană de reglaj

Standul experimental pentru rețele de conducte este prezentat în figurile 2, 3 și 4. Semnificația componentelor standului din aceste figuri este prezentată în tabelul 1.



Figura 2 – Standul experimental SES 202 (vedere a întregului stand)



Figura 4 – Panoul de lucru al standului SES 202 (vedere dinspre dreapta)



## Breviar teoretic

Pentru o conductă circulară, **legea energiilor** sau **relația lui Bernoulli generalizată**, între secțiunea de intrare  $i$  și secțiunea de ieșire  $e$ , se scrie:

$$\frac{v_i^2}{2g} + \frac{p_i}{\rho g} + z_i = \frac{v_e^2}{2g} + \frac{p_e}{\rho g} + z_e + h_{ri-e} \quad (1)$$

unde  $v$  este viteza medie a fluidului în secțiune,  $p$  este presiunea,  $\rho$  este densitatea,  $g$  este accelerația gravitațională,  $z$  este cota, iar  $h_{ri-e}$  este pierderea de sarcină hidraulică totală între cele două secțiuni.

**Ecuția continuității** (care descrie conservarea masei) în cele două secțiuni se scrie:

$$v_i \frac{\pi D_i^2}{4} = v_e \frac{\pi D_e^2}{4} = \dot{Q}$$

unde  $\dot{Q}$  este debitul volumic prin conductă, iar  $D$  este diametrul conductei în secțiunea considerată.

Din punctul de vedere al mecanismului de disipare, **pierderea de sarcină hidraulică totală**  $h_r$  este suma dintre pierderile de sarcină uniform distribuite  $h_d$  datorate vâscozității fluidului și pierderile locale de sarcină  $h_l$  datorate neuniformităților care apar pe traseul fluidului aflat în mișcare.

**Pierderea distribuită (liniară) de sarcină hidraulică** reprezintă disipațiile energetice distribuite în lungul conductei, corespunzătoare unității de greutate. Este definită prin **relația lui Darcy**:

$$h_d = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = M_d \dot{Q}^2$$

unde  $M_d = 0,0826 \lambda L / D^5$  este **modulul de rezistență hidraulică distribuită**, măsurat în  $s^2/m^5$  (s-a notat cu  $L$  lungimea conductei, iar cu  $D$  diametrul acesteia). **Coefficientul lui Darcy**  $\lambda$  depinde în general de două variabile:  $\lambda = \lambda(Re, k / D)$ , unde  $Re$  este numărul lui Reynolds, iar  $k$  este rugozitatea absolută a conductei.

**Numărul Reynolds** este raportul dintre componenta convectivă a forțelor de inerție și forțele de vâscozitate. Pentru o conductă circulară, expresia sa este:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} = \frac{4\dot{Q}}{\pi D \nu}$$

în care  $\nu$  este vâscozitatea cinematică a fluidului.

**Numărul Reynolds limită inferior** caracterizează trecerea de la regimul de curgere turbulent neted în care  $\lambda = \lambda(Re)$ , la regimul turbulent prepătratic (turbulent mixt) în care

$\lambda = \lambda(\text{Re}, k/D)$ . Pentru conductele tehnice (cu rugozitate neomogenă), numărul Reynolds limită inferior se poate defini cu relația:  $\text{Re}_1 = 23D/k$ .

Numărul Reynolds limită superior caracterizează trecerea de la regimul de curgere turbulent prepătratic în care  $\lambda = \lambda(\text{Re}, k/D)$ , la regimul de curgere turbulent rugos în care  $\lambda = \lambda(k/D)$ .

Numărul Reynolds limită superior este definit prin relația:  $\text{Re}_2 = 560D/k$ .

Pierderea locală de sarcină hidraulică reprezintă disipația energetică locală corespunzătoare unității de greutate. Este definită prin relația:

$$h_l = \xi \frac{v^2}{2g} = M_l \dot{Q}^2$$

unde  $M_l = 0,0826 \xi / D^4$  este modulul de rezistență hidraulică locală, măsurat în  $\text{s}^2/\text{m}^5$ , iar  $\xi$  este coeficientul de pierdere locală de sarcină hidraulică – un coeficient care caracterizează diferitele singularități apărute pe traseul hidraulic (coturi, vane, îngustări sau evazări de secțiune etc).

Valorile sale sunt date sub formă de grafice, tabele sau formule, în funcție de tipul singularității și de caracteristicile geometrice ale conductei.

În cazul regimului laminar de curgere a unui fluid printr-o conductă circulară (pentru  $\text{Re} \leq 2000$ ), profilul de viteze în secțiunea longitudinală a conductei este parabolic, viteza maximă  $v_{\max}$  fiind în axa conductei. Viteza medie  $v$  a fluidului în conductă este egală cu jumătate din valoarea vitezei maxime:  $v/v_{\max} = 0,5$  conform problemei Hagen-Poiseuille.

În cazul regimului turbulent de curgere a unui fluid printr-o conductă circulară (pentru  $\text{Re} > 4000$ ), profilul de viteze în secțiunea longitudinală a conductei este aplatizat, variind brusc de la viteza nulă pe pereții conductei (datorită aderenței), până la un palier care tinde la valoarea vitezei maxime din axa conductei. Pentru conducte circulare netede din punct de vedere hidraulic, între viteza medie  $v$  și viteza maximă există următoarea dependență:

$$\frac{v}{v_{\max}} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)}$$

în funcție de numărul Reynolds, prin intermediul coeficientului  $n$ , ca în tabelul 2. Rezultă astfel variația raportului dintre viteza medie și viteza maximă:  $v/v_{\max} = 0,791 \div 0,866$  în funcție de  $\text{Re}$ .

Tabelul 2:  $n = n(\text{Re})$

Re	4000	23000	110000	1100000	3200000
n	6	6,6	7	8,8	10
$v/v_{\max}$	0,7912	0,8073	0,8167	0,8497	0,8658

### Aplicații ale relației lui Bernoulli

#### Măsurarea presiunii

Sonda Pitot (sau tubul Pitot) permite măsurarea presiunii totale într-un punct din domeniul de curgere. Axa sondei trebuie să fie paralelă cu direcția de curgere a fluidului. Centrul orificiului din vârful sondei Pitot este un punct de stagnare, notat cu T (în care viteza fluidului este nulă). Dacă se aplică relația lui Bernoulli (1) pe o linie de curent orizontală, între punctul de stagnare T și un punct situat în amonte, neglijând pierderile de sarcină dintre cele două puncte, rezultă:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \frac{p_T}{\rho}$$

de unde se obține presiunea totală în T:

$$p_T = p + \rho v^2 / 2$$

formată prin însumarea presiunii statice  $p$  și a termenului cinetic  $\rho v^2 / 2$ , denumit presiune dinamică. Deci presiunea dinamică este definită cu relația:

$$\Delta p_d = \rho v^2 / 2 = (p_T - p)$$

#### Măsurarea vitezei

Sonda Pitot-Prandtl (sau tubul Pitot-Prandtl) este o sondă dublă de presiune statică și totală, care permite măsurarea presiunii dinamice, adică a diferenței de presiune  $\Delta p_d$  egală cu termenul cinetic din relația (3). Axa sondei trebuie să fie paralelă cu direcția de curgere a fluidului.

În locul sondei Pitot-Prandtl se poate folosi (ca în cadrul standului experimental SES 202) o simplă sondă Pitot (pentru măsurarea presiunii totale) și o priză de presiune statică amplasată alături. Prin conectarea celor două prize de presiune (totală și statică) la un traductor de presiune diferențială (sau manometru diferențial), se obține direct presiunea dinamică  $\Delta p_d$ .

Viteza fluidului de densitate  $\rho$  se poate obține cu relația:

$$v = \sqrt{2(p_T - p) / \rho} = \sqrt{2\Delta p_d / \rho}$$

#### Curgerea prin orificii și ajutaje

Atât orificiile, cât și ajutajele fac parte din categoria sistemelor hidraulice locale, la care pierderile hidraulice locale de sarcină au un rol preponderent față de pierderile uniforme distribuite de sarcină.

Orificiile sunt deschideri practicate în pereții solizi ai instalațiilor hidraulice, prin care fluidul se scurge sub forma unei vene fluide. Principala caracteristică care apare la curgerea fluidelor prin orificii este fenomenul de contracție a venei de fluid. Imediat după ieșirea din orificiu, secțiunea transversală a venei de fluid are o arie mai mică decât secțiunea geometrică  $A$  aferentă orificiului (adică:  $A_c < A$ , unde s-a notat cu  $A_c$  aria secțiunii contractate). Contractia este un fenomen inerțial care se datorează spectrului convergent al liniilor de curent ce afluesc

---

către orificiu. Se definește **coeficientul de contracție**  $\varepsilon$  ca raportul dintre aria secțiunii contractate și aria geometrică a orificiului:  $\varepsilon = A_c / A < 1$ . Din punctul de vedere al calculului hidraulic, orificiile se împart în orificii mari și orificii mici. **Orificiile mici** sunt acele orificii la care viteza de curgere a fluidului se poate considera constantă pe întreaga secțiune a orificiului. Orificiile mari sunt acele orificii la care viteza de curgere a fluidului nu se poate considera constantă pe întreaga secțiune a orificiului.

**Ajutajele** sunt piese scurte montate imediat după orificii astfel încât vena de fluid să vină în contact cu pereții ajutajului, **împiedicând** astfel parțial apariția fenomenului de contracție.

### Calculul debitului printr-un orificiu mic

Pentru a calcula debitul care **trece** printr-un orificiu mic de arie  $A$ , se pleacă de la legea energiilor scrisă între o secțiune  $S_{am}$  situată în amonte de orificiu și secțiunea contractată  $S_c$  de arie  $A_c$  situată în aval de acesta:

$$\frac{\alpha_{am} v_{am}^2}{2g} + \left( \frac{p_{am}}{\rho g} + z_{am} \right) = \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} + \left( \frac{p_c}{\rho g} + z_c \right) + h_{r_{am-c}}$$

Unde  $\alpha$  este coeficientul lui Coriolis (un coeficient de neuniformitate a vitezelor în secțiunea de curgere; într-o conductă circulară,  $\alpha = 2$  pentru regimul de curgere laminar, respectiv  $1,05 \leq \alpha \leq 1,1$  pentru regimul de curgere turbulent).

Deoarece, cele două secțiuni sunt foarte apropiate, pierderea de sarcină poate fi considerată una locală cu coeficientul  $\xi_c$ , datorată contracției venei de fluid. De asemenea, se poate considera cu o bună aproximație că termenul cinetic în amonte de orificiu este neglijabil ( $v_{am} \ll v_c$ , ariile fiind  $A_{am} \gg A_c$ ). Cu acestea, relația energiilor se poate scrie:

$$H^* = (\alpha_c + \xi_c) \frac{v_c^2}{2g}$$

unde  $v_c$  este viteza fluidului în secțiunea contractată, iar

$H^* = (p_{am} / \rho g + z_{am}) - (p_c / \rho g + z_c)$  este **sarcina orificiului**, egală cu diferența de cotă piezometrică medie între secțiunile  $S_{am}$  și  $S_c$ .

Cu acestea, **debitul prin orificiu** devine:

$$\dot{Q} = v_c A_c = \frac{\varepsilon A}{\sqrt{\alpha_c + \xi_c}} \sqrt{2gH^*} = \mu A \sqrt{2gH^*}$$

unde  $\mu = \frac{\varepsilon}{\sqrt{\alpha_c + \xi_c}}$  este **coeficientul de debit al orificiului**.

În practică, valoarea coeficientului de debit se determină experimental pentru fiecare tip de orificiu. Valoarea coeficientului de debit al orificiului depinde de forma orificiului

(inclusiv de rugozitatea muchiiilor) și de numărul lui Reynolds. Pentru orificii practicate în pereții rezervoarelor, valoarea coeficientului de debit al orificiului crește cu creșterea numărului  $Re$  până în zona de curgere turbulent rugoasă, unde rămâne constantă. În general, pentru orificii uzuale practicate în pereții rezervoarelor, valorile coeficienților de debit variază între circa 0,5 și 0,63.

### Calculul debitului prin ajutaje și tuburi Venturi

Pentru a calcula debitul printr-un **ajutaj** convergent, sau printr-un **tub Venturi** (ajutaj convergentdivergent), montat pe un tronson de conductă, se pleacă de la legea energiilor scrisă între o secțiune  $S_{am}$  situată în amonte de ajutaj sau de tubul Venturi, respectiv secțiunea contractată  $S_c$  de arie  $A_c$ , situată imediat aval de secțiunea minimă de arie  $A$  a ajutajului sau a tubului Venturi.

Pierderea hidraulică de sarcină între cele două secțiuni este compusă din pierderea locală datorată contracției venei fluide în secțiunea  $S_c$ , pierderea locală datorată lărgirii bruște de secțiune a venei de fluid după contracție în cazul ajutajului convergent și pierderea uniform distribuită pe lungimea ajutajului sau tubului Venturi. **Sarcina ajutajului** sau **tubului Venturi**,  $H^*$ , este diferența de cotă piezometrică între secțiunile  $S_{am}$  și  $S_c$ . Adoptând aceleași considerente ca la calculul debitului prin orificii mici, se obține **formula debitului prin ajutaj sau prin tubul Venturi**:

$$\dot{Q} = \mu A \sqrt{2gH^*} \quad (6)$$

relație similară cu cea pentru calculul debitului prin orificiu (5), cu singura diferență că, în cazul ajutajelor/tuburilor Venturi, valoarea coeficientului de debit  $\mu$  este diferită. Valoarea coeficientului de debit pentru ajutaje și tuburi Venturi se determină experimental și depinde de forma ajutajului/tubului Venturi, de rugozitatea acestuia și de numărul Reynolds. Valoarea coeficientului de debit pentru ajutaje scade cu creșterea raportului și crește cu creșterea raportului  $A/A_{am}$  și crește cu creșterea numărului  $Re$  până în zona de curgere turbulent rugoasă, unde rămâne constantă [conform ISO 5167-1:2003]. Pentru standul SES 202, atât pentru ajutaj, cât și pentru tubul Venturi, raportul ariilor este:  $A/A_{am} = (5/18)^2 = 0,077$ . Pentru acest raport, valoarea **coeficientului de debit aferent ajutajului** variază de la  $\mu = 0,969$  pentru  $Re = 10^4$ , până la  $\mu = 0,995$  pentru  $Re = 10^7$ . Valoarea **coeficientului de debit aferent tubului Venturi** variază de la  $\mu = 0,957$  pentru  $Re = 10^4$ , până la  $\mu = 0,998$  pentru  $Re = 3 \cdot 10^5$ , apoi scade la  $\mu = 0,985$  pentru  $Re = 2 \cdot 10^6$ .

## Măsurarea debitului cu ajutorul diafragmei, ajutajului sau tubului Venturi

### Diafragme, ajutaje și tuburi Venturi pentru măsurarea debitului

**Diafragmele** sunt orificii practicate în plăci plane, care se montează transversal pe direcția principală de curgere, pe tronsoane rectilinii de conductă. Valoarea **coeficientului de debit al unei diafragme** scade cu creșterea numărului  $Re$  și crește cu creșterea raportului  $A/A_{am}$

---

, astfel:  $\mu = 0,594$  pentru  $Re = 10^6$  și  $A/A_{am} = 0,04$ , respectiv  $\mu = 0,734$  pentru  $Re = 10^4$  și  $A/A_{am} = 0,49$  [conform ISO 5167-1:2003].

Diafragma montată în cadrul standului SES 202 are raportul ariilor  $A/A_{am} = (11/18)^2 = 0,373$ .

Pentru acest raport, valoarea coeficientului de debit al diafragmei variază de la  $\mu = 0,675$  pentru  $Re = 10^4$ , până la  $\mu = 0,651$  pentru  $Re = 10^7$  [conform ISO 5167-1:2003].

Pornind de la relația de calcul a debitului prin orificii (5) sau ajutaje și tuburi Venturi (6), rezultă că pentru măsurarea debitului  $Q$  cu un astfel de dispozitiv, trebuie cunoscute cu precizie aria  $A$  (a secțiunii orificiului sau secțiunii minime a ajutajului/tubului Venturi), coeficientul de debit  $\mu$  al orificiului/ajutajului/tubului Venturi, precum și sarcina acestuia,  $H^*$ .

**Sarcina diafragmei**, respectiv **sarcina ajutajului/tubului Venturi**, se determină prin măsurarea simplă a diferenței de presiune  $\Delta p$ , între o secțiune din vecinătatea amonte a diafragmei/ajutajului/tubului Venturi și secțiunea contractată, dacă se cunoaște diferența dintre cotele celor două secțiuni. Dacă tronsonul de conductă pe care este amplasată diafragma/ajutajul/tubul Venturi de măsură este orizontal (ca în cazul standului SES 202), diferența de cote este nulă, iar pentru determinarea debitului este suficientă măsurarea diferenței de presiune cu un traductor diferențial. După determinarea sarcinii  $H^* = \Delta p = (p_{am} - p_c)$ , debitul  $Q$  se calculează cu formula corespunzătoare orificiului (5) sau ajutajului/tubul Venturi (6).

Trebuie menționat că astfel de dispozitive relativ simple pentru măsurarea debitului introduc pierderi de sarcină importante în sistemele de conducte. De asemenea, se subliniază că valoarea coeficientului de debit nu este constantă, ci variază cu numărul Reynolds.

## Măsurarea presiunii și a vitezei maxime într-o conductă cu ajutorul tubului Pitot sau ale unei prize de presiune statică

### Măsurarea presiunii dinamice cu ajutorul unui tub Pitot și a unei prize de presiune statică

Se efectuează **manevrele aferente vanelor de separație**, pentru a asigura circulația apei pe conducta pe care se află montat tubul Pitot (notat TP în figurile 1 și 3), astfel: se vor închide vanele de separație  $V_1 \div V_4$  și  $V_6$ , iar vana  $V_5$  va fi deschisă.

Se **deschide circuitul de măsură a presiunii**, corespunzător prizei de presiune statică  $p$  (priza 6 de culoare roșie în figura 1) și prizei de presiune totală  $p_T$  a tubului Pitot (priza 6 albastră în figura 1), prin acționarea (deschiderea) ventilelor de reglaj cu numărul 6, care sunt conectate la traductorul de presiune diferențială (TPD în figurile 1÷4). Toate celelalte ventile de reglaj (numerotate de la 1 la 5 și de la 7 la 13) vor fi închise.

Pentru diferite poziții ale vanei de reglaj VR (deci **pentru diferite valori ale debitului**), se achiziționează prin intermediul TPD **valorile corespunzătoare diferenței de presiune**  $\Delta p_d = (p_T - p)$ , care reprezintă **presiunea dinamică**.

Măsurarea vitezei maxime într-o conductă cu ajutorul unui tub Pitot și a unei prize de presiune statică

Se efectuează manevrele aferente vanelor de separație, pentru a asigura circulația apei pe conducta pe care se află montat tubul Pitot (notat TP în figurile 1 și 3), astfel: se vor închide vanele de separație V<sub>1</sub>÷V<sub>4</sub> și V<sub>6</sub>, iar vana V<sub>5</sub> va fi deschisă.

Se deschide circuitul de măsură a presiunii, corespunzător prizei de presiune statică  $p$  (priza 6 de culoare roșie în figura 1) și prizei de presiune totală  $p_T$  a tubului Pitot (priza 6 albastră în figura ), prin acționarea (deschiderea) ventilelor de reglaj cu numărul 6, care sunt conectate la traductorul de presiune diferențială (TPD în figurile 1÷4). Toate celelalte ventile de reglaj (numerotate de la 1 la 5 și de la 7 la 13) vor fi închise.

Pentru diferite poziții ale vanei de reglaj VR (deci pentru diferite valori ale debitului), se achiziționează prin intermediul TPD valorile corespunzătoare diferenței de presiune  $\Delta p_d$ . Conform relației (3), presiunea dinamică este:  $\Delta p_d = (p_T - p) = \rho v^2 / 2$ , unde  $v$  este viteza fluidului în punctul în care este poziționat tubul Pitot. În cadrul standului SES 202, tubul Pitot este plasat în axa conductei, unde viteza are valoare maximă. Deci viteza maximă se calculează cu relația:

$$v_{\max} = \sqrt{2\Delta p_d / \rho}$$

Verificarea relației de determinare a debitului sau a vitezei medii, pornind de la viteza maximă în conductă

Se efectuează manevrele aferente vanelor de separație, pentru a asigura circulația apei pe conducta pe care se află montat tubul Pitot (notat TP în figurile 1 și 3), astfel: se vor închide vanele de separație V<sub>1</sub>÷V<sub>4</sub> și V<sub>6</sub>, iar vana V<sub>5</sub> va fi deschisă.

Se deschide circuitul de măsură a presiunii, corespunzător prizei de presiune statică  $p$  (priza 6 de culoare roșie în figura 1) și prizei de presiune totală  $p_T$  a tubului Pitot (priza 6 albastră în figura 1), prin acționarea (deschiderea) ventilelor de reglaj cu numărul 6, care sunt conectate la traductorul de presiune diferențială (TPD în figurile 1÷4). Toate celelalte ventile de reglaj (numerotate de la 1 la 5 și de la 7 la 13) vor fi închise.

Pentru diferite poziții ale vanei de reglaj VR, se achiziționează prin intermediul TED valorile corespunzătoare debitului  $Q$ , respectiv se achiziționează prin intermediul TPD valorile corespunzătoare diferenței de presiune  $\Delta p_d = (p_T - p) = \rho v^2 / 2$ , unde  $v$  este viteza fluidului în punctul în care este poziționat tubul Pitot (anume în axa conductei, unde viteza are valoare maximă).

Viteza medie în conducta pe care se află montat tubul Pitot se calculează cu relația:

$$v = 4Q / (\pi D_5^2)$$

unde  $D_5 = 18 \cdot 10^{-3}$  m. Se calculează și numărul Reynolds:

$$Re = \frac{v D_5}{\nu}$$

în care vâscozitatea cinematică a apei este  $\nu \cong 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  la temperatura de  $20^\circ\text{C}$ . Se calculează apoi **raportul**  $\nu/\nu_{\max}$ , care trebuie să ia valori cuprinse în intervalul  $\nu/\nu_{\max} = 0.791 \div 0.866$ , în funcție de  $Re$ , conform tabelului 2.

#### Calibrarea unei diafragme pentru măsurarea debitului

Se efectuează **manevrele aferente vanelor de separație**, pentru a asigura circulația apei pe conducta pe care se află montată diafragma (notată DF în figurile 1, 3 și 4), astfel: se vor închide vanele de separație  $V_1 \div V_4$  și  $V_6$ , iar vana  $V_5$  va fi deschisă.

Se **deschide circuitul de măsură a presiunii**, corespunzător prizelor de presiune numerotate cu 8 (marcate cu roșu în amonte și albastru în aval, în figura 1), prin acționarea (deschiderea) ventilelor de reglaj cu numărul 8, care sunt conectate la traductorul de presiune diferențială (TPD în figurile 1÷4). Toate celelalte ventile de reglaj (numerotate de la 1 la 7 și de la 9 la 13) vor fi închise.

Pentru diferite poziții ale vanei de reglaj VR, se achiziționează prin intermediul TED **valorile corespunzătoare debitului**  $Q$ , respectiv se achiziționează prin intermediul TPD **valorile corespunzătoare diferenței de presiune**  $\Delta p$  între prizele 8 amonte și 8 aval.

**Sarcina diafragmei** este  $H^* = \Delta p / \rho g$ , conducta fiind orizontală. Cu aceasta, relația de determinare a debitului cu ajutorul diafragmei devine:

$$Q = \mu A \sqrt{2gH^*} = \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

Unde  $d = 11 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  este diametrul orificiului.

Se calculează **viteza medie** în conducta pe care se află montată diafragma:

$$v = \frac{4Q}{\pi D_5^2}$$

Unde  $d = 18 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , respectiv se calculează **numărul Reynolds**:

$$Re = \frac{vD_5}{\nu}$$

în care vâscozitatea cinematică a apei este  $\nu \cong 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  la temperatura de  $20^\circ\text{C}$ . Din relația (7) rezultă **valorile corespunzătoare coeficientului de debit al diafragmei**:

$$\mu = \frac{4Q}{\pi d^2} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta p}} \quad \square$$

Se trasează grafic variația  $\mu = \mu(Re)$ . Se compară rezultatele obținute cu valorile indicate de standardul ISO 5167-1:2003:  $\mu = 0,675 \div 0,651$ , pentru  $Re = 10^4 \div 10^7$ .

#### Calibrarea unui ajutoraj pentru măsurarea debitului

---



Se efectuează **manevrele aferente vanelor de separație**, pentru a asigura circulația apei pe conducta pe care se află montat ajutorul (notat AJ în figurile 1 și 3), astfel: se vor închide vanele de separație  $V_1 \div V_4$  și  $V_6$ , iar vana  $V_5$  va fi deschisă.

Se **deschide circuitul de măsură a presiunii**, corespunzător prizelor de presiune numerotate cu 7 (marcate cu roșu în amonte și albastru în aval, în figura 1), prin acționarea (deschiderea) ventilelor de reglaj cu numărul 7, care sunt conectate la traductorul de presiune diferențială (TPD în figurile 1÷4). Toate celelalte ventile de reglaj (numerotate de la 1 la 6 și de la 8 la 13) vor fi închise.

Pentru diferite poziții ale vanei de reglaj VR, se achiziționează prin intermediul TED **valorile corespunzătoare debitului**  $Q$ , respectiv se achiziționează prin intermediul TPD **valorile corespunzătoare diferenței de presiune**  $\Delta p$  între prizele 7 amonte și 7 aval.

**Sarcina ajutorului** este  $H^* = \frac{\Delta p}{\rho g}$ , conducta fiind orizontală. Cu aceasta, relația de determinare a debitului cu ajutorul ajutorului devine:

$$Q = \mu A \sqrt{2gH^*} = \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (8)$$

Unde  $d = 5 \cdot 10^{-3}$  m este diametrul minim al ajutorului (în partea din aval a ajutorului convergent).

Se calculează **viteza medie** în conducta pe care se află montat ajutorul:

$$v = \frac{4Q}{\pi D_5^2}$$

Unde  $D_5 = 18 \cdot 10^{-3}$  m, respectiv se calculează **numărul Reynolds**:

$$Re = \frac{vD_5}{\nu}$$

în care  $\nu \cong 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s pentru apă la 20°C.

Din relația (8) rezultă **valorile corespunzătoare coeficientului de debit al ajutorului**:

$$\mu = \frac{4Q}{\pi d^2} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta p}}$$

Se trasează grafic variația  $\mu = \mu(Re)$ . Se compară rezultatele obținute cu valorile indicate de standardul ISO 5167-1:2003:  $\mu = 0,969 \div 0,995$ , pentru  $Re = 10^4 \div 10^7$ .

#### Calibrarea unui tub Venturi pentru măsurarea debitului

Se efectuează **manevrele aferente vanelor de separație**, pentru a asigura circulația apei pe conducta pe care se află montat tubul Venturi (notat TV în figurile 1, 3 și 4), astfel: se vor închide vanele de separație  $V_1 \div V_3$ ,  $V_5$  și  $V_6$ , iar vana  $V_4$  va fi deschisă.

---

Se deschide circuitul de măsură a presiunii, corespunzător prizelor de presiune numerotate cu 4 (marcate cu roșu în amonte și albastru în aval, în figura 1), prin acționarea (deschiderea) ventilelor de reglaj cu numărul 4, care sunt conectate la traductorul de presiune diferențială (TPD în figurile 1÷4). Toate celelalte ventile de reglaj (numerotate de la 1 la 3 și de la 5 la 13) vor fi închise.

Pentru diferite poziții ale vanei de reglaj VR, se achiziționează prin intermediul TED valorile corespunzătoare debitului  $Q$ , respectiv se achiziționează prin intermediul TPD valorile corespunzătoare diferenței de presiune  $\Delta p$  între prizele 4 amonte și 4 aval (în secțiunea minimă a tubului Venturi).

Sarcina tubului Venturi este  $H^* = \frac{\Delta p}{\rho g}$ , conducta fiind orizontală. Cu aceasta, relația de determinarea a debitului cu ajutorul tubului Venturi devine:

$$\dot{Q} = \mu A \sqrt{2gH^*} = \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (9)$$

Unde  $d = 5 \cdot 10^{-3}$  m este diametrul minim al tubului Venturi.

Se calculează viteza medie în conducta pe care se află montat tubul Venturi:  $v = \frac{4Q}{\pi D_4^2}$

, unde  $D_4 = 18 \cdot 10^{-3}$  m, respectiv se calculează numărul Reynolds:  $Re = \frac{vD_4}{\nu}$ , în care

$\nu \cong 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$  pentru apă la 20°C.

Din relația (9) rezultă valorile corespunzătoare coeficientului de debit al tubului Venturi:

$$\mu = \frac{4Q}{\pi d^2} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta p}}$$

Se trasează grafic variația  $\mu = \mu(Re)$ . Se compară rezultatele obținute cu valorile indicate de standardul ISO 5167-1:2003, care variază de la  $\mu = 0.957$  pentru  $Re = 4 \cdot 10^4$ , până la  $\mu = 0.998$  pentru  $Re = 3 \cdot 10^5$ , apoi scade la  $\mu = 0.985$  pentru  $Re = 2 \cdot 10^6$ .

În cazul în care în tubul Venturi apare cavitația, pentru evitarea fenomenului se va micșora valoarea presiunii amonte cu ajutorul regulatorului de presiune RP, amplasat pe aceeași conductă.

### Determinarea coeficienților de pierdere uniform distribuită de sarcină pentru diferite tipuri de conducte

Se poate determina coeficientul de pierdere uniform distribuită de sarcină (coeficientul lui Darcy)  $\lambda$  pe 3 conducte orizontale, din materiale diferite și cu diametre diferite, definite în figura 1 astfel:  $D_1 = 12.5 \cdot 10^{-3}$  m (din oțel galvanizat);  $D_2 = 18 \cdot 10^{-3}$  m (din cupru);  $D_3 = 20 \cdot 10^{-3}$  m (din PVC).

Se asigură circulația apei numai pe conducta pe care se efectuează măsurătorile, astfel după caz, se vor închide toate vanele de separație, cu excepția uneia dintre vanele V<sub>1</sub>, V<sub>2</sub> sau V<sub>3</sub>, care va fi deschisă.

Se deschide circuitul de măsură a presiunii, corespunzător prizelor de presiune numerotate cu  $j$ , unde  $j = 1; 2$ ; sau  $3$  după caz (prizele de presiune sunt marcate cu roșu în amonte și albastru în aval, în figura 1), prin deschiderea ventilelor de reglaj cu numărul  $j$ , care sunt conectate la traductorul de presiune diferențială (TPD în figurile 1÷4). Toate celelalte ventile de reglaj vor fi închise.

Pentru diferite poziții ale vanei de reglaj VR, se achiziționează prin intermediul TED valorile corespunzătoare debitului  $Q$ , respectiv se achiziționează prin intermediul TPD valorile corespunzătoare diferenței de presiune  $\Delta p$  între prizele  $j$  amonte și  $j$  aval pe conducta cu diametrul  $D_j$  (cu  $j = 1; 2$ ; sau  $3$ ).

Pierderea distribuită de sarcină hidraulică între prizele  $j$  amonte și  $j$  aval pe conducta cu diametrul  $D_j$  este  $h_d = \frac{\Delta p}{\rho g}$ , de unde rezultă coeficientul lui Darcy:

$$\lambda = \frac{\Delta p / \rho \cdot g}{0,0826 \cdot L \cdot Q^2 / D^5}$$

Unde  $L = 1$  m (distanța dintre 2 prize de presiune consecutive numerotate cu  $j$ ).

Se calculează viteza medie în conducta studiată:

$$v = 4\dot{Q} / (\pi D_j^2), \text{ unde } j = 1; 2; \text{ sau } 3 \text{ după caz, respectiv se calculează numărul}$$

Reynolds:  $Re = v \cdot D_j / \nu$ , în care  $\nu \cong 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s pentru apă la 20°C.

Se trasează grafic dependentă  $\lambda = \lambda(Re)$ .

Se pot compara valorile obținute, cu valorile teoretice ale coeficientului lui Darcy, definite prin următoarele formule explicite:

- Formula lui Blasius :  $\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$ , pentru  $3500 < Re < Re_1 = 23D/k$  ;
- Formula lui Altsul :  $\lambda = 0.1 \left( \frac{68}{Re} + \frac{k}{D} \right)^{0.25}$ , pentru  $Re_1 \leq Re = Re_2$  ;
- Formula lui Prandtl-Nikuradse:  $\lambda = \left( 2 \lg \frac{D}{k} + 1.14 \right)^{-2}$ , pentru  $Re > Re_2 = 560D/k$ .

Nr. Crt.	Diametrul [m]	$\Delta p$ [N/m <sup>2</sup> ]	Q [m <sup>3</sup> /h]	$\lambda$

**Determinarea coeficienților de pierdere locală de sarcină pentru diferite singularități întâlnite în sistemele de conducte (cot, curbă, micșorare de secțiune, lărgire de secțiune)**

---

Se pot efectua determinări ale coeficienților de pierdere locală de sarcină  $\zeta$ , pentru următoarele elemente de instalații montate în cadrul standului SES 202: cot de 90° cu diametrul  $D_6 = 20 \cdot 10^{-3}$  m, curbă de 90° cu diametrul  $D_6 = 20 \cdot 10^{-3}$  m, micșorare bruscă de secțiune (MS) de la diametrul  $D_6 = 20 \cdot 10^{-3}$  m la diametrul  $D_7 = 16 \cdot 10^{-3}$  m, respectiv lărgire bruscă de secțiune (LS) de la diametrul  $D_7 = 16 \cdot 10^{-3}$  m la diametrul  $D_6 = 20 \cdot 10^{-3}$  m, vizibile în figurile 1 și 4.

Se asigură circulația apei pe conducta pe care se află singularitățile enumerate mai sus, astfel se vor închide vanele de separație  $V_1 \div V_5$ , iar vana  $V_6$  va fi deschisă.

Se **deschide circuitul de măsură a presiunii**, corespunzător prizelor de presiune numerotate cu  $j$ , unde  $j = 10 \div 13$  după caz (prizele de presiune sunt marcate cu roșu în amonte și albastru în aval, în figura 1, astfel:  $j = 10$  pentru cot,  $j = 11$  pentru curbă,  $j = 12$  pentru MS,  $j = 13$  pentru LS), prin deschiderea ventilelor de reglaj cu numărul  $j$ , care sunt conectate la traductorul de presiune diferențială (TPD în figurile 1÷4). Toate celelalte ventile de reglaj vor fi închise.

Pentru diferite poziții ale vanei de reglaj VR, se achiziționează prin intermediul TED **valorile corespunzătoare debitului  $Q$** , respectiv se achiziționează prin intermediul TPD **valorile corespunzătoare diferenței de presiune  $\Delta p$**  între prizele  $j$  amonte și  $j$  aval (cu  $j = 10 \div 13$  după caz).

**Pierderea locală de sarcină hidraulică** între prizele  $j$  amonte și  $j$  aval față de singularitatea  $j$  este  $h_l = \Delta p / \rho g$ , de unde rezultă **coeficientul de pierdere locală de sarcină**:

$$\zeta = \frac{\Delta p / \rho \cdot g}{0,0826 \cdot Q^2 / D^4}$$

unde  $D$  este diametrul din aval de singularitate, anume:  $D = D_6$  pentru cot, curbă și LS, respectiv  $D = D_7$  pentru MS. Pentru LS, ar trebui să rezulte  $\zeta = (D_7^2 / D_6^2 - 1)^2 \cong 0.13$  conform teoremei Borda-Carnot.

Se calculează **viteza medie** în aval de fiecare singularitate:  $v = 4Q / (\pi D^2)$ , după caz cu diametrul  $D$  indicat, respectiv se calculează **numărul Reynolds**:  $Re = vD / \nu$ , în care  $\nu \cong 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s pentru apă la 20°C. Se trasează grafic dependența  $\zeta = \zeta(Re)$ , pentru fiecare din cele 4 tipuri de singularități studiate.

**Determinarea pierderilor de presiune pentru o vană, în funcție de gradul de închidere al acesteia.**

Se asigură circulația apei pe conducta cu diametrul  $D_4$  pe care se află vana de reglaj cu indicarea gradului de închidere, notată  $V$  în figurile 1, 3 și 4, astfel: se vor închide vanele de separație  $V_1 \div V_3$ ,  $V_5$  și  $V_6$ , iar vana  $V_4$  va fi deschisă.

Se **deschide circuitul de măsură a presiunii**, corespunzător prizelor de presiune numerotate cu 5, (marcate cu roșu în amonte și albastru în aval, în figura 1), prin deschiderea ventilelor de reglaj cu numărul 5, care sunt conectate la traductorul de presiune diferențială (TPD în figurile 1÷4). Toate celelalte ventile de reglaj vor fi închise.

---

Cu vana de reglaj VR menținută în poziție complet deschisă și pentru diferite grade de închidere  $\beta$  ale vanei V studiate, se achiziționează prin intermediul TED valorile corespunzătoare debitului  $Q$ , respectiv se achiziționează prin intermediul TPD valorile corespunzătoare diferenței de presiune  $\Delta p$  între prizele 5 amonte și 5 aval aferente vanei V. Se reprezintă grafic dependența  $\Delta p = \Delta p(\beta)$ .

Pierderea locală de sarcină hidraulică între prizele 5 amonte și 5 aval aferente vanei V este  $h_l = \Delta p / \rho g$ , de unde rezultă coeficientul de pierdere locală de sarcină al vanei pentru fiecare grad de închidere  $\beta$ :

$$\zeta = \frac{\Delta p / \rho \cdot g}{0,0826 \cdot Q^2 / D_4^4}$$

Unde  $D_4 = 18 \cdot 10^{-3}$  m. Se trasează grafic dependența  $\zeta = \zeta(\beta)$ .

Se calculează viteza medie în conducta pe care este montată vana, pentru fiecare grad de închidere:  $v = 4Q / (\pi D_4^2)$ , respectiv se calculează numărul Reynolds:  $Re = v D_4 / \nu$ , în care  $\nu \cong 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s pentru apă la 20°C. Se trasează grafic dependența  $\zeta = \zeta(Re)$ .

## Măsurarea debitelor fluidelor cu ajutorul rotametrelor

### Descrierea standului

Rotametrele sunt debitmetre cu diferență constantă de presiune și plutitor rotativ. Sunt utilizate la măsurarea debitelor lichidelor și gazelor pe baza deplasării unui plutitor în interiorul unui tun tronconic gradat, dispus vertical, prin care circulă fluidul măsurat.

Rotametrele sunt caracterizate printr-o construcție simplă și ieftină, cu o pierdere mică de presiune, oferind posibilitatea măsurării debitelor lichidelor și gazelor. De asemenea, cu aceste aparate se pot măsura debite foarte mici, cu o eroare relativ constantă și scara gradată suficient de uniform.

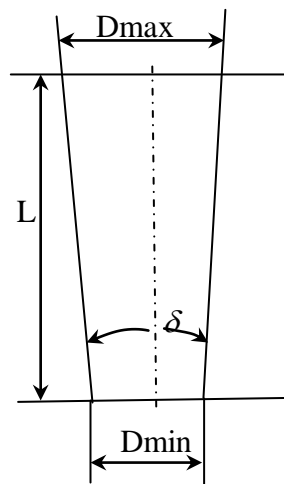


Fig. 1. Tubul tronconic al rotametruului

Elementele principale ale unui rotametrului :

**Tubul tronconic** este un tub calibrat conic (fig.1) dispus vertical, construit din sticlă sau metal. Tubul de sticlă este folosit în cazul rotametrelor cu plutitor vizibil, iar cel din metal este folosit în cazul aparatelor cu transmiterea indicațiilor la distanță.

În general conicitatea  $\frac{D_{\max} - D_{\min}}{L}$  a tuburilor rotametrelor este de 1/100, care corespunde la un unghi de  $35'$ , iar în unele cazuri conicitatea este 1/10, corespunzând la un unghi de  $5^{\circ}36'$ .

Limitele maxime admisibile de presiune și temperatură (în cazul tuburilor de sticlă) sunt  $5 \cdot 10^5$  [N/m<sup>2</sup>]; I respectiv 100°C.

**Plutitorul** este a doua parte componentă principală a rotametruului. Este dispus în interiorul tubului, având o formă cilindrică cu dimensiuni în trepte, de diferite diametre. Diametrul maxim al plutitorului trebuie să fie mai mic decât diametrul minim al tubului, el deplasându-se liber pe toată înălțimea tubului.

Greutatea plutitorului determină limita superioară de măsurare a aparatului.

Plutitoarele se execută din materiale feroase sau neferoase, ținând cont de natura fluidului măsurat, încât plutitorul să reziste acțiunii corozive a fluidului.

În principiu se folosesc materiale ca: oțel inoxidabil, plumb, aluminiu, bronz, mase plastice, etc.

Cele mai răspândite forme de plutitoare sunt redate în fig.2.

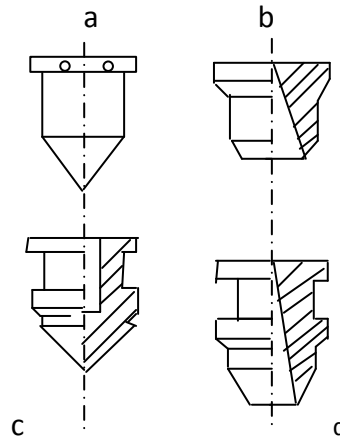


Fig. 2. Forme de plutitoare

**Plutitorul normal** (Fig. 2a.), folosit în cazul rotametrelor cu tub de sticlă, se execută plin sau gol în interior.

**Plutitorul ajutat** (Fig. 2b.), folosit atunci când debitul de fluid ce se măsoară este prea mare față de mărimea secțiunii de trecere dintre plutitor și tub.

**Plutitorul cu fascicol dublu** (Fig. 2c.), folosit în cazul curgerii turbulente a fluidului, având calitatea de a reveni pe axa de simetrie imediat după abaterea sa din această poziție.

**Plutitorul combinat** (Fig. 2d.) fiind o combinație între plutitorul ajutat și cel cu fascicol dublu.

La partea superioară plutitoarele au prevăzute niște fante sau șanțuri, care au rolul de a le imprima o mișcare de rotație și de a le menține astfel pe axa de simetrie a tubului.

În acest fel, mișcarea de rotație dispune plutitorul în centrul curentului, evitându-se atingerea peretelui tubului. În cazul rotametrelor de dimensiuni mari, când se folosesc plutitoare grele, dirijarea plutitorului se face prin intermediul unei tije de ghidare dispusă în axa tubului.

După cum se observă, în fig. 3, între plutitor și peretele interior al tubului de măsurare se formează un ajutor inelar prin care trece fluidul al cărui debit se măsoară.

Asupra plutitorului acționează o forță de sus în jos, echivalentă cu greutatea proprie a plutitorului :

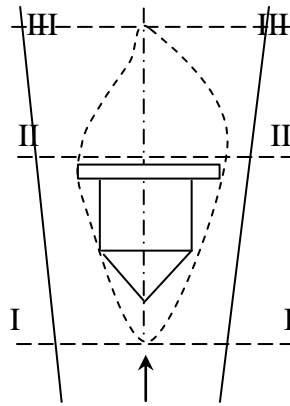


Fig. 3. Secțiunile de curgere ale rotametului

$$G_p = V_p \cdot g \cdot \rho_p \quad [\text{N}] \quad (1)$$

și o forță datorită presiunii curentului :

$$F_2' = p_2' \cdot S \quad [\text{N}] \quad (2)$$

De asemenea, acționează o forță de jos în sus, compusă din forța datorită acțiunii curentului:

$$F_1' = p_1' \cdot S \quad [\text{N}]; \quad (3)$$

Și forța de frecare a curentului de plutitor:

$$F_f = K \cdot W_a^n \cdot S_1 \quad [\text{N}]; \quad (4)$$

unde:

$G_p$  – greutatea plutitorului [N];

$V_p$  – volumul plutitorului [m<sup>3</sup>];

$\rho_p$  - densitatea materialului plutitorului [kg/m<sup>3</sup>];

$g$  – accelerația gravitațională [m/s<sup>2</sup>];

$p_1'$  – presiunea totală a curentului la baza plutitorului [N/m<sup>2</sup>];

$p_2'$  – presiunea totală medie a curentului la partea superioară a plutitorului [N/m<sup>2</sup>];

$S$  – secțiunea maximă a plutitorului, considerată perpendiculară pe axa sa de simetrie;

$S_1$  – suprafața laterală a plutitorului în frecare cu particulele de fluid;

$k$  - coeficientul de rezistență, depinzând de numărul adimensional Reynolds și de gradul de rugozitate al plutitorului;

$W_a$  – viteza medie a fluidului prin ajutorul inelar [m/s];

$n$  – exponent care depinde de mărimea vitezei.



Ecuția de echilibru a plutitorului are forma :

$$V_p \cdot g \cdot \rho_p + p_2' \cdot S = k \cdot W_a^n \cdot S_1 + p_1' \cdot S \quad (5)$$

din care :

$$p_1' - p_2' = \frac{V_p \cdot \rho_p \cdot g}{S} - \frac{k \cdot W_a^n \cdot S_1}{S} \quad (6)$$

Admițând că viteza  $W_a^n$  rămâne practic constantă pentru întreaga gamă a debitelor, rezultă că :

$$p_1' - p_2' = const.$$

Fapt pentru care rotametrele sunt denumite debitmetre cu diferența constantă de presiune (diferența presiunilor totale).

Pentru a determina diferența presiunilor statice ( $p_1 - p_2$ ), care acționează asupra plutitorului, se poate scrie ecuația:

$$p_1 - p_2 = (p_1' - p_2') - p_d; \quad (7)$$

unde:

$$p_d = \phi \cdot \rho \cdot \frac{W_1^2}{2}; \quad (8)$$

$p_d$  este valoarea presiunii dinamice, în care :

$\phi$  - coeficientul de rezistență, care depinde de forma plutitorului;

$W_1$  - viteza medie a curentului în secțiunea I-I (fig.3);

$\rho$  - densitatea fluidului de curgere prin rotametrul [kg/m<sup>3</sup>];

rezultă :

$$p_1 - p_2 = \frac{V_p \cdot \rho_p \cdot g}{S} - \frac{k \cdot W_a^n \cdot S_1}{S} - \phi \cdot \frac{\rho \cdot W_1^2}{2} \quad (9)$$

Se poate trage concluzia că, teoretic, această diferență tinde către zero, la viteze mari.

În calcule practice ecuația (9) se prezintă sub formă simplificată :

$$p_1 - p_2 = \frac{V_p \cdot g(\rho_p - \rho)}{S} = const. \quad (10)$$

unde,  $\rho_p$  și  $\rho$  sunt densitățile materialului plutitorului, respectiv a fluidului de măsurat.

Pentru a scrie ecuația debitului fluidului ce trece prin rotametrul trebuie dedusă dependența dintre debit, diferența de presiune și suprafața ajutorului inelar.

Scriind ecuația Bernoulli, în care două dintre secțiunile I-I și II-II din fig.3, rezultă:

$$p_{10} + k_1 \cdot \rho \frac{W_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_1 = p_{20} + k_2 \cdot \rho \frac{W_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_2 + \xi \cdot \rho \frac{W_2^2}{2} \quad (11)$$

în care :

$p_{10}, p_{20}$  – presiunile statice medii în secțiunile I-I și respectiv II-II;

$W_1, W_2$  – vitezele medii în secțiunile I-I și respective II-II;

$\xi$  - coeficientul de rezistență introdus de plutitor;

$z_1, z_2$  - cotele secțiunilor I-I și respectiv II-II, față de un plan de referință orizontal;

$k_1, k_2$  – coeficienții distribuției neuniforme a vitezelor în secțiunile I-I și respectiv II-II;

Scriind ecuația de continuitate se obține :

$$\overset{\circ}{V} = W_1 \cdot S_1 = W_2 \cdot S_2 = W_2 \cdot \mu \cdot S_a \quad (12)$$

unde :

$\mu$  - coeficient de ștrangulare a jetului;

$S_a$  – suprafața ajutorului inelar.

Combinând relațiile (11) și (12) se obține :

$$\overset{\circ}{V} = \alpha \cdot S_a \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{S} - 2g \cdot l} \quad (13)$$

în care :

$$\alpha = \frac{\mu \cdot \sqrt{\psi}}{\sqrt{k_2 + \xi - k_1 \mu^2 \left(\frac{S_a}{S_1}\right)^2}} ;$$

$$\psi = \frac{p_{10} - p_{20}}{p_1 - p_2} ;$$

$$1 = (z_1 - z_2) \cdot \frac{1}{\psi} \cong z_1 - z_2 ;$$

$\alpha$  - coeficient de debit ;

$P_1-P_2$  - diferența presiunilor statice ce acționează asupra plutitorului.

Expresia (13) este foarte apropiată de a debitmetrelor cu ștrangularea jetului de fluid, diferind prin termenul 2gl.

Substituind valoarea  $p_1-p_2$  din expresia (13) cu valoarea sa din expresia (9), rezultă pentru debit următoarea relație :

$$\overset{o}{V} = \alpha_1 \cdot S_a \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot V_p (\rho_p - \rho)}{\rho \cdot S}} \quad (14)$$

unde:

$$\alpha_1 = \alpha \sqrt{\frac{2g(V_p \cdot \rho_p - S \cdot l \cdot \rho) - F_f - p_d \cdot S}{2g \cdot V_p (\rho_p - \rho)}}$$

Coeficienții  $\alpha_1$  și  $\alpha$  vor fi dacă se neglijează forțele de frecare, presiunea dinamică a curentului și dacă se adoptă că :  $V_p \cdot \rho_p = S \cdot l \cdot \rho$ .

Pentru etalonarea aparatului interesează relația dintre debit și cursa plutitorului. Deoarece tubul are formă conică, suprafața ajutorului inelar se determină astfel :

$$S_a = \frac{\pi}{4} (D_0 + 2tg \frac{\delta}{2} \cdot h)^2 - S = f(h) \quad (15)$$

în care :

$\delta$  - unghiul tubului conic (în grade) ;

$D_0$  – diametrul interior al tubului la diviziunea zero (în metri);

$h$  – înălțimea de ridicare a plutitorului deasupra diviziunii zero

Substituind această expresie în relația (14), se obține :

$$\overset{o}{V} = \alpha_1 \cdot A \cdot f(h) \quad (16)$$

în care :

$$A = \sqrt{\frac{2g \cdot V_p (\rho_p - \rho)}{\rho \cdot S}}$$

Pe baza relației (16) se construiește un grafic al dependenței dintre  $\overset{\circ}{V}$  și h pentru un anumit fluid și un rotametru dat.

**Efectuarea lucrării**

- Determinarea coeficientului de debit  $\alpha_1$  al rotametrului
  - Se determină debitul de aer de măsurat printr-o altă metodă (se va folosi metoda tubului Venturi);
  - Se determină denivelarea h a rotametrului corespunzătoare debitului măsurat (se vor face minim trei măsurători);
  - Se calculează funcția :

$$f(h) = \frac{\pi}{4} (D_0 + 2tg \frac{\delta}{2} \cdot h)^2 - S , \text{ pe baza dimensiunilor geometrice ale plutitorului .}$$

- Se calculează termenul A :  $A = \sqrt{\frac{2g \cdot V_p (\rho_p - \rho)}{\rho \cdot S}}$
- Se calculează coeficientul de debit  $\alpha_1$  :  $\alpha_1 = \frac{\overset{\circ}{V}}{A \cdot f(h)}$

- Determinarea dependenței  $\overset{\circ}{V} = f(h)$

Se variază debitul măsurat în limitele înălțimii h, citite pe scara gradată și se calculează debitul  $\overset{\circ}{V}$  pentru diverse înălțimi h. În final se trasează graficul  $\overset{\circ}{V} = f(h)$ .

**Tabel de măsurători nr.1**

Nr. crt.	$\overset{\circ}{V}$ [m <sup>3</sup> /h]	h [m]	D <sub>0</sub> [m]	$\delta$ [°]	S [m <sup>2</sup> ]	f(h)	V <sub>p</sub> [m <sup>3</sup> ]	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	A	$\alpha_1$
1.											
2.											
3.											

**Tabel de măsurări nr.2**

Nr. crt.	h [m]	f(h)	A	$\overset{\circ}{V} = \alpha_1 \cdot A \cdot f(h)$
1.				
2.				
3.				
4.				

- se consideră  $\alpha_1(m) \cong 0.174$  .

Se trasează graficul  $h = f(\overset{\circ}{V})$ , figura 4, reprezentând curba de etalonare a rotametrului. Rotametrul asigură trei domenii de măsurare, prin schimbarea tubului conic și a plutitorului.

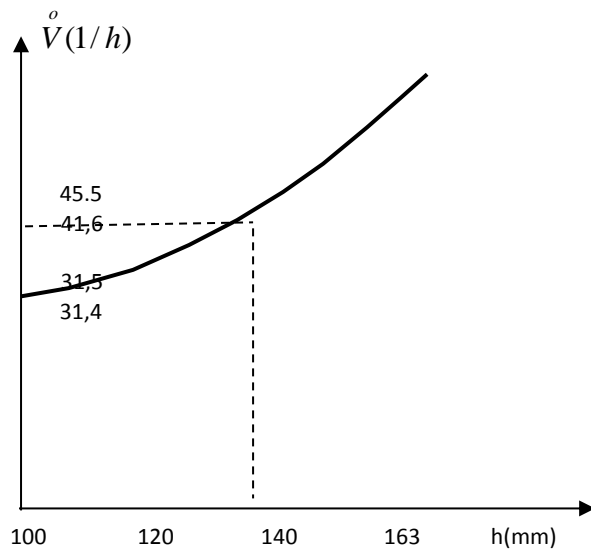


Fig. 4. Reprezentarea  $h = f(\dot{V})$

## STANDUL HELLE-SHAW PENTRU VIZUALIZAREA CURGERILOR POTENȚIALE

### Lista experimentelor:

Standul experimental SES113 permite:

- Vizualizarea liniilor de curent și a traiectoriei în curgerile laminare
- Vizualizarea mișcării laminare în jurul unui profil hidrodinamic
- Influența surselor și absorbțiilor asupra liniilor de curent
- Vizualizarea curgerii peste un cilindru
- Vizualizarea curgerii printr-o destindere bruscă
- Vizualizarea curgerii printr-o contracție bruscă

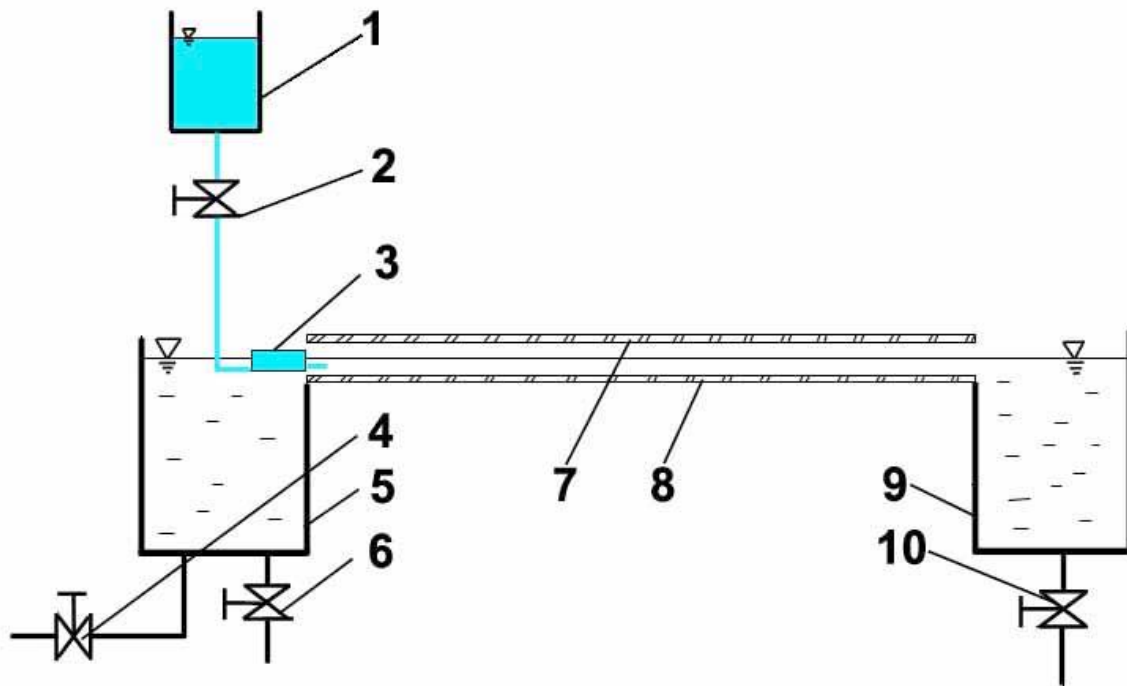
### Descrierea standului

#### Instalația experimentală

Instalația experimentală pentru vizualizarea curgerii laminare este de tipul Helle –Shaw, cu injecție de lichid colorat. Standul și reprezentarea sa schematică sunt redată în figurile 1a și 1b.



Fig. 1a. Instalație de vizualizare a curgerii potențiale



**Fig. 1b. Instalație de vizualizare a curgerii potențiale**

1 – rezervor pentru colorant; 2 – robinet cu cep sferic pentru alimentarea cu colorant; 4 – robinet cu cep sferic pentru alimentarea cu apă; 6, 10 – robinet cu bilă cep sferic pentru golire; 3 – distribuitor cu ace hipodermice; 5, 9 – rezervor pentru apă; 7 – placa de acril superioară rabatabilă; 8 – placa de acril inferioară fixă

Evident mișcarea va fi staționară, iar filamentele de lichid vor reprezenta atât liniile de curent cât și evoluția în timp a mișcării particulelor, adică traiectoria.

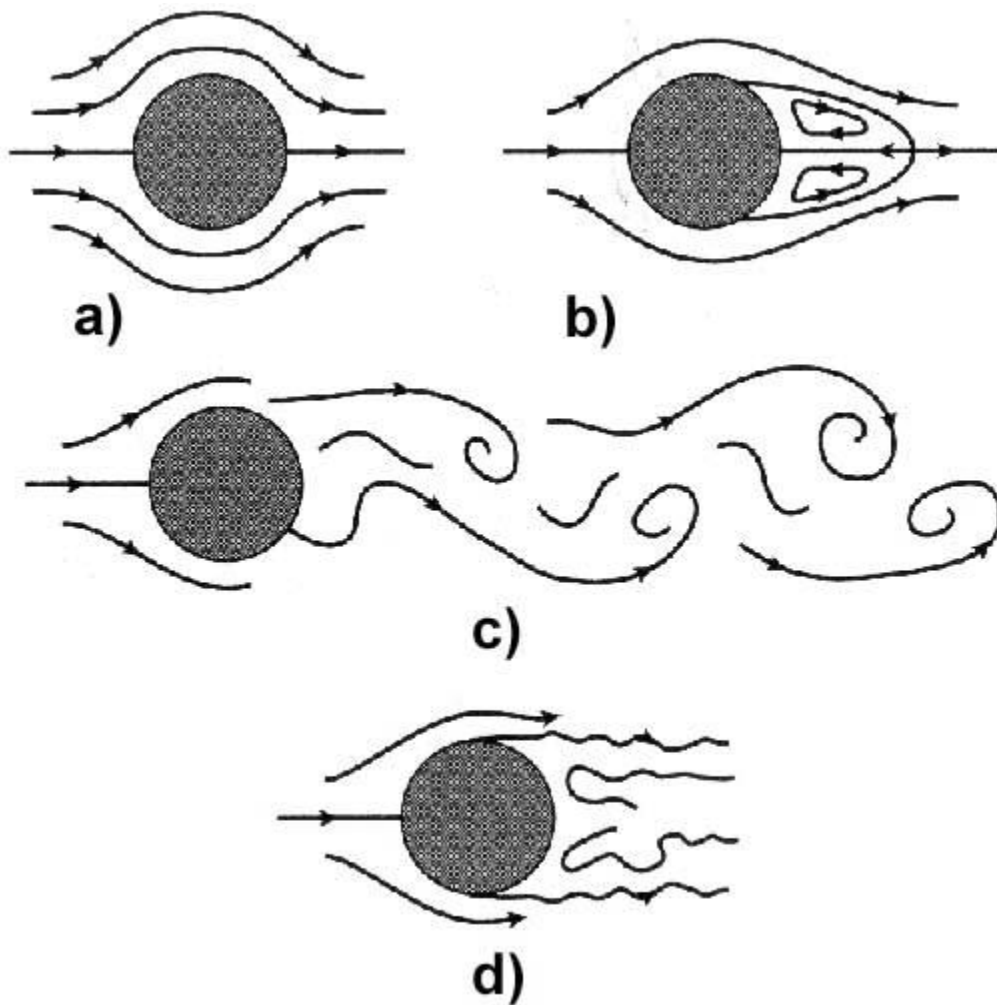
Standul este în circuit deschis, ceea ce presupune o reglare atentă a robinetelor cu cep sferic de alimentare (4) și a celui de ieșire (10), astfel încât între cele două plăci acrilice să se realizeze un nivel corespunzător (poate să fie unplut complet spațiul dintre ele) și o viteză de curgere de minim 25 mm/sec. Prin deschiderea robinetului 2, se va injecta prin intermediul acelor hipodermice lichidul colorat al cărui dozaj trebuie ales în așa fel ca între plăcile acrilice toate filamentele de lichid colorat să fie stabile.

### Simularea curgerii potențiale în jurul unor profile diferite

Standul are în dotare 3 tipuri de obstacole; un cilindru, un profil hidrodinamic, și o contracție bruscă, care poate fi folosită în sens de curgere invers ca și o contracție bruscă.

Obstacolele se introduc între plăcile instalației, după reglarea curgerii principale, dar înainte de pornirea filamentelor colorate. În cazul cilindrului și a contracției sau destinderii bruște se urmărește câmpul hidrodinamic bidimensional rezultat, la diverse viteze de curgere, se fotografiază fiecare situație și se interpretează imaginile.

De exemplu, la vizualizarea curgerii în jurul unui cilindru pot fi obținute situațiile redată schematic în figura 2.



**Fig. 2. Structura curgerii peste un cilindru circular drept**

a) - curgere fără separare; b) - curgere cu separare de vârtej staționar; c) - curgere cu separare de vârtejuri tip Karman; d) - curgere cu separare de strat limită laminar;

Vizualizarea mișcării laminare în jurul unui profil hidrodinamic urmărește determinarea spectrului mișcării pentru diferite unghiuri de incidență a curentului. Se vor alege 5 ... 7 valori ale acestui unghi, de la incidență nulă, până la prima valoare pozitivă la care apare desprinderea curentului și se formează pe extradossul profilului vârtejurile Karman. În figura 3 se prezintă schematic poziționarea profilului hidrodinamic în curent, iar în figura 5 o posibilă structură a curgerii fără desprinderi în jurul profilului.



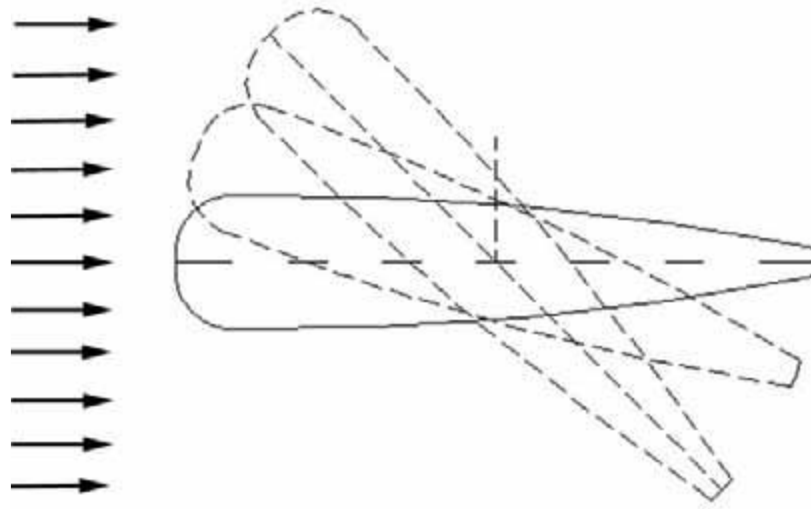


Fig. 3. Variante de poziționare a profilului hidrodinamic, în curent.

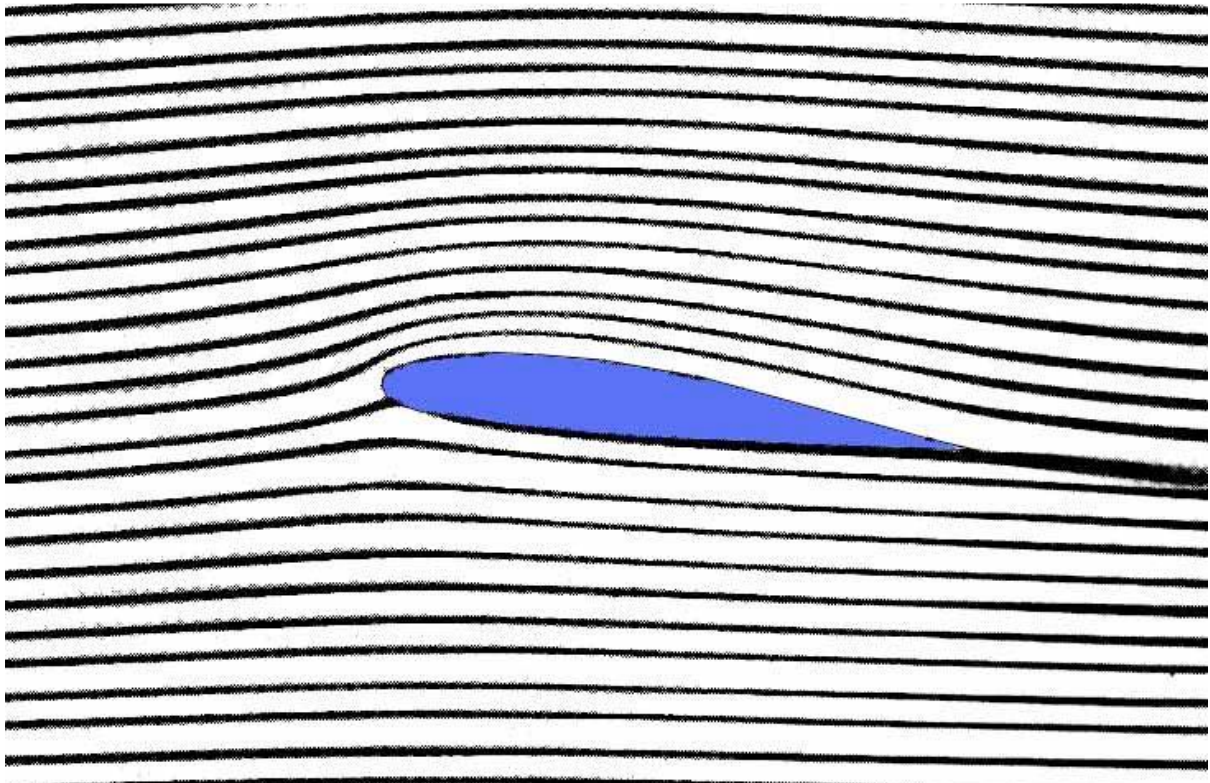


Fig. 4. Spectrul mișcării fără desprindere în jurul unui profil hidrodinamic

Se fotografiază fiecare situație și se interpretează imaginile.

Standul experimental ce permite studiul curgerii laminare se compune din:

- Două plăci de acril poziționate orizontal una deasupra celeilalte astfel încât să rămână între ele un spațiu de 100 mm. Plăcile vor avea dimensiunile de 900x500 mm
- Placa superioară se va putea ridica pentru a permite poziționarea corpurilor peste care se va studia curgerea în canalul de curgere

- Două rezervoare, unul la intrarea canalului format de cele două plăci de acril și celălalt la ieșirea acestui canal cu capacitatea de 30 l fiecare
- Vasul de la intrare va fi prevăzut cu un difuzor, iar cel de la ieșire cu un deversor pentru uniformizarea curgerii
- Un rezervor de 500 ml pentru colorantul ce ajută la vizualizarea liniilor de curent
- Un distribuitor conectat la rezervorul cu colorant și prevăzut cu ace hipodermice dispuse echidistant pentru injectarea colorantului în canalul de curgere este amplasat la intrarea acestuia
- Tronsoane de conductă care să asigure circulația apei în instalație
- O vană poziționată pe tronsonul de alimentare al vasului de la intrare și două vane pentru golirea rezervoarelor de la intrare și ieșire
- Corpuri peste care se va studia curgerea: un cilindru, un profil aerodinamic, o destindere bruscă, o contracție bruscă

### Considerații generale privind vizualizarea curgerilor

Vizualizarea curgerii este o ramură a hidrodinamicii experimentale care furnizează informații vizuale asupra fenomenelor de curgere. Metodele de vizualizare au fost de fapt primele tehnici experimentale folosite pentru înțelegerea fenomenelor din dinamica fluidelor. Vizualizarea curgerilor este folosită mai ales pentru evidențierea unor aspecte calitative ale fenomenelor specifice, concluzii cantitative pot fi obținute numai în urma unor experimente foarte îngrijit derulate.

Aplicațiile vizualizării curgerilor sunt curente în aerodinamică și hidraulică, fiind însă utile și în alte domenii cum ar fi meteorologia, oceanografia, domeniile biomedicale ale respirației pulmonare și ale curgerii sângelui, precum și în tehnologia produselor alimentare sau în metalurgie.

### Linii de curgere.

În cinematică există trei tipuri de linii ale curgerii care sunt evidențiate prin tehnicile de vizualizare. Acestea sunt denumite *linii de curent*, *traietorii* și *linii de filament*, în cazul general al unei curgeri nestaționare ele fiind diferite.

*Linii de curent* – sunt definite ca fiind acele linii care sunt tangente la un moment dat vectorilor vitează. Pentru curgerea nestaționară – la care vectorul vitezei într-un punct dat variază ca mărime și direcție cu timpul – este de înțeles să se considere numai liniile de curent instantanee.

Ecuțiile liniilor de curent se obțin din condiția de coliniaritate a vitezei cu elementul de linie de curent, unde într-un sistem triortogonal, viteza este  $\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}$ , iar elementul de linie este  $d\vec{l} = dx \vec{i} + dy \vec{j} + dz \vec{k}$ , ecuațiile scalare fiind:

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dy}{v_y} = \frac{dz}{v_z} \quad (2)$$

Integrarea acestor ecuații pentru un moment  $t$  fix va conduce la o ecuație de forma  $z = z(x, y)$  ceea ce este linia de curent căutată. Cea mai facilă metodă de rezolvare este de a obține ecuațiile parametrice ale curbei  $z = z(x, y)$  sub forma  $x = x(s)$ ,  $y = y(s)$  și  $z = z(s)$ , iar prin eliminarea parametrului  $s$  va rezulta ecuația liniei de curent.

Parametrul  $s$  are valoarea zero într-un punct de referință din spațiu, el crescând de-a lungul liniei de curent. În aceste condiții ecuațiile liniilor de curent devin:

$$\frac{dx}{v_x} = \frac{dy}{v_y} = \frac{dz}{v_z} = ds \quad (3)$$

Cele trei ecuații pot fi transcrise, într-o notare tensorială, sub forma:

$$\frac{du_i}{ds} = v_{ui}(x_i, t) \quad (4)$$

(adică  $u_1 = x, u_2 = y, u_3 = z$ ) în care apare explicit că dacă componentele vitezei sunt funcție de timp atunci linia de curent instantanee se obține pentru o valoare fixă a lui  $t$ . Dacă se cere linia de curent ce trece prin punctul  $(x_0, y_0, z_0)$  se va integra ecuația (4) pentru condițiile inițiale  $s = 0, x = x_0, y = y_0, z = z_0$ . Rezultatul apare sub forma unui set de ecuații de forma:

$$u_i = u_i(x_0, y_0, z_0, t, s) \quad (5)$$

unde pentru valori ale lui  $s$  din domeniul real se obține linia de curent căutată.

De exemplu, să se determine rețeaua de linii de curent pentru o mișcare bidimensională, în planul  $Oxy$ , definită de:

$$v_x = x(1 + 2t), v_y = y, v_z = 0 \quad (6)$$

folosind exprimarea (4), ecuațiile liniilor de curent în planul  $Oxy$ , vor fi:

$$\frac{dx}{ds} = x(1 + 2t), \frac{dy}{ds} = y$$

prin integrarea acestor ecuații rezultă:

$$x = C_1 e^{(1+2t)s}$$

care sunt ecuațiile parametrice ale liniilor de curent în plan. Pentru particularizare să presupunem că liniile de curent trec prin punctul  $(1,1)$ . Condițiile inițiale sunt  $s = 0, x = 1$  și  $y = 1$ , ceea ce conduce la  $C_1 = C_2 = 1$ . Ecuațiile parametrice ale liniilor de curent care trec prin punctul  $(1,1)$  sunt:

$$x = e^{(1+2t)s}, y = e^s$$

Se observă că liniile de curent se vor schimba cu  $t$  (timpul), la momentul  $t = 0$ , linia de curent ce trece prin punctul  $(1,1)$  va fi dată de ecuațiile:

$$x = e^s, y = e^s$$

adică:

---

$$x = y$$

Reprezentarea grafică a acestei ecuații este redată în figura 1, alături de celelalte linii caracteristice curgerii.

**Traietoriile.** Traietoria este materializarea drumului parcurs în timp de centrul de masă al particulei fluide. În timp ce linia de curent este, așa cum s-a arătat, o curbă instantanee (la un moment dat), prin fiecare punct al unui domeniu de curgere trecând numai o singură linie de curent, traietoria descrie evoluția în timp a pozițiilor particulei fluide, ea fiind de asemenea tangentă vectorilor viteză. Ecuațiile traietoriilor vor satisface sistemul:

$$\frac{du_i}{dt} = v_{ui}(x_i, t) \quad (7)$$

Pentru condițiile inițiale, la momentul  $t = 0$  și  $x = x_0$ ,  $y = y_0$  și  $z = z_0$ , soluția a sistemului (7) se prezintă sub forma unui set de ecuații de forma:

$$u_i = u_i(x_0, y_0, z_0, t) \quad (8)$$

care pentru toate valorile pozitive posibile ale lui  $t$ , va oferi traietoria căutată.

**De exemplu**, pentru mișcarea plană, descrisă de sistemul (6), ecuația traietoriei se obține considerând:

$$\frac{dx}{dt} = x(1 + 2t), \quad \frac{dy}{dt} = y$$

Prin integrare se obține:

$$x = C_1 e^{t(1+t)}, \quad C_2 = y$$

care sunt ecuațiile parametrice ale tuturor traietoriilor din planul  $Oxy$ , în cazul mișcării plane considerate (6). Dacă traietoria particulei trece prin punctul (1,1), la  $t = 0$ , ecuațiile parametrice devin:

$$x = e^{t(1+t)}, \quad y = e^t$$

iar prin eliminarea timpului  $t$  rezultă ecuația liniei de curent sub forma:

$$x = y^{1+\ln y}$$

Reprezentarea grafică a acestei traietorii este redată tot în figura 6.4. Se observă că traietoria care trece prin punctul (1,1) la nu coincide cu linia de curent a particulei ce trece prin același punct la același moment.

**Linii de filament (marcaj).** O linie de filament (sau de marcaj) este obținută de un indicator (marker) introdus continuu dintr-un punct fix, într-un fluid în mișcare. Indicatorul poate fi, de exemplu, fum pentru gaze sau vopsea pentru lichide.

---

O particulă a markerului care se află în poziția  $(x, y, z)$  la momentul  $t$  trebuie să depășească punctul de injecție  $(x_0, y_0, z_0)$  la un moment anterior  $t = \tau$ . Istoria în timp a mișcării acestei particule se poate determina rezolvând ecuațiile (7) pentru linia de curent, considerând condițiile inițiale  $x = x_0, y = y_0, z = z_0$  la  $t = \tau$ . Când  $\tau$  ia toate valorile posibile în intervalul  $-\infty \leq \tau \leq t$  se va obține poziția tuturor particulelor liniei de filament (marcaj). Prin rezolvarea ecuațiilor (7), va rezulta o expresie de forma:

$$u_i = u_i(x_0, y_0, z_0, t, \tau) \quad (9)$$

cu care, pentru  $\tau \leq t$  se poate obține poziția instantanee a liniei de filament (marcaj).

Pentru mișcarea anterior considerată (6), ecuațiile care trebuie să fie soluționate pentru linia de filament (marcaj) sunt:

$$\frac{dx}{dt} = x(1 + 2t), \quad \frac{dy}{dt} = y$$

care prin integrare conduc la:

$$x = C_1 e^{t(1+t)}, \quad C_2 = y$$

Folosind condițiile inițiale: la  $t = \tau$  se obțin relațiile:

$$x = e^{t(1+t) - \tau(1+\tau)}, \quad y = e^{t-\tau}$$

care reprezintă ecuațiile parametrice corespunzătoare liniei de filament care trece prin punctul (1,1) și sunt valabile pentru toate valorile posibile ale timpului  $t$ . În particular, la  $t = 0$  ecuațiile devin:

$$x = e^{-t(1+\tau)}, \quad y = e^{-\tau}$$

Prin eliminarea lui  $\tau$ , ecuația liniei de curent care trece prin punctul (1,1) la momentul  $t = 0$  este:

$$x = y^{1 - \ln y}$$

fiind reprezentată în figura 5. Deși toate cele trei linii sunt caracteristice aceleiași curgeri, așa cum rezultă din figură, ele nu coincid.

*În cazul particular al mișcării permanente se obține coincidența acestor linii.*

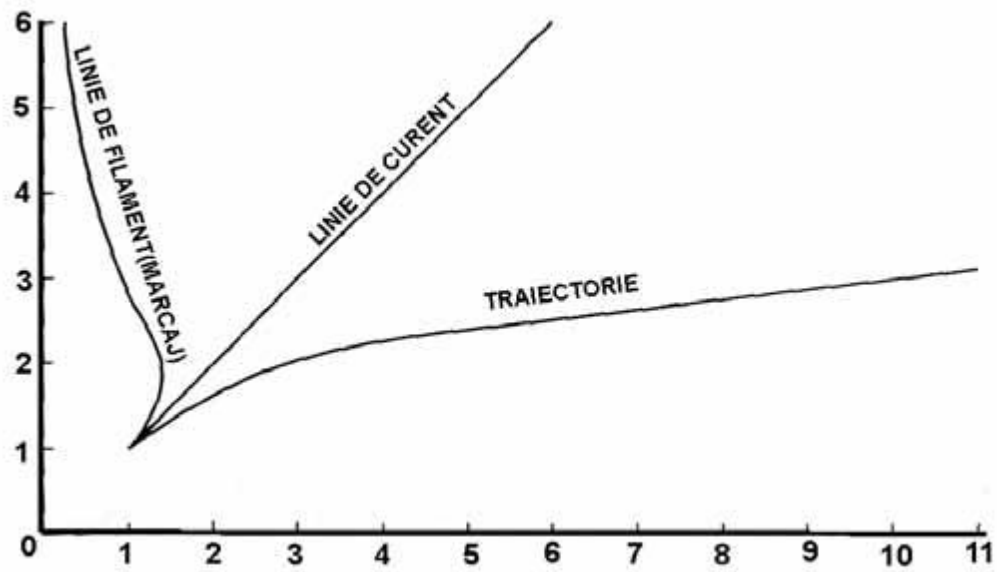


Fig. 5. Comparație între liniile de curgere, linia de curent, traiectoria și linia de filament, care la  $t = 0$  trec prin punctul (1,1)

## STUDIUL FENOMENULUI LOVITURII DE BERBEC

### Descrierea standului

Standul este construit pe un cadru mobil. Conducta pe care se face studiul este amplasată pe un cadru, iar din motive legate de economia de spațiu, este dispusă în formă de spirală. Pentru închiderea bruscă a conductei se utilizează vane cu acționare electrică. Un rezervor sub presiune cu pernă de aer care permite obținerea unei reflexii clare a undei de presiune.

Traductorul de presiune masoară variația presiunii și o transformă într-un semnal electric. Standul are posibilitatea conectării unui osciloscop în vederea vizualizării evoluției undei de șoc și evaluării timpilor de reflexivitate ai undei de presiune și timpilor de închidere ai vanei acționate electric.

Standul experimental SES 206 schematizat în figura 1, respectiv prezentat în figura 2, este format din următoarele componente:

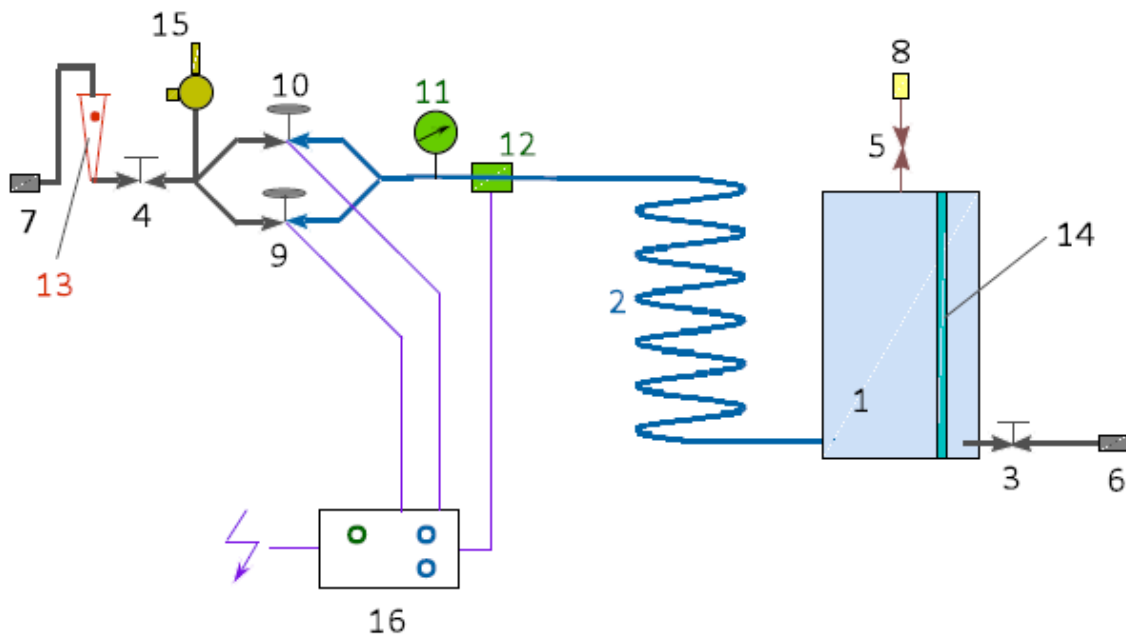


Figura 1 – Schema standului experimental SES 206

1. Rezervor cu pernă de aer
2. Spirală din țevă de cupru cu diametrul interior 10 mm și lungime totală 60 m
3. Robinet pentru alimentare
4. Vană de reglaj a debitului, amplasată în aval
5. Robinet de aerisire
6. Racord pentru alimentare
7. Racord pentru evacuare
8. Racord pentru aerisire
9. Electroventil cu închidere rapidă (timp de închidere constant 20...30 ms)

10. Electroventil cu închidere lentă (timp de închidere reglabil 0,1...3 s)
11. Manovacuummetru
12. Traductor de presiune
13. Rotametrul
14. Indicator de nivel

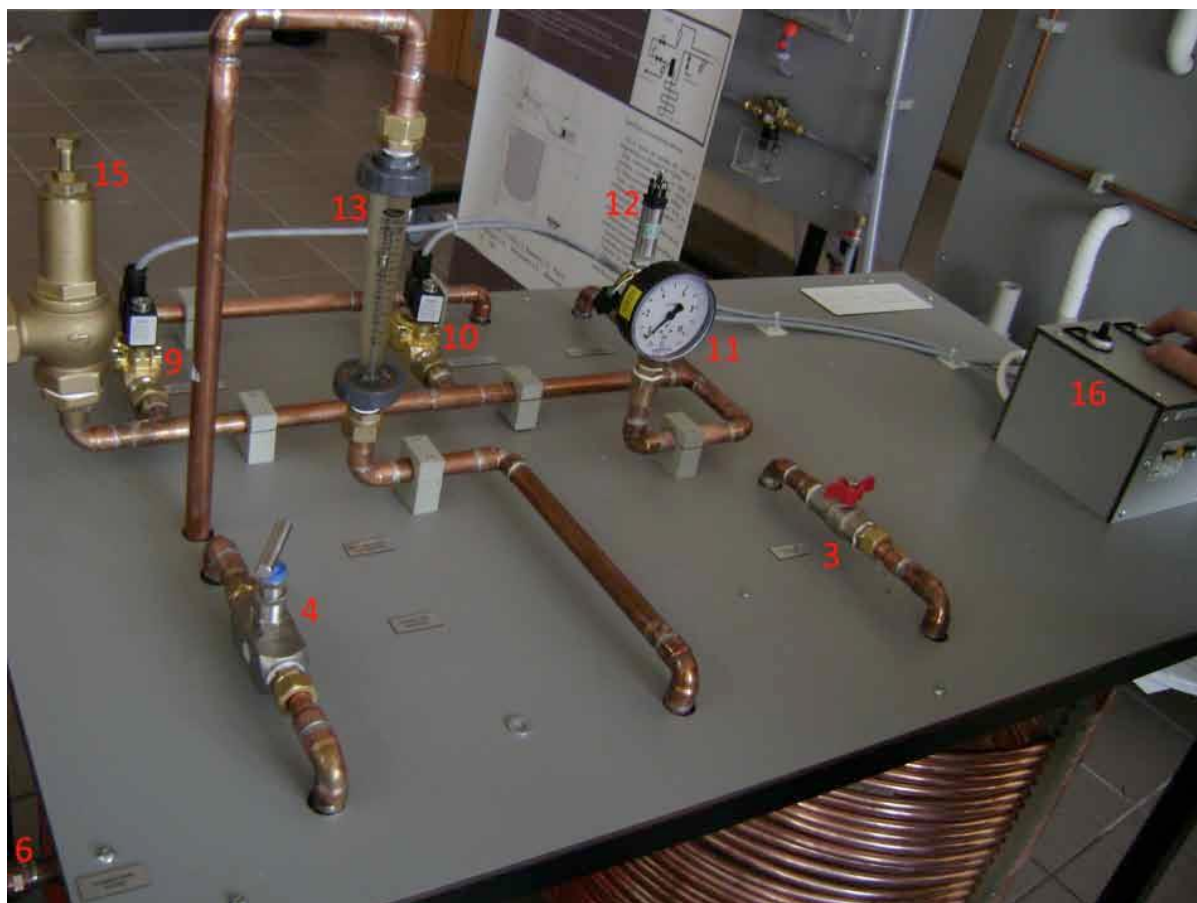


Figura 2. Standul experimental SES 206 pentru studiul fenomenului de lovitură de berbec

Lista experimentelor

Standul experimental SES 206 permite:

- Familiarizarea studenților cu fenomenul loviturii de berbec, care apare în conducte sub presiune la închiderea bruscă a unei vane;
- Calculul celerității în conducte;
- Determinarea timpului de reflexie a undelor de presiune în conducte;
- Vizualizarea și determinarea variațiilor de presiune în conducten în cazul apariției fenomenului de lovitură de berbec;
- Studiul apariției fenomenului de lovitură de berbec în funcție de timpul de închidere al vanei;
- Studiul dependenței valorilor presiunii înregistrate la apariția fenomenului de lovitură de berbec, în funcție de debitul stabilit prin conductă la regim permanent de curgere;
- Modificarea legii de închidere a vanei astfel încât fenomenul de lovitură de berbec să fie evitat.



## Studiul experimental al fenomenului loviturii de berbec în instalații

### 1. Descrierea fenomenului

Lovitura de berbec este un fenomen de mișcare variabilă a fluidului, caracterizat prin apariția și propagarea sub formă de unde a unor variații mari de presiune. El apare ca rezultat al manipulării organelor de închidere sau schimbarea parametrilor de funcționare a pompelor.

Se consideră instalația din (Fig.1) în care pompa P aspiră apă din rezervorul (tancul) T1 și o refulază în rezervorul (tancul) T2. Valvele V1 și V2 permit izolarea pompei. A fost instalată o ramificație pe care s-a montat tancul de amortizare a loviturii de berbec H ce poate fi izolat cu valva V3. La intrarea în rezervorul T2 a fost montată o valvă de izolare V4. Dacă la un moment dat se închide brusc valva V4, se produce mai întâi o suprapresiune urmată de o subpresiune și apoi de o serie de suprapresiuni și subpresiuni care se propagă în lungul tubulaturii până la pompă acționând ca niște lovituri puternice în instalație. Același fenomen apare și la oprirea bruscă a pompei.

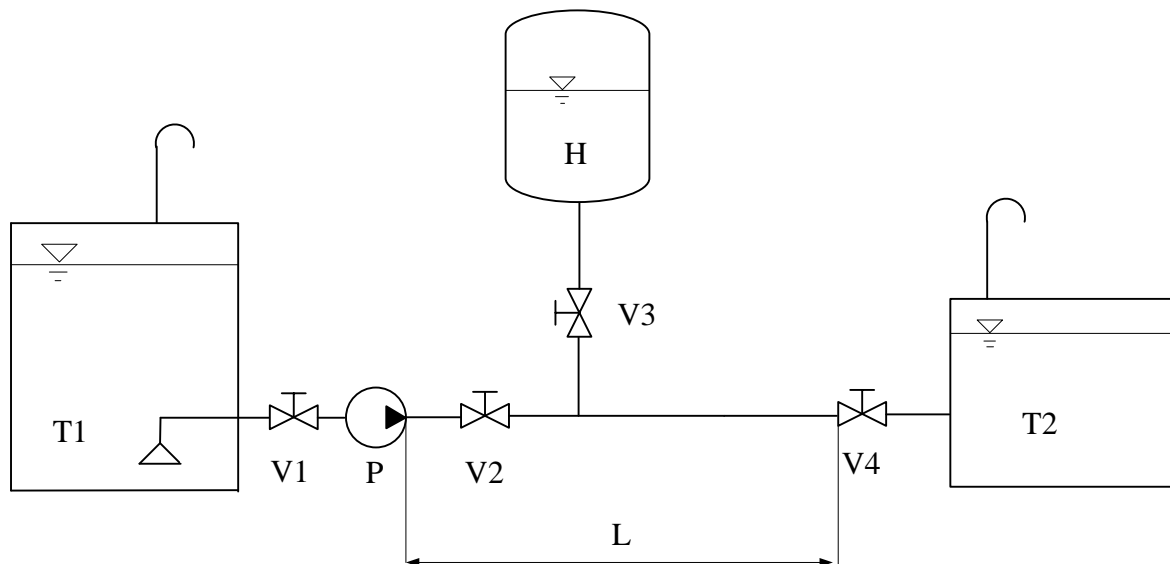


Fig. 1 Schema instalației

Tancul de amortizare a loviturii de berbec este un rezervor închis care conține în partea superioară o pernă elastică de aer comprimat. El transformă lovitura de berbec în oscilații ale masei de lichid din hidrofor mai lente, cu variații de presiune mult mai mici, în urma comprimării și decomprimării pernei de aer.

Se consideră că presiunea dezvoltată de pompă este constantă având valoarea  $p_0$  iar lichidul circulă în tubulatură cu viteza  $v_0$ . Valva V4 se închide brusc. Modelul prezentat în continuare ia în considerare compresibilitatea lichidului și neglijează frecările. Prima particulă de lichid care se oprește este particula din dreptul valvei care se comprimă până la limita dată de valoarea modulului de elasticitate al lichidului  $\epsilon$ . Datorită comprimării, presiunea în secțiunea robinetului V4 crește de la valoarea inițială  $p_0$  la valoarea  $p_0 + \Delta p$ . După prima particulă se oprește și a doua particulă, vecină cu prima care se comprimă și ea. Din aproape în aproape, particula cu particula, se oprește toată coloana de lichid din tronsonul de țevă PV4.

Prin comprimarea coloanei ultima particulă dinspre pompă se deplasează spre dreapta cu distanța  $\Delta l$ . Oprirea treptată urmată de comprimarea treptată a coloanei de lichid este însoțită de propagarea de la pompa P către valva V4 a creșterii de presiune  $\Delta p$  cu viteza  $a$ .

Timpul în care suprapresiunea  $\Delta p$  parcurge lungimea  $L$  a țevii cu viteza  $a$  este  $L/a$ . În momentul  $t=L/a$  întreaga coloană de lichid este comprimată și în repaus. Această situație nu este stabilă deoarece ultima particulă care s-a comprimat, cea de lângă pompă, nu este în echilibru. Fața dinspre valvă este supusă presiunii  $p_0+\Delta p$  în timp ce fața dinspre pompă este supusă presiunii  $p_0$ , presupusă constantă. Datorită acestei diferențe de presiune, particula se deplasează cu viteza  $v_0$  spre pompă. Această mișcare cu viteza  $v_0$  se propagă din aproape în aproape de la V4 la P. Imediat după atingerea timpului  $t=2L/a$  măsurat de la închiderea valvei, prima particulă care se decompresionează cu valoarea  $-\Delta p$  este cea de lângă valvă. Decomprimarea (dilatarea) lichidului continuă din aproape în aproape astfel încât la momentul  $t=3L/a$  unda de presiune  $-\Delta p$  s-a propagat cu viteza  $a$  de la V4 la P și toată coloana de lichid se găsește în stare dilatată și în repaus. Această situație nu este stabilă deoarece ultima particulă care s-a dilatat, cea de la pompa P nu poate rămâne în echilibru întrucât fața dinspre valvă este supusă presiunii  $p_0-\Delta p$  iar fața dinspre pompă presiunii  $p_0$ . De la acest moment reîncepe mișcarea de la pompă spre valvă cu viteza  $v_0$  și lichidul se comprimă iar, din aproape în aproape de la P spre V4 până la momentul  $t=4L/a$  când masa lichidului își revine starea inițială de mișcare cu viteza  $v_0$  la presiunea  $p_0$ , exact ca la momentul  $t=0$  al închiderii valvei. Fenomenul se repetă periodic cu perioada  $4L/a$ .

Presiunea  $p_0$  poate fi exprimată în funcție de înălțimea unei coloane de lichid ca în relația (1).

$$p_0 = \rho \cdot g \cdot z_0 \quad (1)$$

## 2. Modelul teoretic

Efectul loviturii de berbec poate fi simulat rezolvând ecuațiile cu derivate parțiale obținute din ecuația de mișcare și ecuația de continuitate.

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{B_m} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{f}{2D} v|v| = 0 \quad (3)$$

unde:

- p-presiunea fluidului,
- $\rho$ -densitatea fluidului,
- x-coordonata x,
- t-timpul,
- v-viteza fluidului,
- D-diametrul interior al țevii,
- f-coeficientul de frecare,
- $B_m$ -modulul de elasticitate echivalent.

$$B_m = \frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{E} \frac{D}{\delta} \quad (4)$$

unde:

- $\varepsilon$ -modulul de elasticitate al fluidului,
- E-modulul de elasticitate al materialului țevii.

Profilul pulsului de presiune al loviturii de berbec poate fi calculat cu ecuația lui Jukovski:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \rho a \frac{\partial C}{\partial t} \quad (5)$$

unde:

a-viteza de propagare a undei de presiune,  
 $\partial C$ -variația vitezei fluidului.

Din ecuația (5) rezultă că pentru o valvă închisă instantaneu mărimea maximă a pulsului de presiune generată de lovitura de berbec este:

$$\Delta p = \rho a \Delta C \quad (6)$$

unde:

$\Delta C$ -modificarea vitezei fluidului.

Viteza de propagare a undei de presiune în fluid se calculează cu relația:

$$a = \sqrt{\frac{g}{\gamma \left( \frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{E} + \frac{D}{\delta} \right)}} \quad (7)$$

unde:

a-viteza de propagare a undei de presiune,  
g-accelerația gravitațională,  
 $\gamma$ -greutatea specifică a fluidului.

Viteza de propagare a undei de presiune în apă a fost scrisă de Jukovski sub forma:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{\varepsilon D}{E \delta}}} \quad (8)$$

unde:

$\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}} = 1425 \text{ [m/s]}$ -viteza de propagare a sunetului în apă.

### 3. Descrierea standului experimental

Standul experimental SES 206 permite:

- familiarizarea studenților cu fenomenul loviturii de berbec ce apare în tubulatura instalațiilor aflate sub presiune la închiderea bruscă a unei valvule,
- calculul vitezei de propagare a undei de presiune,
- determinarea timpului de reflexie a undei de presiune în conductă,

- determinarea variațiilor de presiune în tubulatură în cazul apariției loviturii de berbec și vizualizarea lor,
- studiul apariției fenomenului loviturii de berbec funcție de timpul de închidere a vanei,
- studiul dependenței saltului de presiune apărută în timpul fenomenului loviturii de berbec de viteza de curgere a fluidului,
- studiul legii de închidere a valvei în scopul evitării fenomenului loviturii de berbec.

Schema standului cu părțile componente este prezentată în (Fig. 2);

WT - tanc de apă,

P - pompă,

SV - valvă alimentare,

DV - valvă de scurgere,

WHA - tanc amortizare lovitură de berbec,

VV - valva de aerisire,

PT - traductor de presiune,

PI - manometru,

ICV - electroventil cu închidere rapidă,

SCV - electroventil cu închidere lentă,

F - debitmetru,

FV - valva debitmetrului,

RV - valvă de siguranță,

LI - indicator de nivel,

PL - tubulatură în spirală,

APS - sistem de achiziție și procesare date,

O - osciloscop,

CP - panou de control.

Tubulatură în spirală (PL) este confecționată din cupru și are lungimea de 60 m, diametrul interior de 10 mm iar grosimea peretelui 1 mm. Timpul de închidere a valvei cu închidere rapidă (ICV) este cuprins între 20 și 30 ms iar a valvei cu închidere lentă (SCV) 0,1...3s.

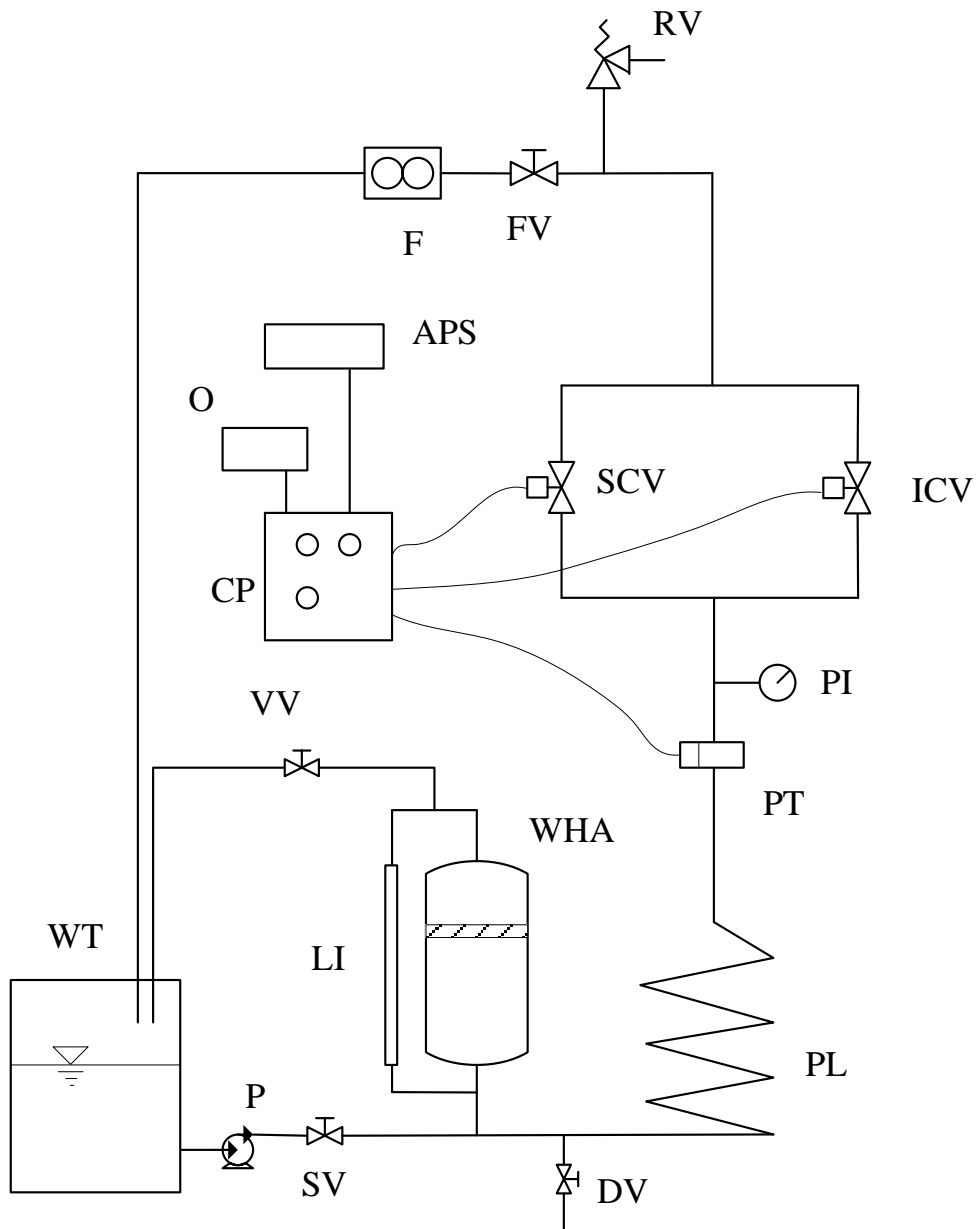


Fig. 2 Schema standului

Panoul de control (CP) conține Panoul 1 (Fig.3) cu ajutorul căruia se pune instalația sub tensiune și Panoul 2 (Fig.4) ce conține butoanele de cuplare a electroventilelor.

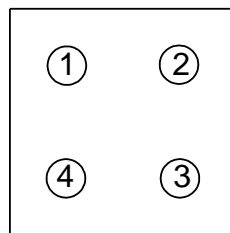
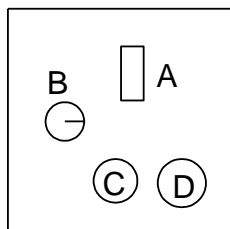


Fig.3 Panoul 1

Butonul 2 în poziția ON indică punerea instalației sub tensiune, lampa 1 de culoare VERDE indică prezența tensiunii electrice, butonul 3 START pornește pompa și sistemul electronic de măsurare și control, butonul 4 ROȘU se acționează pentru oprirea de urgență în cazul apariției unei avarii sau a unei funcționări anormale a instalației.



**Fig.4 Panoul 2**

Butonul A așezat în poziție mediană permite cuplarea electroventilului cu închidere lentă iar dacă este orientat spre dreapta permite cuplarea electroventilului cu închidere rapidă. Prin acționarea butonului D se cuplează (închide) electroventilul cu închidere rapidă iar prin acționarea butonului C se cuplează (închide) electroventilul cu închidere lentă. În situația în care butonul A este în poziție mediană electroventilul cu închidere lentă SCV este deschis, prin el circulă apa până la acționarea butonului C, iar ICV este închis. În situația în care butonul A este orientat spre dreapta SCV este închis iar ICV este deschis, prin el circulă apa până la acționarea butonului D. Rotind butonul B se modifică timpul de închidere a electroventilului lent.

Pentru punerea în funcțiune a standului experimental se vor efectua operațiunile:

1. se deschide valvula de aerisire VV;
2. se alimentează cu apă rezervorul WT din care aspiră pompa;
3. se verifică creșterea nivelului apei în instalație urmărind sticla de nivel atașată rezervorului (LI) oprindu-se alimentarea când nivelul a ajuns la circa 50% din înălțime;
4. se închide robinetul de aerisire VV;
5. se asigură circulația apei prin instalație prin deschiderea robinetelor SV și FV;
6. se conectează standul la rețeaua de alimentare cu energie electric de la Panoul 1 acționând butoanele 2 și 3 (Fig.3);
7. se așteaptă stabilizarea presiunii în instalației urmărind indicația manometrului PI și a vitezei fluidului urmărind indicația debitmetrului F.

#### 4. Efectuarea experimentului cu electroventilul cu închidere rapidă

1. Se comută butonul de selecție A din Panoul 2 spre dreapta.
2. Se lansează în execuție programul de măsurare și prelucrare executând dublu clic cu butonul stânga al mouse-ului pe pictograma SES 206 de pe ecranul calculatorului.
3. Operatorul se pregătește să acționeze comanda de măsurare din program și comanda închiderii electroventilului din panoul de comandă.
4. Se execută clic cu butonul mouse-ului pe butonul "MĂSURARE" din fereastra programului care va lansa achiziția datelor. Pe ecran programul schimbă textul din "MĂSURARE" în "STOP".

5. În cel mai scurt timp se acționează butonul de închidere a electroventilului ICV ținând apăsat butonul D din Panoul 2 circa o secundă. Are loc un salt de presiune și dacă sunt îndeplinite condițiile se constată fenomenul loviturii de berbec.
6. Pulsul de presiune este reprezentat în timp real pe graficul din partea de sus a ferestrei programului (tip osciloscop), pe graficul înregistrat în partea de jos a ferestrei ca și pe instrumentele de indicare de pe stand (manometru și osciloscop).
7. Se execută clic pe butonul "STOP" pentru a opri achiziția datelor.
8. În graficul din partea de jos a ferestrei ecranului se observă datele înregistrate pe tot intervalul. Folosind meniurile zoom-in și zoom-out se afișează pe ecran porțiunea de înregistrare relevant.
9. Se manipulează cu mouse-ul cursoarele colorate pentru marcarea a două maxime consecutive.
10. Se execută clic pe butonul "SET" pentru calculul vitezei de propagare a unde de presiune afișată de program în partea stângă a ecranului cu eticheta "c".
11. Programul are posibilitatea de a salva datele măsurate într-un fișier pentru a fi prelucrate ulterior cu un alt program. În acest scop se manipulează cu mouse-ul cursoarele negre pentru a marca momentul inițial și final între care se salvează datele. Se execută clic pe butonul "SALVEAZĂ" și se selectează numele fișierului dorit în fereastra care apare. Programul generează un fișier tip HTML ce conține data și ora efectuării experimentului, tabelul valorilor presiunii în funcție de timp, graficul înregistrat și rezultatele calculelor. În același timp este generat un program cu extensia CSV ce conține doar valorile măsurate ce pot fi importate în alte programe de calcul cum ar fi Excel.
12. Oprirea instalației se realizează închizând fereastra programului, oprind pompa din Panoul 1 cu butonul 3 și scoțând instalația de sub tensiune cu butonul 2.

### 5. Simularea teoretică

Se completează coloanele tabelului 1.

**Tabelul 1**

Q [l/min]	v [m/s]	$\Delta p$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\Delta p$ [bar]	$\tau$ [s]	$t_R$ [s]
1,5					
2,0					
2,5					
3,0					
3,5					
4,0					
4,5					
5,0					
5,5					
6,0					
6,5					
7,0					
7,5					
8,0					
8,5					
9,0					
9,5					
10,0					

Viteza fluidului se calculează cu relația:

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (9)$$

unde:

v-viteza apei [m/s],  
Q-debitul [m<sup>3</sup>/s],  
D=10x10<sup>-3</sup> [m] diametrul interior al țevii.

Viteza de propagare a undei de presiune "a" se calculează cu relația (7) sau (8).  
Mărimile care apar în aceste relații sunt:

$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ -densitatea apei,  
 $\delta = 1 \text{ mm}$ -grosimea peretelui țevii,  
 $v_s = 1425 \text{ m/s}$ -viteza sunetului în apă,  
D = 10 mm-diametrul interior al țevii,  
 $\gamma = 980 \text{ daN}$  - greutatea specifică a apei,  
 $\varepsilon = 2,020 \times 10^9 \text{ N/m}^2$  -modulul de elasticitate al apei la temperatura de 20<sup>0</sup> C,  
E = 132x10<sup>9</sup> N/m<sup>2</sup>-modulul de elasticitate al cuprului din care este confecționată țeava.

Pulsul de presiune  $\Delta p$  se calculează cu relația (6) în care  $\Delta C=v$ .  
Timpul de propagare a undei de presiune  $\tau$ [s] se calculează cu relația (10).

$$\tau = \frac{L}{a} \quad (10)$$

unde:

L = 60 [m]-lungimea țevii,  
a - viteza de propagare a undei de presiune.

Timpul de reflexie al undei de presiune  $t_R$  se calculează cu relația (11).

$$t_R = \frac{2L}{a} \quad (11)$$

## 6. Rezultate experimentale

Cu valorile măsurate se completează coloanele tabelului nr.2.



Tabelul 2

Q [l/min]	c [m/s]	$\Delta p_e$ [N/m <sup>2</sup> ]	$\Delta p_e$ [bar]	$\tau_e$ [s]	$t_{Re}$ [s]
1,5					
2,0					
2,5					
3,0					
3,5					
4,0					
4,5					
5,0					
5,5					
6,0					
6,5					
7,0					
7,5					
8,0					
8,5					
9,0					
9,5					
10,0					

În Tab.2 mărimea “c” reprezintă viteza de propagare a undei de presiune măsurată cu ajutorul instrumentelor și citită în fereastra programului. Pulsul de presiune  $\Delta p_e$  este măsurat de traductorul de presiune și înregistrat de program, la fel și timpul de propagare a undei de presiune  $\tau_e$ . Timpul de reflexie a undei de presiune  $t_{Re}$  este calculat cu relația (12).

$$t_{Re} = \frac{2L}{c} \quad (12)$$

### 7. Compararea rezultatelor teoretice cu cele experimentale

Se completează tabelul 3 folosind datele din tabelele 1 și 2.

Tabelul 3

$v$ [m/s]	$\frac{\Delta p - \Delta p_e}{\Delta p} \cdot 100$	$\frac{a - c}{a} \cdot 100$	$\frac{\tau - \tau_e}{\tau}$	$\frac{t_R - t_{Re}}{t_R} \cdot 100$

8. Analiza fenomenului loviturii de berbec în cazul închiderii treptate a electroventilului

În situațiile reale închiderea valvei durează un timp cerut de manevrarea mecanismului de acționare. Se notează cu  $T_i$  timpul de închidere a electroventilului. Se reiau considerațiile făcute în cazul închiderii bruște a electroventilului și se fragmentează timpul  $T_i$  într-un număr  $n$  oarecare de intervale. Noi considerăm  $n=5$ . Se consideră și tubulatura în dreptul electroventilului împărțită în 5 porțiuni (Fig. 5).

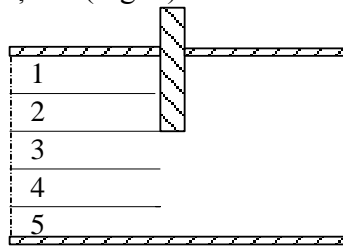


Fig. 5 Împărțirea tubulaturii în dreptul electroventilului în porțiuni

Electroventilul se închide succesiv brusc pe fiecare porțiune urmată de o pauză de  $T_i/5$ . După închiderea bruscă a primei porțiuni se formează suprapresiunea  $\Delta p_1$  care începe să se deplaseze spre pompă. După trecerea timpului  $T_i/5$  se închide brusc a doua porțiune a secțiunii tubulaturii și pleacă spre pompă cea de a doua undă de presiune  $\Delta p_1$ . Suprapresiunile  $\Delta p_1$  parcurg distanța electroventil-pompă în timpul  $L/a$ , sunt reflectate de pompă sub forma unor subpresiuni  $-\Delta p_1$  care la rândul lor parcurg distanța pompă-electroventil în timpul  $L/a$ . Primele unde reflectate corespunzătoare primelor porțiuni ale secțiunii tubulaturii obturate de robinet pot întâlni ultimele unde directe corespunzătoare închiderii ultimelor porțiuni ale secțiunii țevii dacă tubulatura nu este destul de lungă sau timpul de închidere este relativ mare. În cazul unei închideri lente  $T_i > t_R = \frac{2L}{a}$  pe întreaga lungime a tubulaturii are loc interferența undelor directe cu cele reflectate și prin urmare suprapresiunea maximă  $\Delta p_1$  nu este atinsă în nici o secțiune a tubulaturii și nici la electroventil. Suprapresiunea scade liniar de la valoarea  $\Delta p < \Delta p_1$  din dreptul electroventilului la valoarea zero în dreptul pompei (Fig. 6).

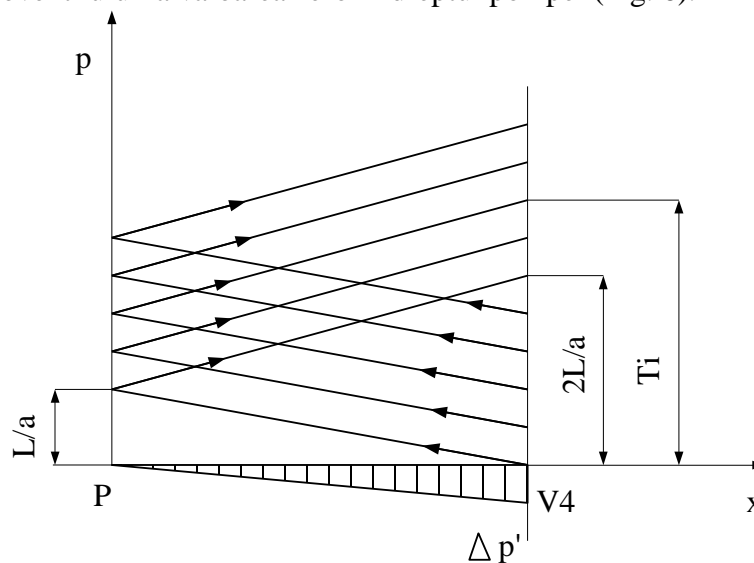


Fig. 6 Interferența undelor directe cu cele reflectate

Scopul experimentului este de a găsi timpul de închidere a electroventilului pentru care pulsul de presiune are valoarea minimă. Se efectuează experimentul pentru 2 valori ale debitului  $Q=8,5$  l/min și  $Q=9,5$  l/min.

1. Se rotește butonul A din Panoul 2 (Fig. 4) în poziție mediană.
2. Se amplasează butonul B care reglează timpul de închidere a electroventilului SCV pe prima poziție și se acționează butonul C.
3. Se repetă operațiile de la punctul 2 pentru alte 4 poziții ale butonului B.
4. Se completează cu valorile citite coloanele tabelelor 4 și 5, unde t-timpul de închidere al SCV,  $\Delta p'$ -saltul de presiune,  $\tau_{el}$  timpul de propagare a undei de presiune, timpul de reflexie a undei de presiune  $t_{Rel}$  este calculat cu relația (12)..
5. Se compară valorile pulsului de presiune obținute în cazul electroventilului cu închidere lentă cu cele obținute în cazul închiderii electroventilului cu închidere rapidă (Tab.6).

**Tab.4 Q=8,5 l/min**

t [s]	$\Delta p'$ [bar]	c [m/s]	$\tau_{el}$ [s]	$t_{Rel}$ [s]

**Tab.5 Q=9,5 l/min**

t [s]	$\Delta p'$ [bar]	c [m/s]	$\tau_{el}$ [s]	$t_{Rel}$ [s]

Se compară pentru debitele  $Q=8,5$  l/min și  $Q=9,5$  l/min valorile experimentale ale pulsurilor de presiune obținute prin închiderea electroventilului cu închidere rapidă (ICV) cu cel al electroventilului cu închidere lentă (SCV) tabelul 6.

**Tab.6 Comparație între valorile experimentale ale salturilor de presiune**

Q [l/min]	$\Delta p'$ [bar]	$\Delta p_e$ [bar]	$\frac{\Delta p' - \Delta p_e}{\Delta p_e} \cdot 100$
8,5			
9,5			