

**Петар Јанев, дипл. инж.**

**Х И Д Р О П Н Е В М А Т С К А  
Т Е Х Н И К А**

**И Г О Д И Н А**

**Скопје, 2012**

**Издавач:** МИНИСТЕРСТВО ЗА ОБРАЗОВАНИЕ И  
НАУКА НА РЕПУБЛИКА МАКЕДОНИЈА  
ул. Мито Хаџивасилев Јасмин, бб Скопје

**Рецензенти:**

дипл.инж. д-р Славе Арменски, ред. проф. на Машински  
факултет, Скопје  
дипл.инж. Станка Димовска, проф. во СУГС „Владо Тасевски“,  
Скопје  
дипл.инж. Вангелка Трајковска, проф. во АСУЦ „Боро  
Петрушевски“, Скопје

**Лектор:** Верица С. Стоименова

**Илустрација на корици:** Златко Спасовски

**Печати:** Графички центар дооел, Скопје

Со решение на Министерот за  
образование и наука на Република  
Македонија бр. 22-4389/1 од  
29.07.2010 година се одобрува  
употребата на овој учебник

CIP - Каталогизација во публикација  
Национална и универзитетска библиотека „Св.Климент Охридски,, Скопје

621.22(075.3)  
532/533(075.3)

ЈАНЕВ, Петар

Хидропневматска техника : II година / Петар Јанев. - Скопје :  
Министерство за образование и наука на Република  
Македонија, 2010. - 108 : илустр. ; 24 см  
Библиографија: стр. 108  
ISBN 978-608-226-117-1  
COBISS.MK-ID 84284682

# С О Д Р Ж И Н А

## I. ХИДРАУЛИКА

### ФИЗИЧКИ СВОЈСТВА НА ФЛУИДИТЕ

- 1) Хидраулични системи за пренос на енергија, предности и недостатоци.....1
- 2) Физички својства на флуидите.....3
- 3) Идеална и реална течност.....8

## ХИДРОСТАТИКА

- 4) Хидростатички притисок .....11
- 5) Основна равенка на хидростатиката .....14
- 6) Хидростатички притисок на криви површини.....17
  - 6.1Притисок на течности врз ѕидовите на цевки, цевкини колена и резервоари.....18
- 7) Инструменти за мерење на притисок
  - 7.1 Инструменти со течност.....21
  - 7.2 Метални (деформациони) инструменти.....25
- 8) Определување на густината на течности со помош на течен столб .....27
- 9) Паскалов закон.....29
- 10) Хидраулични машини и принцип на работа
  - 10.1 Хидраулична преса .....31
  - 10.2 Хидрауличен акумулатор.....33
- 11) Карактеристики на површини на течности со еднакви
  - 11.1 Површина на течност во сад кој мирува.....36
  - 11.2 Површина на течност во сад што се движи со праволиниско забрзување.....37
  - 11.3Површина на течност во сад кој ротира околу вертикална оска.....38
- 12) Рамнотежа на тела потопени во течност и стабилност на тела што пливаат
  - 12.1Пливање на телата.....39
  - 12.2Рамнотежа на тела потопени во течност.....40

12.3 Стабилност на тела што пливаат .....	41
Примери.....	45

## ХИДРОДИНАМИКА

13) Видови струења, струјни линии.....	51
14) Проток и средна брзина.....	55
15) Бернулиева равенка за идеални и реални течности.....	56
16) Примена на Бернулиевата равенка.....	59
16.1 Вентуриева цевка (Вентуриев водомер) .....	59
16.2 Млазна пумпа (ејектор).....	60
16.3 Пито цевка.....	64
17) Ламинарно и турбулентно струење на течност.....	66
17.1 Рејнолдсов број и критична брзина.....	67
18) Рамномерно движење на течност низ цевки со константен пресек.....	68
19) Загуби на енергија и коефициент на отпор при ламинарен и турбулентен режим на движење .....	70
20) Истекување на течности низ мал отвор.....	74
20.1 Истекување низ мал бочен отвор во тенок ѕид.....	75
20.2 Истекување низ прстенест зјај.....	77
21) Хидрауличен удар и мерки за негово надминување.....	78
22) Движење на течност низ отворен канал .....	81
Примери.....	87

## II. П Н Е В М А Т И К А

23) Развој и поделба на пневматиката.....	93
24) Споредување на пневматски со хидраулични системи.....	94
25) Својства на воздухот како работен флуид.....	95
26) Равенка на состојба на реални гасови.....	97
27) Струење на компримиран воздух.....	99
28) Равенка на континуитет.....	100
29) Бернулиева равенка.....	101
30) Споредување на загубите во цевките од триење и од промена на насоката на движење на гасовите.....	102
Примери.....	106
Литература .....	108

## Вовед

Учебникот Хидропневматска техника е напишан според предвидената наставна програма за машински енергетски техни чар II година, со фонд 2 часа неделно.

Целта на овој учебник е учениците да се информираат и здобијат со основните знаења за примената на хидрауликата и пневматиката во индустријата. За таа цел учебникот е поделен на две поглавја, хидраулика и пневматика, според наставната програма за машинска енергетска струка.

Во поглавјето Хидраулика се анализирани основните поими од хидростатиката и хидродинамиката.

Во делот за хидростатика се анализирани физичките својства на течностите, основните поими и закони како и нивната примена.

Во поглавјето за хидродинамика се обработени видовите на струења, основните равенки на струење, загубите на енергија при движење на течните флуиди, поимот за хидрауличен удар и мерките за негово намалување или надминување.

Во поглавјето Пневматика се анализирани основните својства на гасовитите флуиди, особено на воздухот како работен флуид. Анализирани се равенките за струење на компримиран воздух, загубите на енергија при струењето и техничките предности меѓу хидрауличните и пневматските системи.

При конципирање на учебников авторот се ориентираше според предвидената наставна програма. Настојуваше книгата да добие што подобар стручен и технички квалитет. За тие настојувањата имаат придонес и конструктивните забелешки на рецензентите. Сите понатамошни добронамерни сугестии и забелешки за подобрување на квалитетот ќе бидат прифатени со задоволство. Авторот ја изразува својата искрена благодарност кон сите што придонесоа за издавање на овој учебник.

Авторот



**Х И Д Р А У Л И К А**





## ИСТОРИСКИ РАЗВОЈ

Хидрауликата се вбројува меѓу најстарите научни области, бидејќи хидрауличните објекти се изведувани уште пред новата ера, како на пример, каналите за наводнување во Египет, насипи за одбрана од поплави во Кина и Индија, потоа водоводните инсталации во стара Грција, римските аквадукти, бањи итн.

За прв научен труд од хидрауликата се смета Архимедовиот закон за пливање на телата, напишан пред повеќе од 2000 г. Потоа Галилеј докажал дека големината на отпорот при движењето на цврсти тела низ флуиди зависи од густината на флуидот и брзината на движење на телото. Исто така, Леонардо да Винчи, Паскал, Њутн, Торичели, Бернулиј, Ојлер, Ломоносов, правеле обиди или решавале различни проблеми од областа на хидрауликата.

При решавањето на проблемите често не било доволно само математички да се докаже определена законитост, туку истото да се потврди со експериментални податоци. Основните закони на хидрауликата поставени од Архимед, Паскал, Бернулиј и други овозможиле масовна примена на хидрауликата во индустријата кон крајот на XIX и почетокот на XX век. Денес, со примена на автоматизацијата во производството, хидрауликата се применува во машинската индустрија, авиоиндустријата, градежништвото, рударството, индустријата за моторни возила, земјоделството, и други области.

### 1. ХИДРАУЛИЧНИ СИСТЕМИ ЗА ПРЕНОС НА ЕНЕРГИЈА, ПРЕДНОСТИ И НЕДОСТАТОЦИ

Системот за пренос на енергија може да биде: механички, електричен, хидрауличен, пневматски или комбиниран. Каков систем ќе се избере, се одлучува во фазата на проектирање и тоа според: технолошкиот процес, условите за работа и можностите на корисникот.

Хидрауличниот пренос на енергија може да биде изведен како:

**1. Хидростатички** (волуменски) пренос на енергија, каде што енергијата се пренесува само со помош на притисокот на работната течност.

**2. Хидродинамички** пренос на енергија, каде што како носители се притисокот и брзината на струење на работната течност.

Хидрауличниот систем за пренос на енергија е составен од повеќе меѓусебно поврзани елементи во една целина и тоа: резервоар со работна течност, пумпа, елементи за управување (вентили и разводници), елементи за поврзување (цевки и приклучоци), елементи за пречистување, хидрауличен акумулатор и потребните мерни и контролни инструменти.

Основната задача на хидрауличниот систем е трансформација на механичката енергија од погонскиот мотор (електро мотор или мотор со внатрешно согорување) во хидраулична енергија на работната течност (енергија на притисок и енергија на струење), со која извршува одредена работа.

Значи, при преносот на енергија, трансформирањето се врши два пати: пумпата ја претвора механичката енергија на погонскиот мотор во хидраулична енергија на работната течност, а извршниот орган (хидрауличниот мотор) ја претвора хидрауличната енергија на работната течност во механичка енергија со која се извршува работа.

Споредувајќи го хидрауличниот систем за пренос на енергија со останатите системи, можат да се наведат следниве предности и недостатоци:

**Предности:**

- Висок степен на искористување (околу 95%),
- Можност за изведба и работа во секакви климатски услови,
- Голема сигурност при работење на долг век (15 до 20 години),
- Мали димензии и тежини (10 до 20%) во однос на електричните агрегати со исти сили,
- Континуирана контрола и регулација на брзината на работниот притисок во системот,
- Голем дијапазон на вртежи кај хидромоторите (максимален - минимален 1000:1)

- Мали моменти на инерција кај подвижните делови бидејќи габаритите на хидромоторот или пумпата се за приближно 80% помали од истите кај другите системи,
- Едноставна заштита од преоптоварување на секој елемент (преку повратни канали вишокот течност се враќа во резервоарот),
- При изградба на хидрауличните системи се користат многу стандардни елементи.

### **Недостатоци:**

- Надворешните промени на температурата имаат големо влијание врз работните параметри,
- Сложена конструкција, монтажа и одржување,
- Кус век на сите заптивни елементи и можност за истекување на работната течност од системот,
- Голема меѓусебна зависност на работниот притисок, брзината на струење и големината на протокот,
- Потребна е голема чистота на работната течност и максимална херметичност по целата должина на системот,
- Понизок степен на искористување од електричните системи.

## **2. ФИЗИЧКИ СВОЈСТВА НА ФЛУИДИТЕ**

Бидејќи флуидите се одликуваат со мали меѓу молекуларни сили, нивните честички се многу подвижни и волуменот секогаш им се приспособува според обликот на садот во кој е сместен флуидот. Физичките својства на флуидите кои имаат влијание врз работните параметри ќе бидат анализирани како што следува:

- **Густина** се означува во меѓународниот систем со симболот ( $\rho$ ) и претставува маса на флуидот ( $m$ ) содржана во единица волумен ( $V$ ).

$$\rho = \frac{m}{V} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

И покрај тоа што густината е променлива големина (зависи од температурата и притисокот), во нормални работни услови се

смета дека густината на флуидите е константна големина. Така, во практиката се зема дека водата што одговара на температура од 4 [°C] има константна густина  $\rho = 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ .

Во следната табела се дадени вредности за густините ( $\rho$ ) на одредени течности, динамичка вискозност ( $\eta$ ) и кинематска вискозност ( $\nu$ ) на температура од 20 [°C].

Течност	$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$\eta \text{ [Pa]}$	$\nu \text{ [m}^2\text{/s]}$
Вода	998,2	$1065 \cdot 10^{-6}$	$1066 \cdot 10^{-6}$
Бензол	879	$670 \cdot 10^{-6}$	$0,762 \cdot 10^{-6}$
Глицерол	1250 - 1260	$105000 \cdot 10^{-6}$	$836 \cdot 10^{-6}$
Бензин	680 - 705	$(578 - 620) \cdot 10^{-6}$	$(0,85 - 0,88) \cdot 10^{-6}$
Метилалкохол	791	$600 \cdot 10^{-6}$	$0,759 \cdot 10^{-6}$
Машинско масло	877- 982	$40700 \cdot 10^{-6}$	$444 \cdot 10^{-6}$
Жива	13547	$1566 \cdot 10^{-6}$	$0,115 \cdot 10^{-6}$
Нафта	760 - 900	$(53,2 - 126) \cdot 10^{-3}$	$(25 - 140) \cdot 10^{-6}$
Етилалкохол	789,3	$1240 \cdot 10^{-6}$	$1,57 \cdot 10^{-6}$

- **Стисливост** е особина на течностите да го менуваат волуменот и густината при промена на притисокот и температурата. При промена на притисокот таа се дефинира со коефициентот на волуменската стисливост ( $k$ ), кој се пресметува според равенката:

$$k = -\frac{\Delta V/V_1}{\Delta p} = -\frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V}{V_1} \left[ \frac{1}{\text{Pa}} \right], \text{ каде што:}$$

$\Delta p = p_2 - p_1 \text{ [Pa]}$  – промена на притисокот, а

$\Delta V = V_1 - V_2 \text{ [m}^3\text{]}$  – промена на волуменот.

Знакот (-) покажува дека за намалување на притисокот одговара зголемување на волуменот и обратно.

Реципрочната вредност на коефициентот на стисливост се вика *модул на стисливост* или *компресиски модул K*.

$$K = \frac{1}{k} \text{ [Pa]}$$

Компресискиот модул  $K$  се менува зависно од видот на течноста, притисокот и температурата. Стисливоста при промена на

температурата се дефинира со зафатнински коефициент на температурна дилатација  $\alpha_v$

$$\alpha_v = \frac{\Delta V/V_1}{\Delta t} = \frac{1}{V_1} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \left[ \frac{1}{\text{K}} \right]$$

Бидејќи  $\Delta t = t_2 - t_1$  се добива:  $\Delta V = \alpha_v \cdot \Delta t \cdot V_1$  [ $\text{m}^3$ ]

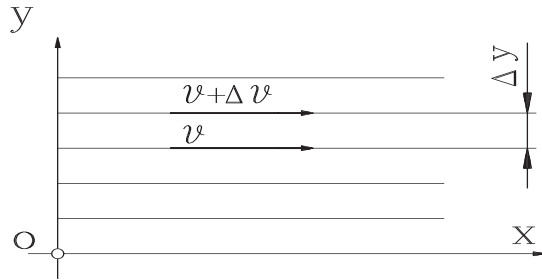
Со зголемување на температурата на течноста за вредност  $\Delta t$  се зголемува и нејзиниот волумен, па новиот волумен изнесува:

$$V_2 = V_1 + \Delta V = V_1 \cdot (1 + \alpha_v \cdot \Delta t) \text{ [m}^3\text{]}$$

- **Вискозност** или внатрешно триење претставува отпор при движење на флуидот како последица од меѓусебното триење на честичките и триењето помеѓу флуидот и ѕидовите од садот низ кои се движи. Ако флуидот мирува (идеален флуид), тогаш нема внатрешно триење. Идеален или совршен флуид во природата не постои. Со теориското проучување на идеалниот флуид се доби ваат резултатите со задоволителна точност. На сл. 1 е претставено струење на флуид составен од елементарни струјници – тенки слоеви, распоредени на меѓусебно растојание  $\Delta y$ . Ако брзините на струење на двата соседни слоја ги означиме со  $v$ , односно  $v + \Delta v$ , според Њутновата теорија силата на триење по допирната површина  $A$  на двата слоја изнесува:

$$F_\mu = \eta \cdot A \frac{\Delta v}{\Delta y}, \text{ [N]} \text{ каде што:}$$

$\eta$  [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ] - коефициент на динамичка вискозност,  
 $A$  [ $\text{m}^2$ ] - допирна површина.



Сл. 1: Струење на вискозен флуид

Освен динамичка вискозност ( $\eta$ ) постои и кинематска вискозност ( $\nu$ ). Коэффициентот на кинематската вискозност е однос помеѓу коефициентот на динамичката вискозност ( $\eta$ ) и густината на флуидот ( $\rho$ ).

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$$

Вискозноста зависи од видот на течноста, притисокот и температурата. Со зголемување на температурата вискозноста на течноста се намалува, а со намалување на температурата вискозноста се зголемува. Кај гасовите оваа температурна зависност е обратна.

- **Апсорпција** е способност на течноста да ги впива и раствора гасовите. Големината на апсорпцијата зависи од повеќе фактори: видот на течноста и гасот, нивната температура и големината на притисокот на гасот што се наоѓа над површината на течноста.

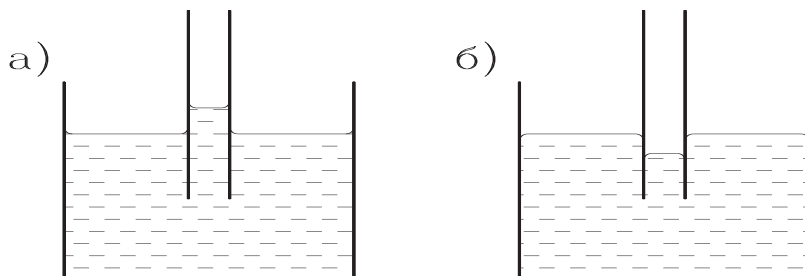
Бројот кој покажува колкав волумен од некој гас може да апсорбира еден литар течност на  $0\text{ }[^\circ\text{C}]$  при нормален притисок од  $1,0132\text{ [bar]}$  е наречен *коэффициент на апсорпција*.

Експериментите покажале дека иста количина на течност на одредена температура секогаш апсорбира ист волумен од соодветен гас, независно под колкав притисок е гасот. На пример,  $1\text{ [l]}$  вода на температура од  $20\text{ }[^\circ\text{C}]$  ќе апсорбира  $31\text{ [cm}^3\text{]}$  кислород, независно дали кислородот е под притисок од  $1, 2, 3$  или повеќе  $\text{[Pa]}$ . Но, треба да се напомене дека според Бојл - Мариотовиот

закон, во одреден волумен од  $37 \text{ [cm}^3\text{]}$  вода под притисок од  $2 \text{ [Pa]}$  се наоѓа два пати поголема маса кислород, при притисок од  $3 \text{ [Pa]}$  три пати повеќе... во споредба со основната вредност при притисок од  $1 \text{ [Pa]}$ . Истиот заклучок се однесува и за другите гасови кои се апсорбираат во течности. Овие заклучоци по експериментален пат ги утврдил Анри во 1803 година. Тој констатирал дека количината на апсорбиран гас во која било течност на определена температура е право пропорционална со притисокот под кој се врши апсорпцијата.

Исто така е докажано дека доколку температурата на течноста е поголема, тогаш волуменот на апсорбираниот гас ќе биде помал.

- **Капиларност** е особина на течностите во садови со мали димензии (капиларни садови) да се подигнат над или спуштат под основното ниво во садот.



Сл. 2 Капиларност

На сл. 2а е претставена капиларноста кај течностите со мала густина (вода, алкохол...), а на сл. 2б за течности со поголема густина (жива, масло...).

Дали навлажнувањето на ѕидовите ќе биде над или под основното ниво на течноста во садовите, зависи од видот на течноста и видот на материјалот од кој е изработен садот.

- **Кавитацијата** не е физичка особина, туку негативна појава при струење на течноста, при која доаѓа до разорување на материјалот на граничните површини од инсталацијата. До кавитација доаѓа при струење на течност низ цевководи кои имаат нагли стеснувања на напречниот пресек. Тогаш на тие места, брзината на струење се зголемува, а притисокот се намалува. При струење низ струјни канали што ротираат (кај

сите турбомашини), секогаш постои опасност во струјниот тек да постојат зони во кои притисокот е помал од атмосферскиот, т.е. да владее потпритисок.

Тој потпритисок може да достигне вредност која е помала од вредноста на притисокот во заситената пара на течноста за работната температура. Тогаш, во тој дел од струјниот простор ќе дојде до испарување на течноста. Парата ќе се концентрира во делови од струјниот простор, образувајќи таканаречени каверни. Овие каверни, носени од струјата, може да дојдат во зона со повисок притисок од притисокот на заситената пара. Во тие зони доаѓа до кондензација на парата и честичките создадени при кондензацијата заедно со околните честички, настојувајќи брзо да го исполнат безвоздушниот простор (испразнетиот простор од парата што кондензирала), се движат со огромна брзина. Притоа тие меѓусебно се судруваат и удираат во ѕидовите на цевководот, ударите се разорни и предизвикуваат оштетувања на цврстите површини. Таа појава на разорување на материја лот на граничните површини е позната под името **кавитација**. Најдобар начин да се избегне појавата на кавитација е да се обезбеди добро конструирање на спроводните канали (цевководите) и обликот на граничните површини од струјно - технички аспект. Кавитацијата во определени случаи, како на пример кај центрифугалните пумпи, претставува лимитирачки фактор за димензионирање на одделни делови од струјната машина. Кавитацијата се манифестира со непријатни треперења (вибрации) на машините и цевководите, придружени со неподнослив шум.

### 3. ИДЕАЛНА И РЕАЛНА ТЕЧНОСТ

Идеален или совршен флуид во природата не постои. Со теориското проучување на идеалниот флуид се добиваат резултатите со задоволителна точност. Но, заради поедноставно пресметување во хидростатиката се практикува поимот **идеална течност**. Тоа е течност во која не постои внатрешно триење (вискозност) и струењето би било стационарно - со константна брзина. Добиените резултати за претпоставената идеална течност се валидни за хидростатиката, но се разликуваат од појавите и законите што се анализираат со хидродинамиката.



Основните закони на хидростатиката се од голема важност и се применуваат во практиката (Паскалов закон, пливање на тела та, хидростатички притисок), а ќе се анализираат подолу во делот за хидростатика.

Течностите се мошне малку стисливи. Експериментално е утврдено дека обемот на водата се намалува за 0,5% ако притисокот се зголеми од 1 до 100 (bar). Коефициентот на стисливост изнесува  $5 \times 10^{-6} (\text{kp}/\text{sm}^2)$ . Инаку течностите се нестисливи и еластични, но ако се споредат со цврстите тела тие се стисливи.

Поимот **реална течност** се анализира при движењето (кинематика и динамика) на течностите. Постојат повеќе видови на струења, а секое струење на течностите ќе биде дефинирано ако во секој момент може да се одредат основните параметри: *брзина та* ( $\mathbf{v}$ ), *притисокот* ( $p$ ) и *густината* ( $\rho$ ) на течноста во зависност од *времето* ( $t$ ) и положбата во просторот.

Во Кинематика и Хидродинамика ќе се запознаеме со видоите на струења, равенката на континуитет, енергетската Бернулиева равенка, ламинарно и турбулентно струење, средна брзина, отпорите при струење на реална течност, поими со кои се среќава човекот при изучувањето и примената на течните и гасовити флуиди.

Прашања за утврдување:

1. Каков може да биде хидрауличниот пренос на енергија?
2. Кои се физичките својства на флуидите?
3. Што е притисок?
4. Што е вискозност?
5. Која е разликата меѓу идеална и реална течност?
6. Кои се предностите на хидрауличниот систем?
7. Кои се недостатоците на хидрауличниот систем?
8. Што е густина на флуидот?
9. Што е стисливост?
10. Што е апсорпција?
11. Што е кавитација?
12. За која течност велиме дека е идеална односно реална?

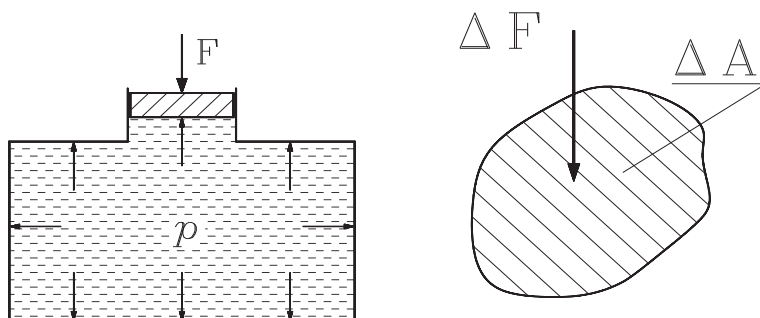
### Заклучок

Со материјалот изнесен во првата глава учениците се запознаваат со физичките својства на флуидите, што е притисок или вискозност и која е разликата меѓу идеална и реална течност. Исто така се запознаваат со густината, стисливоста и апсорпцијата на течните флуиди, како и негативната појава - кавитација, кои се последиците и начините за нејзино намалување. Тоа треба да помогне при натамошното следење на наставната програма.

# Х И Д Р О С Т А Т И К А

## 4. ХИДРОСТАТИЧКИ ПРИТИСОК

Хидростатиката е дел од хидрауликата која ги проучува законите при мирување на течностите. Тогаш течностите се однесуваат како идеален флуид, бидејќи вискозноста не се зема во обзир. Во оваа состојба се анализираат законите на рамно тежа.



Сл. 3 Хидростатички притисок    Сл. 4 Елементарна површина

За да објасниме што е тоа хидростатички притисок, разгледуваме затворен сад полн со течност кој мирува - не се движи. Ако на површината од течноста се дејствува со надворешна сила ( $F$ ) преку клип со допирна површина ( $A$ ), од дејството на надворешната сила, во течноста ќе се појави внатрешна сила на реакција (сл. 3). Таа сила во течноста се манифестира како притисок ( $p$ ) кој дејствува нормално на сите страни низ течноста. Големината на тој притисок се определува според равенката:

$$p = \frac{F}{A} \text{ [Pa].}$$

За математички точно определување на големината на притисокот во која било точка од течноста, се набљудува елементарната површина ( $\Delta A$ ), врз која дејствува елементарна сила ( $\Delta F$ ) (сл. 4). Ако се намалува големината на елементарната

површина ( $\Delta A$ ), ќе се намалува и големината на елементарната сила ( $\Delta F$ ), која дејствува врз неа.

Граничната вредност на односот помеѓу елементарната сила ( $\Delta F$ ) и елементарната површина ( $\Delta A$ ) ќе биде конечна големина и ќе ја претставува големината на притисокот во соодветната точка.

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta F}{\Delta A} \right)$$

Значи, големината на притисокот во која било точка, претставува гранична вредност од односот на елементарната сила на притисок ( $\Delta F$ ) и елементарната површина ( $\Delta A$ ) кога таа се стреми кон нула.

Единица за мерење на притисокот е *паскал* [Pa]. Еден паскал претставува притисок произведен од сила со јачина од 1[N] (1Њутн) рамномерно распоредена на површина од еден квадратен метар.

$$1 \text{ [Pa]} = \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$$

Во меѓународниот систем за мерни единици се употребуваат и следниве единици: хектопаскал [hPa] =  $10^2$  [Pa], килопаскал [kPa] =  $10^3$  [Pa], мегапаскал [MPa] =  $10^6$  [Pa]. Во техниката најчесто се употребува мерната единица [bar], односно:

$$1 \text{ [bar]} = 10^5 \text{ [Pa]}.$$

Притисокот, кој се јавува во течноста, фактички создава сила на реакција, која по интензитет е еднаква на надворешната сила, а со спротивна насока за да се создаде рамнотежа. Силата на реакција врз клипот се определува според равенката:

$$R = p \cdot A = \frac{F}{A} \cdot A = F \text{ [N]}.$$

Значи, како последица од дејствувањето на надворешната сила врз течноста што мирува, во течноста се јавува притисок кој се вика **хидростатички притисок**.

Кај отворени садови (реки, езера, мориња...), кога не постои надворешна сила врз површината на течноста, на длабочина ( $h$ ), од слободната површина постои хидростатички притисок во внатрешноста на течноста. Во таков случај хидростатичкиот притисок во течностите е производ од густината на течноста ( $\rho$ ), забрзувањето на Земјината тежа ( $g$ ) и длабочината ( $h$ ) (висината на водениот столб од површината до посматраната точка).

$$p = \rho \cdot g \cdot h \text{ [Pa].}$$

Од равенката за хидростатички притисок се гледа дека големината на хидростатичкиот притисок, во која било посматрана точка, зависи исклучително од длабочината ( $h$ ) – која е променлива големина. Оваа констатација е точна, бидејќи густината се смета за константна големина за синтетички течности, а исто така и влијанието на Земјината тежа ( $g$ ) има константна вредност. Значи, сите точки кои лежат на една хоризонтална рамнина (на иста длабочина), се под дејство на ист хидростатички притисок. Во општ случај, големината на хидростатичкиот притисок ( $p$ ) се разликува од големината на атмосферскиот притисок  $p \neq p_{at}$ . Од тоа следува дека и разликата од притисоците  $p - p_{at} \neq 0$ .

Атмосферскиот притисок ( $p_{at}$ ) е притисок на воздухот во атмосферата поради сопствената маса. Дефиниција за физичка атмосфера претставува просечна големина на воздушниот притисок врз морската површина при температура од  $0 \text{ [}^\circ\text{C]}$  и изнесува  $101325 \text{ [Pa]} = 1,01325 \text{ [bar]}$ .

Во техниката, поради начинот на мерење на притисокот, често се манипулира со разликата на притисок во однос на атмосферскиот (сл. 5) и се воведени поимите: **апсолутен притисок**, **натпритисок** и **потпритисок (вакуум)**.

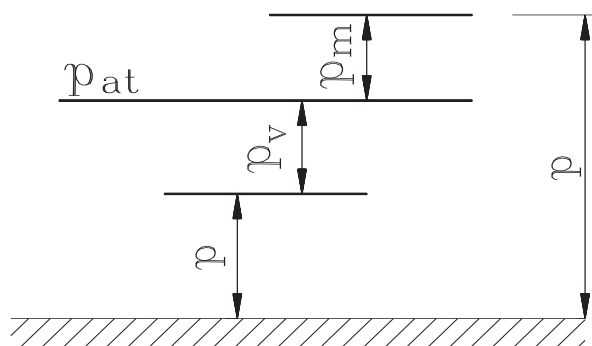
1. Ако мерениот притисок е  $p > p_{at}$ , тогаш разликата на притисоци  $p - p_{at}$  се вика **натпритисок** или манометарски

притисок и се обележува со ( $p_m$ ), а се пресметува со равенката:

$$p_m = p - p_{at} \text{ [Pa]}$$

2. Ако мерениот притисок е  $p < p_{at}$ , тогаш разликата на притисокот  $p_{at} - p$  се вика **потпритисок** или вакуум и се обележува со ( $p_v$ ) а се пресметува со равенката:

$$p_v = p_{at} - p \text{ [Pa]}$$



Сл. 5 Видови притисок

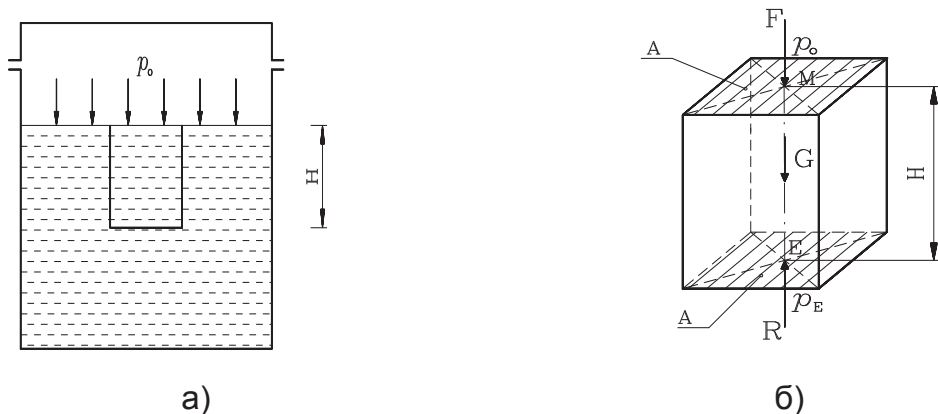
Од равенката за натпритисок и потпритисок се гледа дека секогаш  $p_m > 0$  а  $p_v < 0$ . Во изразите за натпритисок и потпритисок со  $p$  е обележан **апсолутниот** хидростатички притисок, кој лесно може да се пресмета кога е познат натпритисокот односно потпритисокот:

- при натпритисок:  $p = p_m + p_{at} \text{ [Pa]}$ ,

- при потпритисок:  $p = p_{at} - p_v \text{ [Pa]}$ .

## 5. ОСНОВНА РАВЕНКА НА ХИДРОСТАТИКАТА

За да ја дефинираме основната равенка на хидростатиката, се разгледува рамнотежна состојба на елементарна призма со основа  $A$  и висина  $H$ , од течноста што мирува во затворен сад (сл. 6а)



Сл. 6 Рамнотежна состојба

Во средиштата М и Е на горната и долната страна од призма та, дејствуваат притисоците ( $p_0$ ) и ( $p_E$ ) (сл. 6б). Ако за призмата прет поставиме рамнотежна положба го констатираме следново:

Силите кои дејствуваат на бочните страни од призмата меѓу себно се поништуваат бидејќи се еднакви по интензитет а со спротивни насоки;

I. Силите кои дејствуваат вертикално надолу се:

1. Сила на притисок ( $F$ ) врз горната основа од призмата. Ако таа основа се совпаѓа со нивото на течноста, тогаш  $p_M = p_0$ , па следува дека:

$$F = p_M \cdot A = p_0 \cdot A \text{ [N]}$$

2. Сила од масата на набљудуваниот волумен од течниот флуид (елементарната призма):

$$G = V \cdot \rho \cdot g = H \cdot A \cdot \rho \cdot g \text{ [N]}, \text{ каде што:}$$

$A \text{ [m}^2\text{]}$  – површина на основата на призмата,  
 $V \text{ [m}^3\text{]}$  – волумен на елементарната призма,

$H$  [m] – висина на елементарната призма,  
 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] – густина на течнoста.

II. На силите, кои дејствуваат вертикално надолу, се спротивставува сила на реакција  $R$  со еднаков интензитет, а спротивна насока. Нејзината големина се определува со равенката:

$$R = \rho_E \cdot A = \rho \cdot A \text{ [N]}, \text{ каде што:}$$

$\rho$  [Pa] - хидростатички притисок во која било точка од долната површина  $A$  на елементарната призма.

За да мирува посматраната елементарна призма од течност, таа мора да биде во статичка рамнотежа. Услов за статичка рамнотежа е збирот на сите сили кои дејствуваат по вертикалната оскa ( $y$ ) да биде еднаков на нула:

$$\sum y = 0; \quad F + G - R = 0$$

Ако ги замениме вредностите за  $F$ ,  $G$  и  $R$ , се добива:

$$\rho_0 \cdot A + H \cdot A \cdot \rho \cdot g - \rho \cdot A = 0$$

Ако сите членови од последната равенка ги поделиме со  $A$ , се добива:

$$\rho_0 + \rho \cdot g \cdot H - \rho = 0$$

Равенката претставува **основна равенка на хидростатиката** и со зборови гласи: вкупниот притисок ( $\rho$ ) во која и да било точка од течност што мирува е еднаков на притисокот што владее врз површината ( $\rho_0$ ), собран со хидростатичкиот притисок на течнoста на висината (длабочината) на која се наоѓа посматраната точка.

$$\rho = \rho_0 + \rho \cdot g \cdot H$$

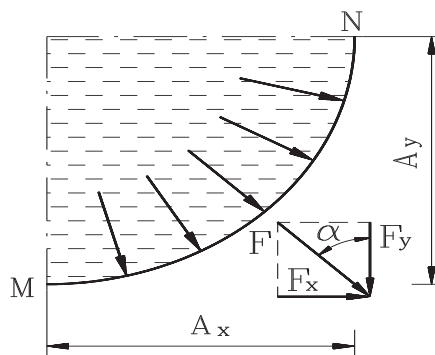
Со основната равенка на хидростатиката може да се дефинира разликата на притисоци во две точки што се наоѓаат на различни височини (длабочини)

$$\rho - \rho_0 = \rho \cdot g \cdot H$$



## 6. ХИДРОСТАТИЧКИ ПРИТИСОК НА КРИВИ ПОВРШИНИ

Пресметката на силата од хидростатичкиот притисок врз криви површини често се среќава во хидрауличните инсталации. Бидејќи таа сила дејствува нормално врз површината во посматраната точка, кај кривите површини се пресметува поинаку отколку кај рамните површини. За пресметување на интензитетот на силата од хидростатичкиот притисок врз крива површина (сл. 7), треба прво да се определат нејзините компоненти (проекции) по хоризонталната  $F_x$  и вертикалната  $F_y$  рамнина.



Сл. 7 Притисок врз крива површина

За таа цел се набљудува дел MN од кривата површина на еден резервоар. Силата од хидростатичкиот притисок дејствува нормално на тангентата од кривата површина во било која нејзина точка. Од досега изнесеното утврдивме дека интензитетот на таа сила изнесува:

$$F = \rho \cdot A \text{ [N]}$$

Бидејќи проекцијата на кривата површина во хоризонтална рамнина е  $A_x$ , а во вертикалната  $A_y$ , нивните големини се пресметуваат со равенките:

$$A_x = A \cdot \cos \alpha \text{ [m}^2\text{]}, \text{ односно: } A_y = A \cdot \sin \alpha \text{ [m}^2\text{]}.$$

Интензитетот на компонентите од вкупната сила на хидростатичкиот притисок се определува со равенките:

$$F_x = p \cdot A_y = p \cdot A \cdot \sin \alpha \text{ [N]}; \quad F_y = p \cdot A_x = p \cdot A \cdot \cos \alpha \text{ [N]}.$$

Вкупната сила од хидростатичкиот притисок врз крива површина се определува според равенката:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{p^2 \cdot A^2 \cdot (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha)} = \sqrt{p^2 \cdot A^2} = p \cdot A \text{ [N]}.$$

Правецот на дејствување врз кривата површина се определува според равенката:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_x}{F_y}$$

### *6.1 Притисок на течности врз сидовите на цевки, цевкини колена и резервоари*

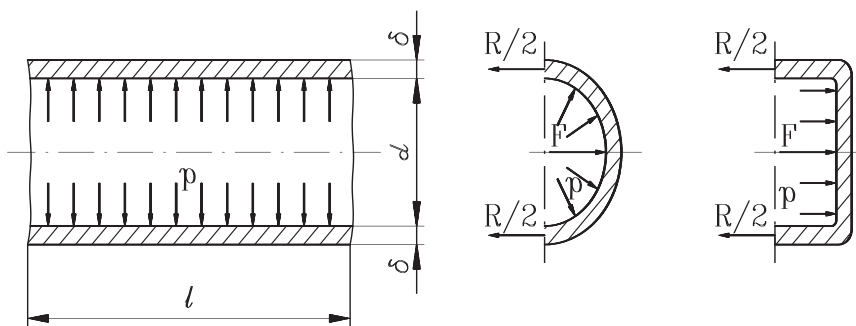
Вкупната сила на хидростатичкиот притисок, која дејствува врз сидот на цевката (кога масата на течноста се занемарува) изнесува:

$$F = p \cdot d \cdot l \text{ [N]}.$$

Површината  $A$  на сидовите од цевката се определува со изразот:

$$A = 2 \cdot \delta \cdot l \text{ [m}^2\text{]}, \text{ каде што:}$$

$d$  – внатрешен дијаметар на цевката,  
 $\delta$  – дебелина на сидот на цевката,  
 $l$  – должина на цевката.



Сл. 8 Притисок врз сидовите на цевки

Хидростатичката сила на притисок предизвикува сила на реакција ( $R$ ) во материјалот од кој е изработена цевката. Таа сила на реакција се определува според равенката  $R = F$  [N], додека нејзината максимална односно гранична вредност се пресметува со помош на изразот:

$$R_{gr} = A \cdot \sigma_{doz} \text{ [N]}, \text{ каде што:}$$

$\sigma_{doz}$  - претставува дозволен напон на развлекување на материјалот од кој е изработена цевката,  
 $A$  [ $m^2$ ] – површина на напречниот пресек.

Од условот за статичка рамнотежа може да се определи дебелината на сидот од цевката:

$$\text{Односно ако е } F = R \text{ следува дека } p \cdot d \cdot l = 2 \cdot \delta \cdot l \cdot \sigma_{doz}$$

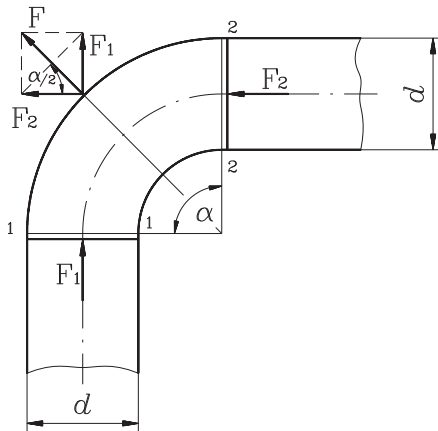
$$\text{Односно } \delta = \frac{p \cdot d}{2 \cdot \sigma_{doz}} \text{ [m]}$$

Вака пресметаната дебелина се зголемува за вредноста на коефициентот  $a$ , кој претставува додаток против корозија. Според тоа, конечната равенка за дебелината на сидот од цевката гласи:

$$\delta = \frac{p \cdot d}{2 \cdot \sigma_{doz}} + a \text{ [m]}$$

Пресметката на хидростатичката сила на притисок кај резервоа рите се врши на ист начин, само што се води сметка дали резервоарот е отворен или затворен. На тој начин се дефинира големината на хидростатичкиот притисок во резервоарот, а со тоа и големината на хидростатичката сила на притисок.

Во цевководите најчесто има кривини (колена) и пресметката на хидростатичката сила на притисок се определува според сл. 9. Во кривината (коленото), под дејство на хидростатичкиот притисок во пресеците 1-1 и 2-2, ќе се појават силите  $F_1$  и  $F_2$  кои се стремат да го изместат коленото од цевководот. Вкупната хидростатичка сила на притисок ( $F$ ) е еднаква на резултантата на силите на прицврстување на коленото со цевководот.



Бидејќи хидростатичкиот притисок  $p$  во цевката е еднаков насекаде, напречниот пресек на цевката исто така, следува дека силите од хидростатичкиот притисок ќе бидат еднакви, т.е.

$$F_1 = F_2 = p \cdot A = p \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \text{ [N].}$$

Сл. 9. Притисок врз колено

Вкупната резултантна сила на хидростатичкиот притисок се добива со геометриско собирање на единечните сили, т.е.

$$F = F_1 + F_2 = 2 \cdot p \cdot \frac{d^2 \pi}{4} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} = p \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{2} \sin \frac{\alpha}{2} \text{ [N],}$$

$$\text{или } F = (F_1 + F_2) \sin \frac{\alpha}{2} \text{ [N]}$$

## 7. ИНСТРУМЕНТИ ЗА МЕРЕЊЕ ПРИТИСОК

За мерење на хидростатичкиот притисок се употребуваат разни инструменти, кои се поделени во две основни групи:

1. Инструменти со течност и
2. Метални (деформациони) инструменти.

### 7.1 Инструменти со течност

Мерењето на хидростатичкиот притисок со овие инструменти се сведува на мерење на висината на течниот столб, кој настанува поради разликата на притисоци. Со тие инструменти може да се мерат атмосферскиот притисок (барометар), натпритисок (манометар) и потпритисок (вакуумметар).

Сите инструменти со течност имаат едноставна конструкција, а како работна течност се употребува жива, дестилирана вода или етилалкохол.

**Барометарот** (сл. 10) служи за мерење на атмосферскиот притисок. Како работна течност најчесто се користи жива. Во отворена та стаклена чаша 1 наполнета со жива, е потопена тенка цевка 2, која претходно, исто така е наполнета со жива. Цевката има должина од 1 [m], а горниот крај и е затворен.

Празниот простор (горе), кој се создава со превртување на цевката е исполнет со пара од живата и во тој простор се смета дека притисокот е приближно еднаков на нула.

Мерењето на атмосферскиот притисок се сведува на мерење на висината ( $h$ ) на течноста во цевката. Тоа се врши на следниов начин:

Апсолутниот притисок во точката А (на површината на течноста во цевката) изнесува:

$$p_A = p_{at} - \rho \cdot g \cdot h \text{ [Pa]}.$$

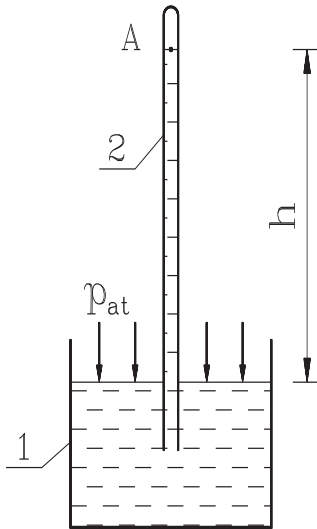
Пред членот  $\rho \cdot g \cdot h$  во горната равенка се зема знакот (-), бидејќи висината на течниот столб во тенката цевка се мери во спротив на насока од нивото на чашата (во негативна насока).

Цевката и чашата претставуваат сврзани садови и во рамнината на слободната површина имаат еднаков притисок, односно:

$$p_A + \rho \cdot g \cdot h = p_{at}$$

Бидејќи претходно констатиравме дека притисокот над нивото на течност во цевката изнесува приближно нула, ( $p_A \approx 0$ ) следува дека:

$$p_{at} = \rho \cdot g \cdot h \text{ [Pa]}, \text{ или } h = \frac{p_{at}}{\rho \cdot g} \text{ [m]}.$$



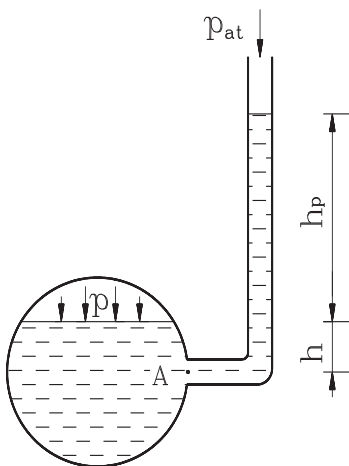
Сл. 10 Барометар

Ако врз слободната површина на течност во чашата дејствува атмосферски притисок  $p_{at} = 101337 \text{ [Pa]}$ , а густината на живата е  $\rho = 13547 \text{ [kg/m}^3]$ , тогаш висината на течниот столб ќе биде:

$$h = \frac{P_{at}}{\rho \cdot g} = \frac{101337}{13547 \cdot 9.81} = 0,763 \text{ [m]}$$

Ако пак течноста во чашата (1) и во тенката цевка е вода со  $\rho = 998,2 \text{ [kg/m}^2]$ , при истите услови, висината на водениот столб изнесува:

$$h = \frac{P_{at}}{\rho \cdot g} = \frac{101337}{9792,342} = 10,349 \text{ [m]}$$



Сл.11 Манометар со течност

Освен за мерење на атмосферскиот притисок во техниката, барометарот може да се употребува и за мерење на потпритисок.

**Манометарот** (Сл. 11) служи за мерење на натпритисок. Натпритисокот се

мери со помош на висината на течниот столб ( $h_p$ ) во стаклена цевка со дијаметар до 5 [mm]. Ако притисокот ( $p$ ) на површината на садот со течност е поголем од атмосферскиот притисок,

тогаш течноста ќе се подигне во цевката над нивото во садот за висина ( $h_p$ ). Големината на притисокот во точката (A), која се наоѓа во пресекот меѓу садот и цевката, се определува на следниов начин:

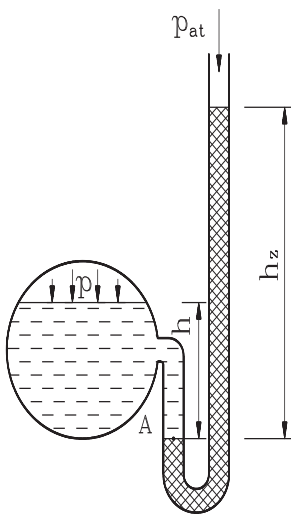
1. Гледано од десната страна, хидростатичкиот притисок во точката A изнесува:

$$p_A = p_{at} + \rho \cdot g \cdot (h_p + h) \text{ [Pa]}$$

2. Гледано од левата страна, истиот притисок изнесува:

$$p_A = p + \rho \cdot g \cdot h \text{ [Pa].}$$

Големината на хидростатичкиот притисок во точката A треба да биде еднаков, независно од која страна се гледа. Со изедначувањето на вредностите од претходните равенки се добива:



Сл.12 Живин манометар

$$p_{at} + \rho \cdot g \cdot (h_p + h) = p + \rho \cdot g \cdot h,$$

$$p_{at} + \rho \cdot g \cdot h_p + \rho \cdot g \cdot h = p + \rho \cdot g \cdot h,$$

$$p = p_{at} + \rho \cdot g \cdot h_p = p_{at} + p_m.$$

Од последната равенка се гледа дека висината на течниот столб (висина на подигање)  $h_p$  во цевката го карактеризира натпритисокот ( $p_m$ ) во садот и служи за негово мерење.

За мерење на поголеми вредности на натпритисокот, како работ на течност во манометарот се користи жива која има многу поголема густина од другите течности. Со тоа се постигнува и многу помала висина (должина) на стаклената цевка и манометарот има покомпактна конструкција.

На сл.12 е претставен живин манометар со U-цевка. Под дејство на притисокот ( $p$ ) во садот со течност, живата во U-цевката се подига за висина  $h_z$ . Притисокот во точката A, всушност е

притисок на течноста во садот што се мери, а се определува на следниов начин:

- гледано од десната страна:

$$p_A = p_{at} + \rho_z \cdot g \cdot h_z \quad [\text{Pa}],$$

- гледано од левата страна:

$$p_A = p + \rho \cdot g \cdot h \quad [\text{Pa}].$$

Со изедначување на вредностите за  $p_A$ , се добива:

$$p = p_{at} + \rho_z \cdot g \cdot h_z - \rho \cdot g \cdot h = p_{at} + g(\rho_z \cdot h_z - \rho \cdot h) \quad [\text{Pa}],$$

каде што:  $\rho_z$  – густина на живата,  
 $\rho$  - густина на течноста во резервоарот.

Натпритисокот, кој се мери со манометарот, изнесува:

$$p_m = g(\rho_z \cdot h_z - \rho \cdot h) \approx g \cdot \rho_z \cdot h_z \quad [\text{Pa}], \quad \text{кога е } \rho \ll \rho_z$$

**Вакуумметарот** (сл. 13) се употребува за мерење на потпритисок. По конструкција е сличен на манометарот со жива. Во U-цевката има жива, а таа се поврзува со садот В во кој се мери големината на притисокот ( $p$ ). Ако притисокот ( $p$ ) во садот е помал од атмосферскиот притисок, тогаш живата во U-цевката се поместува кон садот. Висината на живиниот столб ( $h_z$ ), со која се мери големината на потпритисокот, се определува на следниот начин:

$$p_{at} = p + h_z \cdot \rho_z \cdot g \quad [\text{Pa}], \quad \text{односно:}$$

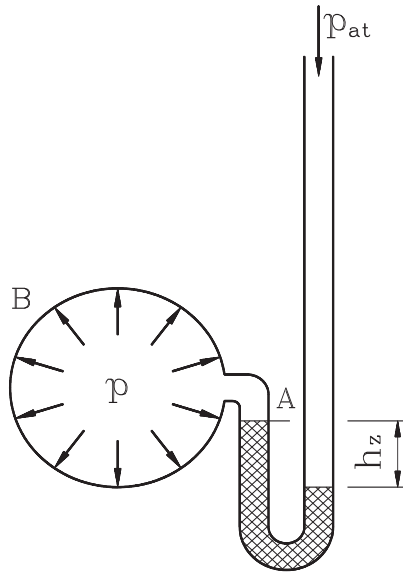
$$p = p_{at} - h_z \cdot \rho_z \cdot g \quad [\text{Pa}], \quad \text{бидејќи:}$$

$$\rho_z \cdot g \cdot h_z = p_{at} - p \Rightarrow h_z = \frac{p_{at} - p}{\rho_z \cdot g} \quad [\text{m}], \quad \text{односно:}$$



$$p_V = h_z \cdot \rho_z \cdot g \text{ [Pa].}$$

Со последната равенка констатираме дека потпритисокот (вакуумот) се определува со мерење на висината на живиниот столб ( $h_z$ ).



Сл.13 Вакуумметар

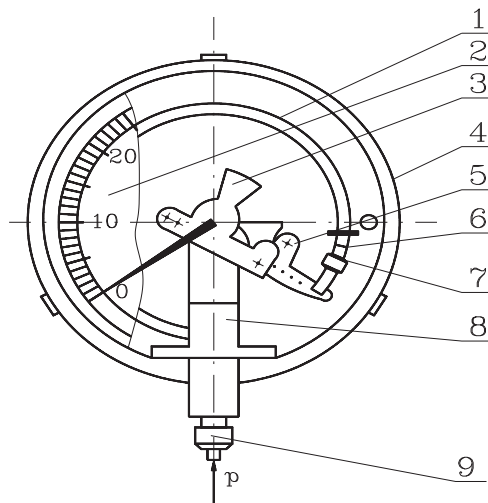
## 7.2 Метални (деформациони) инструменти

Металните инструменти многу повеќе се применуваат за мерење на натпритисок кај течности, гасови и пара. Се одликуваат со едноставна конструкција, а со нив може да се мери натпритисок и до 60 [MPa]. Овие инструменти се наречени деформациони, бидејќи принципот на мерење се базира на мерење на деформацијата на пружината, мембраната или друг елемент, која се предизвикува од промената на притисокот.

**Металниот манометар со пружина** (сл.14) се применува за мерење на притисок. Манометарот најчесто е сместен во кутија со кружна форма 4, во која е свиткана метална цевка 1 од бакар, бронза или челик.

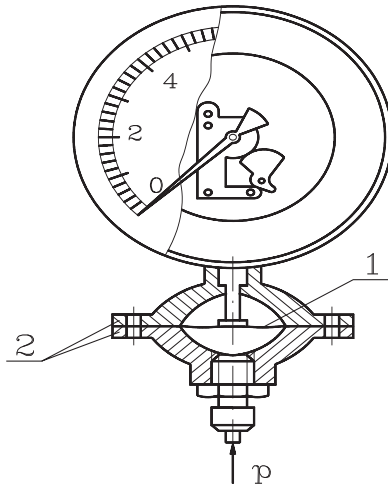
Затворениот крај на цевката (6) е поврзан со преносниот механизам (5) и (7), а другиот (отворениот) крај на цевката е поврзан со потпирачот (8) и чаурата (9). На преносниот механизам е поставена подвижна стрелка (3), која може да се движи по изгравираниот скала (2). Со помошна чаурата (9), манометарот се поврзува со садот во кој се наоѓа флуид под притисок. Под дејство на притисокот свитканата цевка сака да се исправи. Притоа, затворениот крај (6) се поместува, а поместувањето преку преносниот механизам (5) и (7), ја задвижува стрелката (3). Поместувањето на стрелката се регистрира на скалата (2) како големина на притисокот во садот. Како единици за мерење, со кои се гравира скалата, најчесто се употребуваат [kPa] или [bar].

Во зависност од материјалот од кој е изработена свитканата цевка, се ограничува употребата на манометарот. За мерење на високи притисоци цевката се изработува од челик, а за мерење на средни или ниски притисоци, се изработува од бронза или бакар.



Сл. 14 Метален манометар со пружина

**Металниот манометар со мембрана** (сл.15) се состои од челична брановидна мембрана (1), која е стегната меѓу прирабницата (2).



Сл. 15 Метален манометар со мембрана

Манометарот се поврзува со садот чиј притисок се мери. Под дејство на притисокот ( $p$ ) мембраната се свиткува (деформира) нагоре, а нејзината деформација преку преносниот механизам ја поместува стрелката. На гравираната скала стрелката покажува колкав е притисокот во садот. Обично манометрите со мембрана се употребуваат за мерење притисоци од 20 [kPa] до 3 [MPa].

## 8. ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА ГУСТИНАТА НА ТЕЧНОСТИ СО ПОМОШ НА ТЕЧЕН СТОЛБ

Густината на течност со помош на течен столб се определува со помош на U-цевка на два начина:

1. Ако течностите не се мешаат меѓусебно, тогаш U-цевката е исправена со отворените краеве нагоре (сл.16). Течностите со кои се полни U-цевката имаат различни густини ( $\rho_1$ ) и ( $\rho_2$ ), се допираат во рамнината A - A. За да се определи големината на густината на течноста, се поставуваат равенките за апсолутен притисок од двете страни на рамнината A - A. Гледано од левата страна на U-цевката, равенката гласи:

$$p = p_{at} + \rho_1 \cdot g \cdot h_1 [\text{Pa}]$$

Гледано од десната страна равенката гласи:

$$p = p_{at} + \rho_2 \cdot g \cdot h_2 [\text{Pa}]$$

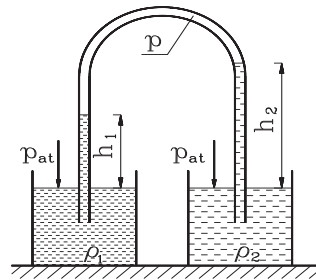
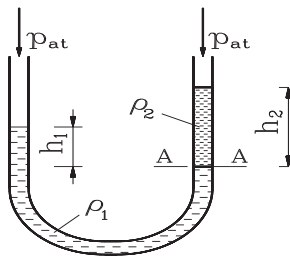
Со изедначување на двете равенки се добива:

$$p_{at} + \rho_1 \cdot h_1 \cdot g = p_{at} + \rho_2 \cdot h_2 \cdot g$$

Со средување на равенката се добива:

$$\rho_1 \cdot h_1 = \rho_2 \cdot h_2, \text{ односно } \rho_1 = \frac{\rho_2 \cdot h_2}{h_1}, \text{ или } \rho_2 = \frac{\rho_1 \cdot h_1}{h_2}$$

2. Ако течностите со коишто се полни U-цевката меѓусебно се мешаат, тогаш U-цевката се превртува со отворените краеве во садовите со соодветни течности (Сл. 17). Во U-цевката течностите ќе се исклучат до висини  $h_1$  и  $h_2$ . Ако притисокот во цевката над течноста изнесува  $p$ , густините на течностите ( $\rho_1$  и  $\rho_2$ ) се пресметуваат на следниот начин:



Сл. 16 U-цевка

Сл. 17 Сврзани садови со U-цевка

Притисокот врз површината на течноста во садот од левата страна е:

$$p_{at} = p + h_1 \cdot \rho_1 \cdot g$$

а од десната страна е:

$$p_{at} = p + h_2 \cdot \rho_2 \cdot g$$

Со изедначување на равенките од левата и десната страна се добива:

$$p + \rho_1 \cdot g \cdot h_1 = p + \rho_2 \cdot g \cdot h_2, \text{ или } \rho_1 \cdot h_1 = \rho_2 \cdot h_2$$

Од последното равенство може да се определи вредноста на густините на течностите во левиот, односно десниот сад.

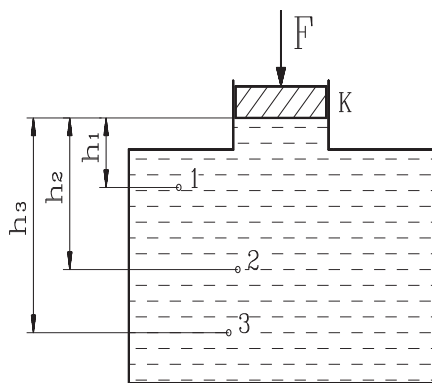
$$\rho_1 = \frac{\rho_2 \cdot h_2}{h_1} \text{ или } \rho_2 = \frac{\rho_1 \cdot h_1}{h_2}$$

### 9. ПАСКАЛОВ ЗАКОН

Ако сад наполнет со течност се затвори со клип  $K$  и врз клипот се дејствува со надворешна сила  $F$ , тогаш во течноста се создава притисок кој изнесува:

$$p = \frac{F}{A} \text{ [Pa]}$$

Со помош на основната равенка на хидростатиката може да се определи големината на хидростатичкиот притисок во која било точка од течноста (Сл. 18)



$$p_1 = p + \rho \cdot g \cdot h_1;$$

$$p_2 = p + \rho \cdot g \cdot h_2;$$

$$p_3 = p + \rho \cdot g \cdot h_3;$$

.....

$$p_n = p + \rho \cdot g \cdot h_n.$$

Сл. 18 Хидростатички притисок

Во претходните равенки за големината на хидростатичкиот притисок се гледа дека се состои од две големини, хидростатички притисок од сопствената маса на течноста  $\rho \cdot g \cdot h$ , плус големината на притисокот пре дизвикан во течноста поради дејствување на

надворешна сила  $F$ . Според тоа, може да се заклучи дека притисокот, кој се предизвикува во течноста под дејство на надворешна сила, рамномерно се пренесува низ неа насекаде без никакви проме ни. Тој заклучок го констатираше Паскал и во физиката е познат како **Паскалов закон**, односно *големината на силата на притисокот, која дејствува на одредена површина е пропорционална со големината на таа површина*. Паскаловиот закон најдобро се илустрира со примерот на сврзани садови, сл. 19.

Од десната страна на потесниот сад, под влијание на надворешната сила ( $F_1$ ) во течноста се предизвикува притисок ( $p$ ), кој изнесува:

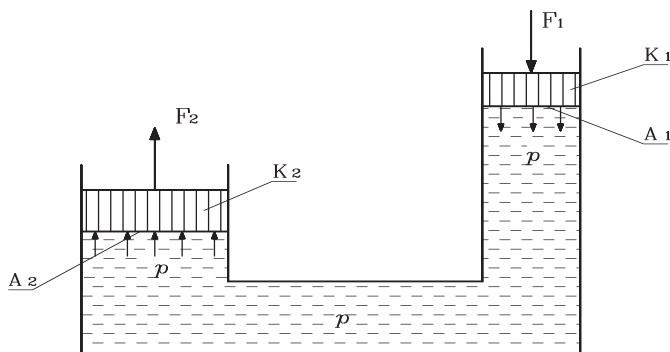
$$p = \frac{F_1}{A_1} \text{ [Pa]}$$

Според Паскаловиот закон, тој притисок се пренесува насекаде низ течноста, односно и во поширокиот дел на садот. Со тој притисок течноста ќе дејствува на клипот ( $K_2$ ) од долната страна со хидростатичка сила ( $F_2$ ). Големината на таа сила може да се опре дели од равенката:

$$p = \frac{F_2}{A_2} \text{ [Pa]}, \text{ односно } F_2 = p \cdot A_2 \text{ [N]}.$$

Од сликата и равенките, може да се констатира дека силата на притисок ( $F_2$ ) ќе биде онолку пати поголема од силата ( $F_1$ ) колку што е поголема површината ( $A_2$ ) од површината ( $A_1$ ).

Паскаловиот закон е еден од основните закони на хидрауликата и има голема практична примена кај хидрауличните преси, хидрауличните дигалки, хидрауличниот систем за сопирање кај моторните возила, разни уреди или алати за стегање итн.



Сл.19 Сврзани садови

## 10. ХИДРАУЛИЧНИ МАШИНИ И ПРИНЦИП НА РАБОТА НА

### 10.1 Хидраулична преса

Хидрауличната преса се состои од два сврзани сада со различни напречни пресеци  $A_1$  и  $A_2$ . Садовите се наполнети со течност и затворени со подвижни клипови  $K_1$  и  $K_2$ . Ако на клипот  $K_1$  се дејствува со сила  $F_1$ , во течноста се предизвикува хидростатички притисок  $p$ :

$$p = \frac{F_1}{A_1} = \frac{4 \cdot F_1}{d_1^2 \cdot \pi}$$

Според Паскаловиот закон, истиот притисок ќе се пренесе низ течноста до клипот  $K_2$  и на него ќе дејствува со сила:

$$F_2 = p \cdot A_2 = \frac{p \cdot d_2^2 \cdot \pi}{4}$$

Односот на силите изнесува:

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

Тоа покажува дека интензитетот на силите на притисок врз клиповите се однесува право пропорционално со квадратите на дијаметрите од клиповите. За пример, да усвоиме дека  $d_2 = 10$  [mm], а  $d_1 = 2$  [mm], ќе се добие дека  $F_2 / F_1 = 100 / 4 = 25$ , односно  $F_2$  ќе биде 25 пати поголема од  $F_1$ .

Ако клипот  $K_1$  се помести за растојание  $s_1$  надолу под дејство на силата  $F_1$ , волуменот на истиснатата течност изнесува:

$$V = A_1 \cdot s_1 = \frac{d_1^2 \cdot \pi}{4} \cdot s_1 \text{ [m}^3\text{]}$$

Поместувањето на клипот  $K_1$  ќе предизвика поместување на клипот  $K_2$  во спротивна насока за растојание  $s_2$  при што поместените волумени на течноста ќе бидат еднакви.

$$V = A_2 \cdot s_2 = \frac{d_2^2 \cdot \pi}{4} \cdot s_2 \text{ [m}^3\text{]}$$

Бидејќи волуменот на истиснатата течност во двата дела од садот е еднаков, со изедначување на равенките се добива:

$$\frac{d_1^2 \cdot \pi}{4} \cdot s_1 = \frac{d_2^2 \cdot \pi}{4} s_2, \text{ односно:}$$

$$d_1^2 \cdot s_1 = d_2^2 \cdot s_2 \quad \text{и} \quad \frac{s_1}{s_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$

Тоа покажува дека поместувањето на клиповите се однесува обратнопропорционално со квадратите на нивните пресеци.

Од друга страна може да се изрази зависноста од поместувањето преку извршената работа на следниов начин: Бидејќи односот на силите беше еднаков со односот на квадратите на

дијаметрите,  $\frac{F_2}{F_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$ , како и односот на поместувањата  $\frac{s_1}{s_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$ ,

следе дека:

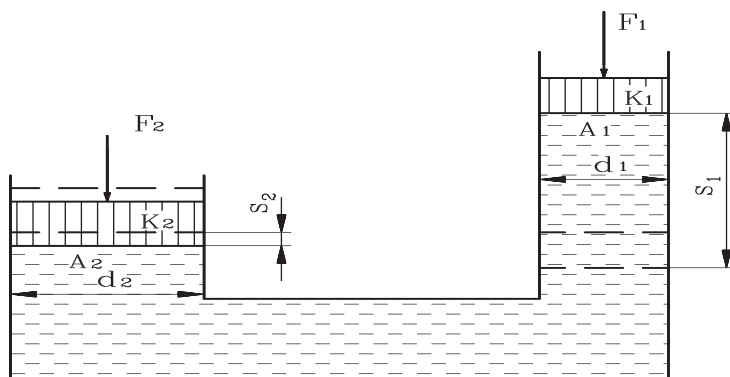
$$\frac{d_2^2}{d_1^2} = \frac{F_2}{F_1} = \frac{s_1}{s_2}, \text{ односно: } F_2 \cdot s_2 = F_1 \cdot s_1.$$

Значи, извршената работа од едната и другата страна на сврзаните садови ќе биде еднаква. Извршената работа претставува производ меѓу силата  $F_1$  односно  $F_2$  и поместувањето  $s_1$  односно  $s_2$  на клипот  $K_1$  односно  $K_2$ .



Пресметките се веродостојни ако се занемари триењето меѓу сидовите на садот и клиповите.

На Сл. 20 е претставена шема на хидраулична преса, која се состои од два сврзани сада со различни кружни напречни пресеци.



Сл. 20 Хидраулична преса

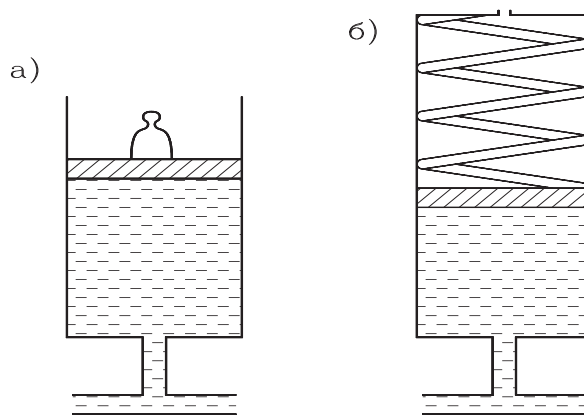
## 10.2 Хидрауличен акумулатор

**Хидрауличните акумулатори** се елементи од хидрауличниот систем во кои се акумулира дел од работната течност кога во системот не се употребува целата количина. Кога хидрауличниот систем работи со полн капацитет и во моментите кога треба да се оствари максимална енергија, работната течност од акумулаторот се враќа во системот при што се постигнува поголем проток, а со тоа и максимална енергија. Кога нема потреба од максимална енергија во акумулаторот се враќа дел од работната течност. Акумулаторите особено се корисни за системи кои работат повремено со максимален, а редовно со намален капацитет. Инаку, хидрауличните акумулатори служат и како извор на енергија, кога пумпата за кратко време ќе престане да работи. Тогаш од акумулаторите се надополнува потребната количина од работна течност. Исто така, при мали дефекти (пукната цевка или вентил, замена на заптивни прстени), или при бавно истекување на течноста, акумулаторите ја надополнуваат изгубената (намалената) количина. Голема корист од акуму

латорот има хидрауличниот систем за време на хидрауличен удар, бидејќи акумулаторот може целосно да го амортизира. Според начинот на кој се истиснува работната течност од хидрауличните акумулатори, тие се делат на:

- 1) Акумулатори со тег,
- 2) Акумулатори со пружина и
- 3) Акумулатори со гас.

Хидрауличниот **акумулатор со тег** (сл. 21а) во поново време ретко се употребува поради гломазната конструкција. Инаку, тоа се работни цилиндри со клип врз кој се поставени тегови за да се држи течноста под работен притисок. Во почетокот, кога се полни хидрауличниот систем со работна течност, се полни и акумулаторот, при што клипот под дејство на работниот притисок се подига нагоре. Кога системот ќе има потреба од максимална енергија, од акумулаторот за кратко време, под дејство на масата на тегот, се пушта целата количина на работна течност во хидрауличниот систем. На тој начин се зголемува протокот и брзината на струење на работната течност, а со тоа се постигнува максимална енергија.



Сл. 21 Хидрауличен акумулатор со тег и пружина

Хидрауличниот **акумулатор со пружина** (сл. 21б) функционира на сличен принцип и има робусна конструкција. Разликата се состои во тоа што тегот е заменет со пружина. Работната течност се држи под притисок со помош на пружината која се збива при полнење на акумулаторот од хидростатичката сила на

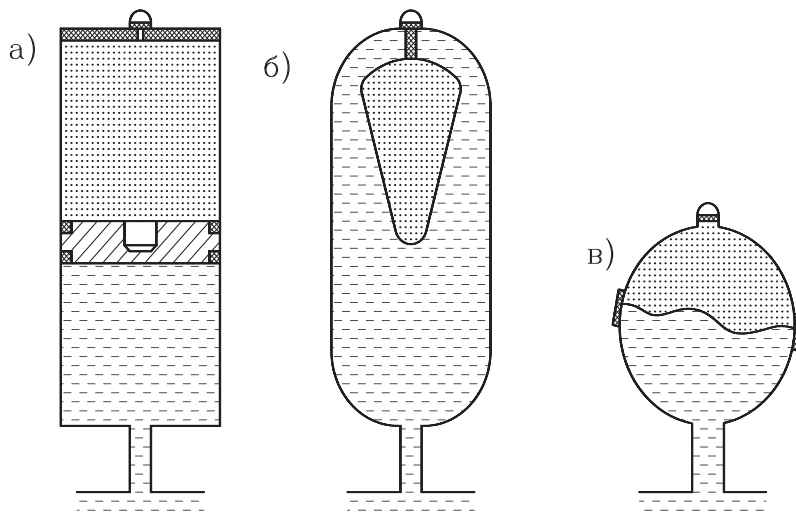
притисок на течноста. При потреба од максимална енергија во системот, течноста под дејство на силата од пружината, за кусо време, се истиснува во хидрауличниот систем и на тој начин овозможува поголем проток низ него и остварување на максимална енергија. За поголеми акумулатори и работни притисоци, пружината треба да има големи димензии што ќе предизвика гломазна конструкција на акумулаторот, па затоа тој најчесто е незгоден за користење.

**Акумулаторите со гас** (сл. 22) денес често се употребуваат поради едноставната конструкција и неограничениот век на гасот. Според изведбата, акумулаторите со гас се делат во две групи:

1. без елемент за разделување на течноста и гасот,
2. со елемент за разделување на течноста и гасот (клип или мембрана).

Обично се користат акумулатори со елемент за разделување, а најчесто се употребуваат инертните гасови или азот. Бидејќи гасовите се многу стислива материја, при полнењето на акумулаторот со работна течност, тие се збиваат во многу мал волумен од садот, при што им се зголемува притисокот. При потреба на системот од максимална енергија, под дејство на притисокот од гасот, работната течност за многу кусо време се истиснува во системот, зголемувајќи го протокот и брзината на струење на работната течност. На сл. 22а е претставен хидрауличен акумулатор со клип, на сл. 22б со воздушен меур, а на сл. 22в акумулатор со мембрана.

Изборот на хидрауличните акумулатори зависи од основните параметри на хидрауличниот систем. Обично производителот препорачува дијаграми за избор на акумулатор според работните карактеристики на системот.



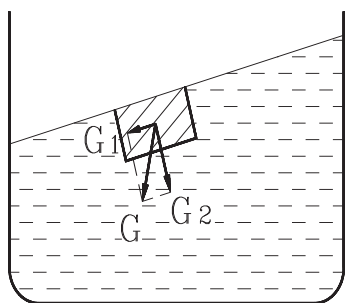
Сл. 22 Хидраулични акумулатори со гас

## 11. КАРАКТЕРИСТИКИ НА ПОВРШНИ НА ТЕЧНОСТИ СО ЕДНАКВИ ПРИТИСОЦИ

При анализата на површини на течности со еднакви притисоци се среќаваме со три различни состојби, и тоа:

1. Површина на течност во сад кој мирува (не се движи),
2. Површина на течност во сад кој се движи забрзано и
3. Површина на течност во сад кој ротира.

### 11.1 Површина на течност во сад кој мирува (не се движи)



Сл. 23 Сад што мирува

На течноста во садот кој мирува дејствува само силата на Земјината тежа.

Ако површината на течноста е коса, како на сл. 23 се врши анализа колкава ќе биде силата од влијанието на Земјината тежа. Ако се издвои само дел од течноста со маса  $G$ , која дејствува вертикално надолу во однос на садот, се добива дека во однос на

површината на течноста, силата од масата  $G$  може да се разложи на две компоненти и тоа:

$G_1$ —хоризонтална компонента, која дејствува паралелно со површината на течноста и се стреми делот од течноста да го помести во правецот на дејствување,

$G_2$ —вертикална компонента, која дејствува нормално на површината на течноста.

Елементарниот дел од течноста ќе биде во рамнотежа само ако хоризонталната компонента  $G_1 = 0$ , односно ако вертикалната компонента дејствува во правец на вкупната сила  $G$ . Тоа ќе се случи само ако површината на течноста што мирува е во хоризонтална положба. Ако се земе предвид дека кај отворените садови врз површината на течноста секогаш дејствува атмосферскиот притисок нормално врз површината, може да се констатира дека неговото дејство нема влијание на обликот на површината. Кај големите водени површини (езера и мориња), силата на Земјината тежа дејствува кон центарот на Земјата. Тие површини се дел од Земјината топка, но секогаш изгледаат како хоризонтална рамнина, па оттаму потекнува изразот “водорамен”. Ако на течноста, покрај влијанието на земјината тежа дејствува и друга сила, на пример силата на инерција, центрифугалната сила итн., тогаш површината на течноста секогаш ќе биде нормално поставена во однос на резултантната сила која дејствува врз течноста.

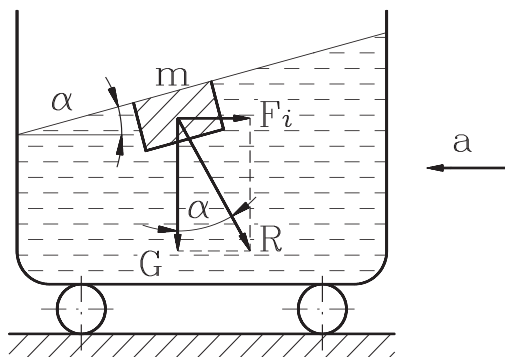
### *11.2. Површина на течност во сад што се движи со праволиниско забрзување*

Ако сад со течност се движи праволиниски (сл. 24) со рамномерно забрзување  $a$ , тогаш рамнотежата на течноста во однос на садот зависи од дејството на следниве сили:

1. Сила на Земјината тежата  $G = m \cdot g$  и
2. Инерцијална сила  $F_i = m \cdot a$ .

Резултантната сила ќе изнесува:

$$R = \sqrt{G^2 + F_i^2} = \sqrt{(mg)^2 + (ma)^2} = m\sqrt{g^2 + a^2}$$



Сл. 24 Сад што се движи праволиниски

Таа резултантна сила ќе биде под агол  $\alpha$  спрема вертикалата. Од триаголникот на силите произлегува дека:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_i}{G} = \frac{m \cdot a}{m \cdot g} = \frac{a}{g}$$

Од последната равенка се гледа дека големината на аголот  $\alpha$  спрема хоризонталната рамнина исклучително зависи од големината на забрзувањето ( $a$ ).

### 11.3 Површина на течност во сад кој ротира околу вертикална оска

Ако течноста се наоѓа во сад кој ротира околу вертикална оска (сл. 25), тогаш на дел од течноста со маса  $m$  дејствуваат силите:

- а. Силата на масата, вертикално надолу,

$$G = m \cdot g$$

- б. Центрифугална сила  $F_C$ , која настанува како последица од ротацијата и има правец на радиусот на ротацијата ( $r$ ):

$$F_C = m \cdot r \cdot \omega^2$$

Вкупната резултантна сила  $R$  дејствува нормално на површината на течноста. Интензитетот на центрифугалната

сила  $F_c$  се зголемува со зголемувањето на радиусот  $r$ , а со тоа се зголемува и стрмнината на површината на течноста.

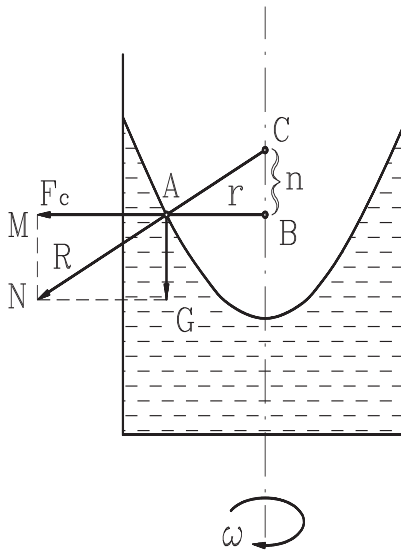
Од сличноста на триаголници те ABC и AMN произлегува:

$$n : r = G : F_c$$

Од тој однос за растоја нието  $n$  се добива:

$$n = \frac{G \cdot r}{F_c} = \frac{m \cdot g \cdot r}{m \cdot r \cdot \omega^2} = \frac{g}{\omega^2}$$

Од последната равенка произлегува: ако големината на аголната брзина е константна вредност ( $\omega = \text{const}$ ), тогаш и вредноста на должината  $n$  ќе биде константна големина. Единствено параболата е крива линија со таква карактеристика чија субнормала  $n$  има константна големина.



Сл.25 Сад со течност кој ротира

Затоа, површината на течноста, која ротира околу вертикална оска, образува ротационен параболоид.

## 12. РАМНОТЕЖА НА ТЕЛА ПОТОПЕНИ ВО ТЕЧНОСТ И СТАБИЛНОСТ НА ТЕЛА ШТО ПЛИВААТ

### 12.1 Пливање на телата

На Сл. 26 е претставено тело со произволна форма потопено во течност. Ако потопеното тело има маса  $m$ , тогаш силата на масата ( $G$ ), која дејствува во тежиштето на телото вертикално надолу изнесува:

$$G = m \cdot g \text{ [N]},$$

Силата на хидростатичкиот притисок од течноста дејствува на потопеното тело со интензитет еднаков на масата на истиснатата течност. Таа сила дејствува вертикално нагоре во тежиштето на истиснатата течност и изнесува:

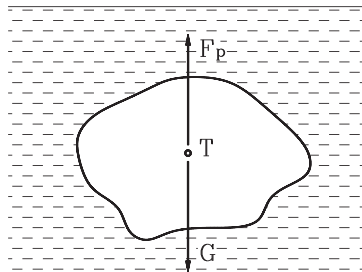
$$F_p = V \cdot \rho \cdot g \text{ [N]}, \text{ каде што:}$$

$V[m^3]$  – е волуменот на потопеното тело

$\rho[kg]$  – е густината на течноста.

Бидејќи силата  $F_p$  го потиска потопеното тело нагоре е, таа е наречена *хидростатички потисок*. Еднаквоста на силата на потисок со масата на истиснатата течност ја докажал Архимед (287-212) година пр.н.ера формулирајќи го како *Архимедов закон* кој гласи: **Секое тело потопено во течност губи од својата тежина онолку колку што изнесува волуменот на истиснатата течност**. Според тој закон, привидната маса на тело потопено во течност изнесува:

$$G_1 = G - F_p = m \cdot g - \rho \cdot g \cdot V \text{ [N]}$$



Сл. 26 Тело потопено во течност

## 12.2 Рамнотежа на телата потопени во течност

За телата потопени во течност можни се три карактеристични случаи:

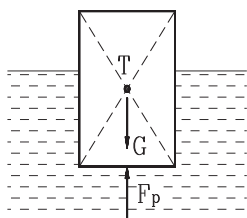
1. Ако масата на телото е поголема од хидростатичкиот потисок ( $G > F_p$ ) тогаш телото пропаѓа и потонува до дното на течноста,
2. Ако масата на телото е еднаква со силата на хидростатичкиот потисок ( $G = F_p$ ), тогаш телото ќе исплива на површината на течноста и ќе плови врз неа.
3. Ако масата на телото е помала од силата на хидростатичкиот потисок ( $G < F_p$ ), тогаш телото ќе исплива на површината на течноста.



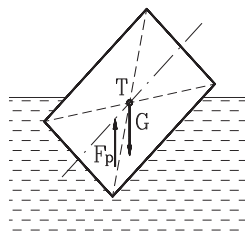
ната од течноста се додека не се изедначат масата на телото со силата на хидростатичкиот потисок.

За рамнотежа на телата потопени во течност, односно тела што пливаат, треба да бидат исполнети два услова:

- силата од масата на телото да биде еднаква со силата од хидростатичкиот потисок ( $G = F_p$ ),
- силата од масата на телото ( $G$ ) да дејствува по иста вертикала со силата на хидростатичкиот потисок ( $F_p$ ) (сл. 27).



Сл. 27 Рамнотежна положба

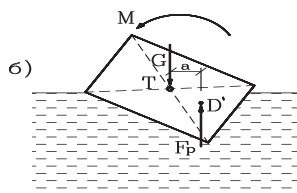
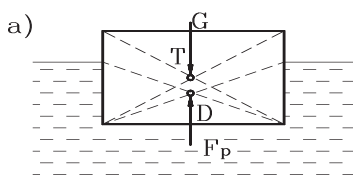


Сл. 28 Нерамнотежна положба

Ако центарот на тежиштето на телото што плива ( $T$ ) и нападната точка на силата на хидростатичкиот потисок ( $D$ ) не лежат на иста вертикална линија, тогаш силите  $G$  и  $F_p$  ќе тежат да го завртат телото, односно телото нема да биде во рамнотежна положба (Сл. 28).

### 12.3 Стабилност на телата што пливаат

Ако се исполнети двата услова за пливање на телата, не значи дека телото ќе плива стабилно. Врз стабилноста на телата што пливаат секогаш имаат влијание и надворешните сили кои се стремат да го изместат телото од рамнотежната положба. За да се испита влијанието на надворешните сили врз стабилноста на телото што плива, се замислува телото малку да е завртено од првобитната рамнотежна положба (Сл. 29б).



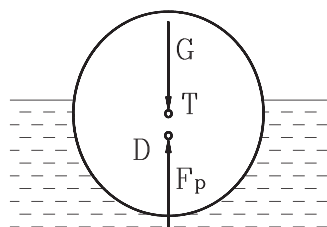
Сл. 29 Стабилност при пливање

Силата од масата на телото  $G$  и тогаш ќе дејствува во тежиштето на телото ( $T$ ), а силата на хидростатичкиот потисок ( $F_p$ ) ќе дејствува во изместената нападна точка ( $D'$ ), која претставува тежиште на истиснатата течност во новата положба. Интензитетот на силите од масата  $G$  и хидростатичкиот потисок  $F_p$  се еднакви, но тие сили не дејстуваат по иста вертикална линија. Правците на дејствување се оддалечени за растојание  $a$  и затоа создаваат момент на сили кој се стреми да го врати телото во првобитната рамнотежна положба. Тој момент изнесува:

$$M = G \cdot a \text{ [Nm]}$$

За тело кое е изместено од првобитната рамнотежна положба и самостојно се враќа во првобитната положба, се вели дека плива стабилно.

За тело кое е изместено од рамнотежна положба и не може само стојно да се врати во првобитната рамнотежна положба, туку продолжува да се навалува сè додека не се преврти, се вели дека плива лабилно.



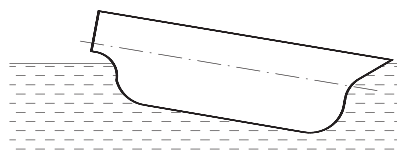
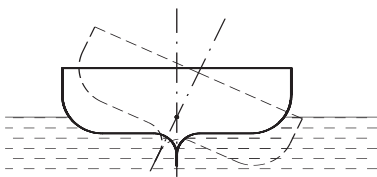
Сл. 30 Индиферентна рамнотежна положба

Ако, пак, телото што плива е со цилиндрична или форма на топка, тогаш тоа како и да се превртува останува во рамнотежна положба. Таквите тела пливаат во индиферентна положба бидејќи влијанието на надворешните сили не може да ги измести од рамнотежната положба. На сл. 30 е претставено тело со форма на топка. Како заклучок од досега изнесеното за пливање на телата може да се констатира дека постојат три карактеристични положби: **стабилна, лабилна и индиферентна**. Способноста на телата да се вратат во првобитната стабилна положба, по изместувањето под влијание на надворешните сили, е наречена стабилност при пливање на телата. Таа способност има особена важност за стабилноста на пловните објекти (чамци, бродови...). Кај сите тие објекти се разликуваат два вида на стабилност: напречна и надолжна стабилност.

**Напречна стабилност** е кога едната бочна страна е подигната во однос на другата (сл. 31а)

**Надолжна стабилност** е кога едниот крај на објектот е подигнат во однос на другиот (сл. 31б)

Од напречната и надолжната стабилност многу поголемо практично значење има напречната стабилност. Надворешните сили на ударите на брановите и притисокот од ветерот го нишаат објектот што плива. Стабилно пливање ќе се одвива ако моментот што се појавува при навалување на објектот одржува рамно тежа со моментот што го создаваат надворешните сили.



Сл. 31а Напречна стабилност Сл. 31б Надолжна стабилност

На сл. 32 е претставен напречен пресек на брод во наведената положба.

Моментот на стабилност изнесува:

$$M = G \cdot a \text{ [Nm]}$$

Иако волуменот на истиснатата течност ќе биде еднаков со волуменот во рамнотежна (исправена) положба, нападната точка од силата на хидростатичкиот потисок не останува на оската на пливањето, туку се поместува во точката (D'). Силата на хидростатичкиот потисок ќе дејствува вертикално нагоре и ја сече оската на пливањето на бродот во точката (M), која се вика **метацентар**. Растојанието  $r$  помеѓу нападната точка на хидростатичкиот потисок (D) и метацентарот (M) се вика метацентричен радиус ( $r$ ) (сл. 32).

За приближна пресметка на метацентричен радиус ( $r$ ) се применува равенката:

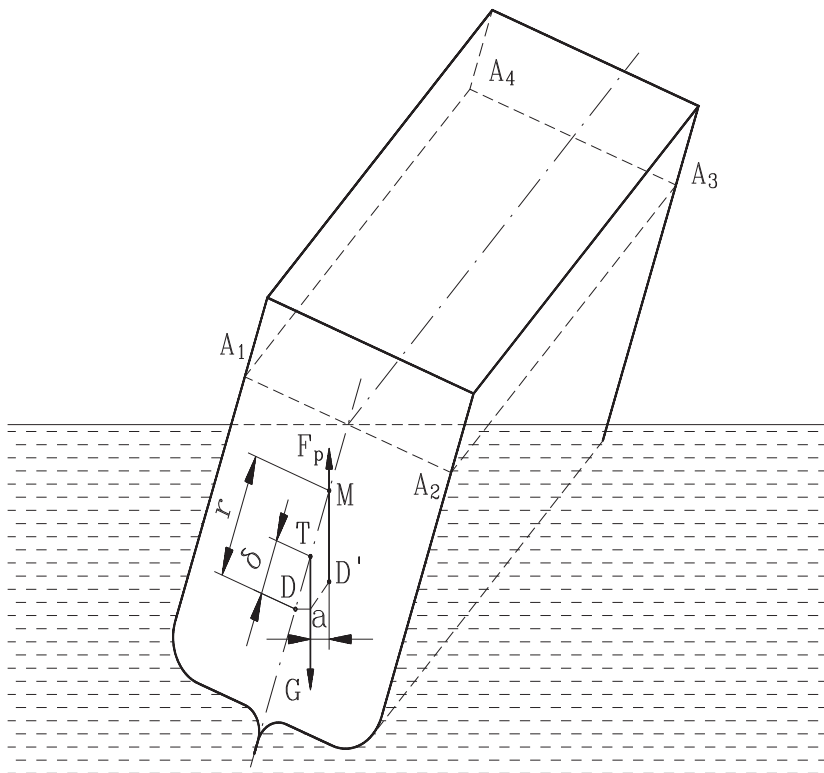
$$r = \frac{J_x}{V} \text{ [m].}$$

Инаку, практично е докажано дека во зависност од големината на бродот, метацентричниот радиус се движи од 0,30 до 1,20[m] метри.

Во равенката за пресметка на големината на метацентричниот радиус,  $J_x$  претставува момент на инерција на водната линија  $A_1, A_2, A_3, A_4$  во однос на нејзината централна надолжна оска, а  $V$  е волуменот на истиснатата течност.

Ако растојанието меѓу тежиштето (Т) и нападната точка на хидростатичката сила на потисок (D) се означи со  $\delta$ , тогаш условите за рамнотежа ќе бидат:

- ако  $r > \delta$ , бродот ќе биде во стабилна рамнотежа,
- ако  $r < \delta$ , бродот се наоѓа во лабилна рамнотежа и
- ако  $r = \delta$ , бродот се наоѓа во индиферентна рамнотежа.



Сл. 32 Определување на метацентричен радиус

## ПРИМЕРИ

1. Да се определи густината на работната течност чија маса изнесува  $m = 8$  [kg], а волуменот на садот во кој е сместена течноста е  $V = 4$  [m<sup>3</sup>].

*Решение:*

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{8}{4} = 2 \text{ [kg/m}^3\text{]}.$$

2. На лостот од хидраулична дигалка (сл. 34) се дејствува со сила  $F_1 = 150$  [N]. Ако се зададени  $l = 1$  [m];  $m = 0,3$  [m],  $d = 30$  [mm],  $D = 275$  [mm], одот на малиот клип  $s_1 = 38$  [mm], потребно е да се определи:

- големината на силата  $F_2$ ,
- хидростатичкиот притисок во течноста  $p$ ,
- силата  $F$  што ќе дејствува врз челната површина  $A_2$  на големиот клип

*Решение:*

$$F_2 = \frac{F_1 \cdot l}{m} = \frac{150 \cdot 1000}{300} = 500 \text{ [N]}.$$

$$p = \frac{F_2}{A_1} = \frac{500}{0,0007} = 714285,7 \text{ [Pa]}.$$

$$F = F_1 \cdot \frac{l}{m} \cdot \frac{A_2}{A_1} = 500 \cdot \frac{0,076}{0,0009} = 42220 \text{ [N]}.$$

3. Хидраулична дигалка за автомобили (работи на принцип како хидраулична преса од сл. 20) со маса до 200 [KN] има дијаметар на клипот  $d_1 = 25$  [mm]. Ако се дејствува со сила  $F_1 = 12,5$  [KN] при што клипот  $K_2$  поминува пат  $s_2 = 42$  [mm], тогаш колкав пат ќе помине клипот  $K_1$  и колкав треба да биде дијаметарот  $d_2$  на извршниот цилиндар од дигалката?

*Решение:*

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \Rightarrow d_2 = \sqrt{\frac{F_2 \cdot d_1^2}{F_1}} = \sqrt{\frac{200 \cdot 25^2}{12,5}} = 100 \text{ [mm]},$$

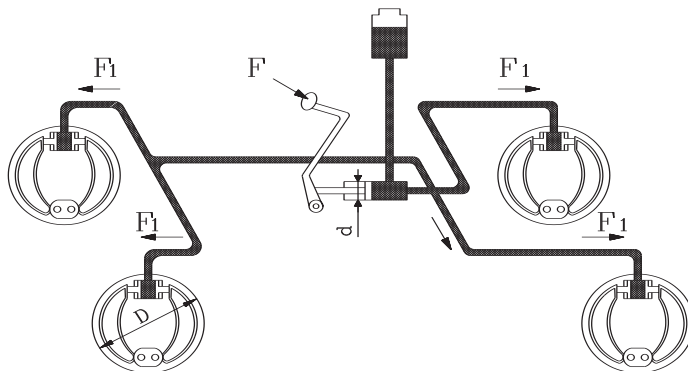
$$\frac{s_1}{s_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \Rightarrow s_1 = s_2 \cdot \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 = 42 \cdot \left(\frac{100}{25}\right)^2 = 672 \text{ [mm]}.$$

4. Со колкава сила  $F$  треба да се дејствува врз педалата за сопирање кај автомобил со хидраулични сопирачки, ако дијаме тарот на главниот цилиндар е  $d = 100 \text{ [mm]}$ , силата на сопирање  $F_1 = 120 \text{ [N]}$ , а дијаметарот на барабанот од тркалото  $D = 450 \text{ [mm]}$ , (сл. 33)?

Решение:

$$p = \frac{F}{A_1} = \frac{F_1}{A_2} \text{ [N/m}^2\text{]} = 754,7 \text{ [Pa]}.$$

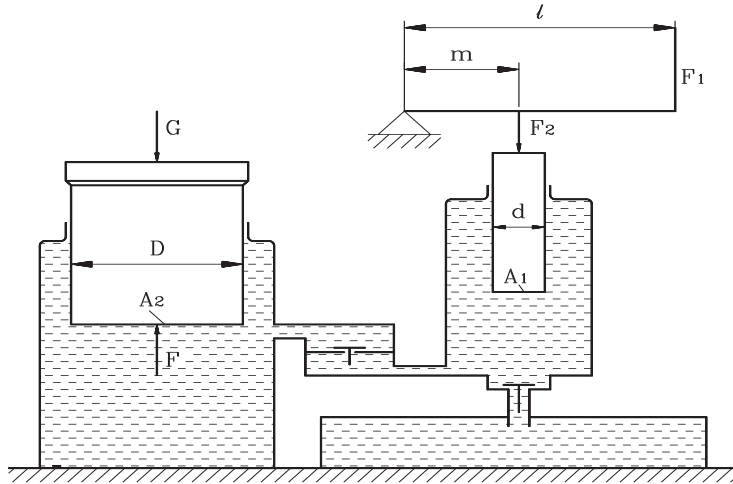
$$p = \frac{F}{A_1} \Rightarrow F = p \cdot A_1 = 754,7 \cdot 0,0079 = 5,962 \text{ [N]}$$



Сл. 33 Хидрауличен систем за сопирање (кочење)

5. Колкава сила  $F$  може да се постигне со хидраулична дигалка (сл. 34), ако  $D = 320 \text{ [mm]}$ ,  $d = 120 \text{ [mm]}$ ,  $m = 60 \text{ [mm]}$ ,  $l = 650 \text{ [mm]}$ , а силата на лостот  $F_1 = 500 \text{ [N]}$ ?

Решение:  $F = 38348,105 \text{ [N]}$



Сл. 34 Хидраулична дигалка

6. Да се определи хидростатичкиот притисок на вода во цевковод на почетокот, средината и на крајот, ако висината на течниот столб од отворот на истекување до нивото изнесува  $h = 2[\text{m}]$ , а должината на цевководот  $L = 200[\text{m}]$  и ако цевководот е монтиран под агол  $\alpha = 55^\circ$ .

*Решение:*

$$p_1 = 1,3 [\text{Pa}], \quad p_s = 9,4 [\text{Pa}], \quad p_k = 17,6 [\text{Pa}]$$

7. Да се определи притисокот и специфичната маса на водата во океан на длабочина од  $h = 1000[\text{m}]$ , ако се знае дека специфичната маса на површината изнесува  $g = 1020[\text{kg}/\text{m}^3]$  и модулот на стисливост на водата изнесува  $E_0 = 4,7 \cdot 10^{-5}[\text{sm}^2/\text{kg}]$ . Температурата е непроменета по целата должина на течниот столб.

*Решение:*

$$p_h = 102[\text{Pa}], \quad g = 1020 [\text{kg}/\text{m}^3]$$

8. Колкава сила  $F_2$  може да се постигне со хидраулична преса според Сл. 20, ако се зададени следните податоци:  $d_2 =$

350 [mm],  $d_1 = 25$  [mm],  $F_1 = 12$  [N] и  $s_1 = 68$  [mm]. Колкаво ќе биде поместувањето на клипот  $K_2$  ?

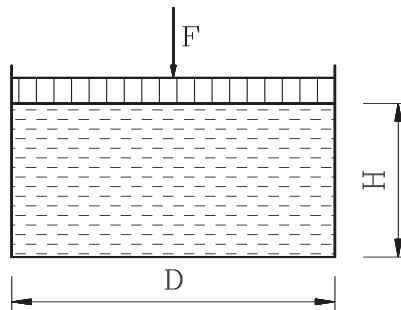
Решение:

$$F_2 = 2352 \text{ [N]}; \quad s_2 = 0,35 \text{ [mm]}.$$

9. Да се определи висината  $H$  и силата на притисок  $F_1$  што ќе дејствува врз дното на цилиндричен сад исполнет со вода со  $\rho = 998,2$  [kg/m<sup>3</sup>] и дијаметар  $D = 420$  [mm], ако садот е затворен со клип врз кој се дејствува со надворешна сила  $F = 134$  [N]. Волуменот на водата во садот изнесува  $V = 1324$  [sm<sup>3</sup>] (Сл. 35)

Решение:

$$H = 0,0096 \text{ [m]}; \quad F_1 = 146,98 \text{ [N]}.$$



Сл. 35: Затворен сад наполнет со вода

10. Хидрауличната дигалка од Сл. 34 е наменета за подигање на машински делови со маси до 4 500 [N]. Зададени се:  $d = 80$  [mm],  $D = 280$  [mm],  $m = 60$  [mm],  $l = 370$  [mm] и поместувањето на малиот клип  $s_1 = 135$  [mm]. Со колкава сила  $F_1$  треба да се дејствува на лостот, колкава ќе биде силата  $F$  врз клипот  $K_2$  и поместувањето  $s_2$  на големиот клип?

Решение:

$$F_1 = 60,81 \text{ [N]}; \quad F_2 = 375 \text{ [N]}; \quad s_2 = 10 \text{ [mm]}.$$



11. Да се определи волуменот, специфичната густина и релативната специфична густина на тело, кое во воздух тежи  $G_1 = 80$  [N], а во вода  $G_2 = 52$  [N].

*Решение:* Врз основа на Архимедовиот закон следува:

$$G_1 - G_2 = g_v \cdot V_T$$

Од таа равенка се определува големината на волуменот

$$V_T = 0,028 \text{ [m}^3\text{]}$$

Специфичната густина на телото се определува од релацијата:

$$G = g_T \cdot V_T \quad \text{односно}$$

$$g_T = 2857 \text{ [N/m}^3\text{]}$$

Релативната специфична густина на телото е однос на специфичната маса на телото врз специфичната густина на течноста во која е потопено телото:

$$g_R = 2,857$$

12. Тело со форма на коцка има страна  $a = 2$  [m] и маса  $G = 10$  [t], виси на јаже врзано за балон наполнет со хелиум. Да се определи волуменот на хелиумот кој е потребен за да се одржува рамнотежа на системот во воздух, ако масата на балонот без хелиум и јажето изнесува  $G_1 = 400$  [N]? Се знае специфичната густина на хелиумот дека изнесува 13,8% од специфичната густина на стандарден воздух, која изнесува  $g_v = 1,23$  [kg/m<sup>3</sup>].

*Решение:*

$$V = 7437 \text{ [m}^3\text{]}$$

## Прашања за утврдување:

1. Како гласи основната равенка на хидростатиката?
2. Какви инструменти за притисок познаваш?
3. Во кои единици се мери притисокот?
4. Како гласи Паскаловиот закон?
5. Како функционира хидраулична преса?
6. Кои видови на хидраулични акумулатори ги познаваш?
7. Каква може да биде рамнотежата на тела што пливаат?
8. Што е надолжна стабилност?
9. Што е напречна стабилност?
10. Што е метацентричен радиус?
11. Кој притисок се вика хидростатички?
12. Што е натпритисок, а што потпритисок?
13. Што е физичка атмосфера?
14. Зошто служи барометарот?
15. Што се мери со манометарот?

## Заклучок

Целите на наставните содржини се запознавање на учениците со основните својства на флуидите, која е задачата и каде се среќаваме со примената на основните закони од хидрауликата. Преку содржините учениците се запознаваат со поимите за притисок, единиците за неговото мерење, основната равенка на хидростатиката и видовите инструменти за мерење на притисок. Преку Паскаловиот закон се запознаваат со тоа како функционира хидраулична преса, со карактеристиките на површините на течности при мирување, движење и ротација. Исто така, се запознаваат со Архимедовиот закон и основните поими за пливање, рамнотежа и стабилност на телата што пливаат. Со помош на решените примери учениците ќе се запознаат со практичните примери од секојдневниот живот за примена на хидрауликата. Примерите за хидраулична дигалка, преса или хидрауличниот систем за сопирање (кочење) кај моторните возила покажуваат дека хидрауликата има широка примена во многу области. Тие сознанија ќе бидат добра основа за натамошна надградба во практиката и едукацијата за учениците.

# Х И Д Р О Д И Н А М И К А Н А Т Е Ч Н О С Т И

## 13. ВИДОВИ СТРУЕЊА, СТРУЈНИ ЛИНИИ

**Кинематиката и динамиката** на течностите е област од хидрауликата што го опфаќа и изучува движењето на течности те.

**Кинематиката** го анализира движењето на течностите не земајќи ги во обѕир причините кои го предизвикале движењето.

**Динамиката** пак го анализира движењето на течности те, земајќи ги во обѕир причините кои го предизвикуваат движењето.

За изучување на движењето на течностите се применуваат два метода: **Лагранжов** и **Ојлеров** метод.

Според **Лагранжовиот** метод, движењето на секоја флуид на честичка низ просторот е функција од векторот на положба и времето како независно променливи големини. Во механиката на флуиди тој метод се применува само во некои фундаментални лабораториски испитувања.

Според **Ојлеровиот** метод, која било хидромеханичка големина (брзина, притисок, густина, забрзување...), се однесува на определена точка од просторот, дефинирана со векторот на положба во определен момент.

Значи движењето, односно струењето на течностите ќе биде дефинирано ако во која било точка од просторот, во секој момент може да се одредат основните параметри: брзината ( $v$ ), притисокот ( $p$ ) и густината ( $\rho$ ) во зависност од положбата во просторот и времето ( $t$ ).

$$v = v(x, y, z, t),$$

$$p = p(x, y, z, t),$$

$$\rho = \rho(x, y, z, t).$$

Од сите видови струења најсложено е она струење кај кое основните хидромеханички големини на флуидниот простор се менуваат од точка до точка и зависат од сите три координати

истовремено. Таквите струења се наречени **тродимензионални** струења.

Освен тродимензионалните постојат струења кај кои струјната слика е иста во сите рамнини што се меѓусебно паралелни. Тие струења се наречени **рамнински**, бидејќи хидродинамичките големини зависат само од две координати и затоа уште се викаат **дводимензионални** струења. Во дводимензионални струења се вброени и осносиметричните струења, бидејќи кај нив струјната слика е иста во сите рамнини што поминуваат низ оската на симетрија. Кај дводимензионалните струења секоја хидродинамичка големина зависи од две координати на рамнината и времето, односно:

$$v = v(x, y, z, t),$$

$$p = p(x, y, z, t),$$

$$\rho = \rho(x, y, z, t).$$

За струењето низ цевковод или канали може да се добие целосна или задоволителна точност, ако се знае промената на хидродинамичките големини по должината на осната линија. Таквото струење е наречено **линеарно** или **еднодимензионално** струење.

Хидрауликата е дел од хидромеханиката на флуиди, која ги користи законитостите на еднодимензионалното струење. Кај тоа струење положбите на точките од струјната линија се определени со патот ( $s$ ) по должината на струјната линија.

Струењето на течностите може да биде: **стационарно** и **нестационарно**.

**Стационарно** струење е она кај кое брзината на струење и притисокот како основни параметри на движењето не се менуваат со текот на времето, туку зависат само од положбата на посматраната точка.

$$v = f_1(x, y, z);$$

$$p = f_2(x, y, z).$$

**Нестационарно** струење е струење при кое брзината и притисокот во која и да било положба се менуваат во зависност од времето, односно се функции од времето и просторот.

$$v = f_1(x, y, z, t); \quad p = f_2(x, y, z, t)$$

Во зависност од промената на брзината струењето може да биде:

**Рамномерно** струење е стационарно струење, кога брзината на струење на течноста долж струјниот ток е константна.

**Нерамномерно** струење е стационарно струење, при кое брзината на струење на течноста се менува по интензитет долж струјниот ток.

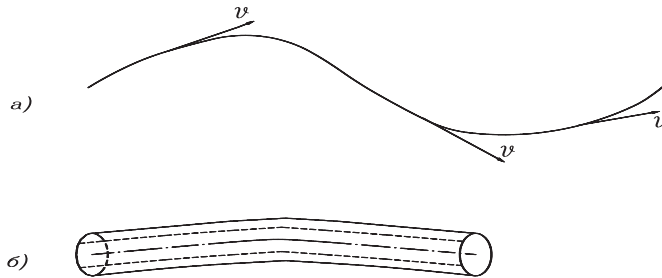
Во практиката често пати се среќаваме и со следниве видови струења:

**Напорно** струење на течноста е струење при кое струјниот ток потполно е опфатен од цврсти ѕидови на спроводниот канал и не постои слободна површина. Тоа струење настанува како последица од разликата на притисокот и дејството на силата на масата. Таков вид струење е присутно во водоводните инсталации (сите видови затворени хидраулични системи).

**Безнапорно** струење на течноста е струење при кое струјниот ток има слободна површина. Таков вид на струење се среќава кај реките, канализацијата и слично.

**Струјна линија** или струјница е линија кај која во секоја точка правецот на брзината се совпаѓа со правецот на тангентата повлечена во таа точка. Кај стационарно струење на секоја точка одговара брзина која не се менува со текот на времето. Тогаш струјната линија се совпаѓа со траекторијата на честичката. Кај нестационарно струење, бидејќи брзината со текот на времето се менува, се менува и струјната линија и затоа таа се вика моментна струјна линија како на сл. 36а.

**Елементарниот струен ток** го сочинуваат повеќе струјни линии кои поминуваат низ елементарна површина, поставена нормално во однос на струјните линии.



Сл. 36 Струјна линија, елементарен струен ток

Доколку елементарната површина добие конечни димензии се добива струен ток со **конечни димензии**. Струјниот ток со конечни димензии (Сл. 36б) се однесува како затворена крута цевка, па и при анализите така се посматра.

Елементарниот струен ток со конечни димензии се среќава кај стационарно струење, а кај нестационарното струење се вика моментален струен ток.

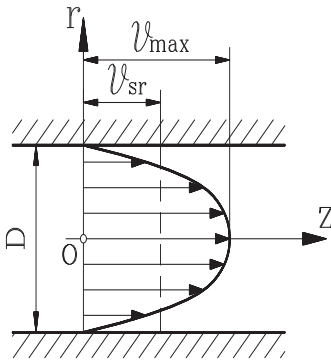
Кај елементарниот струен ток со конечни димензии промените на притисокот и брзината се пресметуваат во зависност само од една променлива – растојанието на набљудуваниот напречен пресек од некој почетен пресек. Тоа струење е наречено **еднодимензионално** и се применува во хидрауликата. Кај таквото струење за пресметка се употребува средната брзина на струење.

Кај **нестационарно** струење, промената на притисокот и брзината зависат од една, две или три променливи величини. Според тоа, такво струење може да биде:

- Еднодимензионално (линеарно),
- Дводимензионално (рамнинско),
- Тродимензионално (просторно).

Такви струења се анализираат во теоретска хидромеханика.

## 14. ПРОТОК И СРЕДНА БРЗИНА



Сл. 37 Дијаграм на брзина на струење

Проток претставува количина на течен флуид, која поминува низ нормален напречен пресек на еден проводник (струен ток) во единица време. Според начинот на пресметката се разликуваат два вида на проток и тоа:

**Волуменски проток** е количина на течност измерена во единица волумен, што поминува низ напречен пресек на проводник во единица време и се пресметува со равенката:

$$q_V = \frac{V}{t} = A \cdot v_{sr} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

Од истата равенка може да се определи средната брзина на струење:

$$v_{sr} = \frac{q_V}{A} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Средната брзина на струење е замислена брзина која секогаш се зема како меродавна при димензионирање на проводниците во хидрауличните системи.

Ако изразот за волуменски проток се помножи со густината ( $\rho$ ) се добива **проток на маса** ( $q_m$ ), кој се пресметува со равенката:

$$q_m = \rho \cdot A \cdot v = \rho \cdot q_V = \frac{\rho \cdot V}{t} = \frac{m \cdot V}{V \cdot t} = \frac{m}{t} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

$$\rho = \frac{m}{V} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] - \text{густина на течноста,}$$

$$m \text{ [kg]} - \text{маса на течноста,}$$

$$t \text{ [s]} - \text{време на струење.}$$

Во хидрауличните системи се користи волуменскиот проток, бидејќи за течностите густината се смета за константна големина ( $\rho = \text{const.}$ ). Протокот на маса се користи во пневматските системи, бидејќи кај компресибилните флуиди (гасовите), густината е променлива големина ( $\rho \neq \text{const.}$ ).

## 15. БЕРНУЛИЕВА РАВЕНКА ЗА ИДЕАЛНИ И РЕАЛНИ ТЕЧНОСТИ

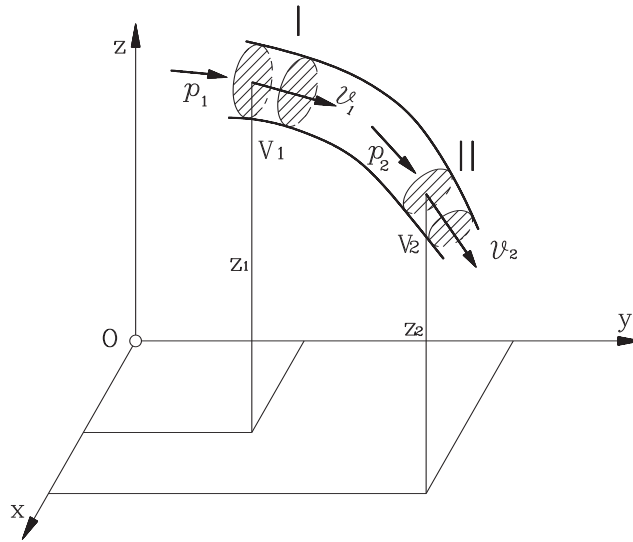
Бернулиевата равенка се смета за енергетска равенка во хидрауликата бидејќи го изразува законот за одржување на енергијата. Членовите во Бернулиевата равенка ја изразуваат расположивата енергија на флуидот (кинетичката, потенцијалната и енергијата на притисок). Збирот на овие три вида енергија во која било точка (пресек) е константна големина, а при струењето доаѓа до претворање на еден вид енергија во друг. Исто така, Бернулиевата равенка е основната равенка во хидродинамиката која дава зависност помеѓу брзините на струење, притисокот во различни напречни пресеци и местоположбата по должината на цевководот низ целиот струен ток.

На Сл. 38 е претставен струен ток низ проводник со променлив напречен пресек за кој се анализираат големините на специфичната енергија на флуидот меѓу пресеците I и II. Обично, Бернулиевата равенка се изведува за идеален и реален флуид.

**Бернулиевата равенка за идеален флуид** не ги зема предвид вискозноста ниту отпорите при струење на флуидот, а е составена од три члена и гласи:

$$\frac{v^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\rho \cdot g} + z = \text{const.}$$





Сл. 38 Струен ток со променлив напречен пресек

Секој од членовите ја изразува специфичната енергија што ја содржи единица маса од флуидот т.е.:

$$\frac{v^2}{2 \cdot g} = e_K \text{ - кинетичка енергија,}$$

$$\frac{p}{\rho \cdot g} = e_P \text{ - енергија на притисок,}$$

$$z = e_z \text{ - потенцијална енергија.}$$

Исто така, секој член од Бернулиевата равенка има димензија на должина во [m], и може да биде претставен како геометриска величина, па оттаму имињата:

$$\frac{v^2}{2 \cdot g} \text{ - брзинска (динамичка) висина,}$$

$$\frac{p}{\rho \cdot g} \text{ - висина на притисок (пиезометриска висина),}$$

$z$  – висина на положбата, или геодетска висина.

Збирот на трите висини се вика **вкупен напор** на текот на флуидот.

$$\frac{v^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\rho \cdot g} + z = H$$

Бернулиевата равенка за кои било две точки од струјната линија со параметри  $p_1, V_1, z_1$ , односно  $p_2, V_2, z_2$ , мерени во однос на која и да било споредбена хоризонтална рамнина, гласи:

$$\frac{V_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 = \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + z_2 = \text{const.} = C$$

односно:  $e_1 = e_2 = \text{const.}$

Збирот на енергиите во некоја точка  $M_1$  од струјната линија е еднаков на збирот на енергиите во која било точка  $M_2$  од истата струјна линија и е константна големина.

**Бернулиевата равенка за реален флуид** ја зема пред вид и вискозноста на флуидот, поради која се појавуваат отпори на триење при струење на флуидот низ проводникот. За совладување на отпорите на триење, дел од специфичната енергија на флуидот ( $e_1$ ), се троши за совладување на отпорите на струење, па според законот за одржување на енергија следува:

$$e_1 = e_2 + \Delta e \quad \text{каде што:}$$

$\Delta e$  – специфична енергија, потрошена за совладување на хидрауличните отпори при струење на реални флуиди, која неповратно се губи како топлотна и енергија на шум.

Ако се земе во обсир специфичната енергија, која се троши за совладување на отпорите од триење, тогаш **Бернулиевата равенка за реални флуиди**, или коригираната Бернулиева равенка, го има следниов облик:

$$\frac{V_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 = \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + z_2 + h$$

Секој од членовите на оваа равенка ја изразува соодветната специфична енергија по единица маса, каде што износот:

$h = \frac{\Delta e}{g}$  [m] – претставува изгубена енергија за совладување на отпорите од триење, или енергијата во точката 1 е еднаква на збирот од енергијата во точката 2 плус енергијата што ќе се потроши за совладување на отпорите од триење.

Бернулиевата равенка се однесува на која и да било струјна линија од струјниот ток низ кој се транспортира волуменски проток  $q_V = v_s \cdot A$  [m<sup>3</sup>/s] во единица време. Определувањето на големината на изгубената енергија ( $\Delta e$ ) ќе биде посебно анализирано во методската единица Загуби на енергија.

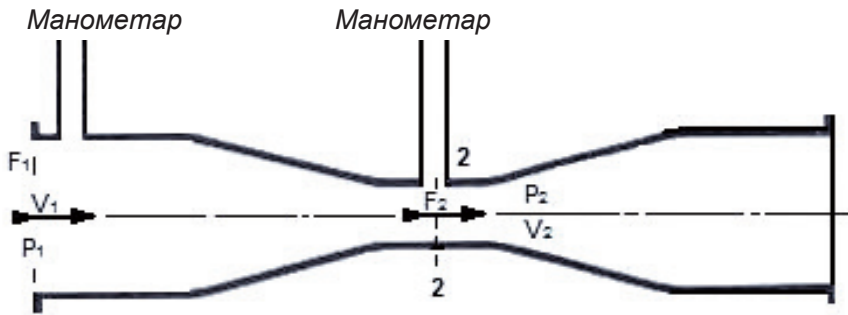
## 16. ПРИМЕНА НА БЕРНУЛИЕВАТА РАВЕНКА

Бернулиевата равенка во хидрауликата се применува за пресметување:

- Количината на протокот во цевките (Вентуриева цевка),
- Брзината на струење,
- Статички и динамички притисок, (Пито-цевка),
- Висината на столбот на течност,
- Количината на шмукање (ејектор)...

Во техниката за мерење, количината на протокот низ цевките се применува:

*16.1 Вентуриева цевка - Вентуриевиот водомер* служи за мерење на брзината на струење ( $v$ ) или големината на протокот ( $Q$ ) на одредено место во хидрауличната инсталација. Водомерот се состои од хоризонтална цевка (Вентуриева цевка), која во средината е стеснета како што е прикажано на Сл. 39.



Сл.39 Вентуриева цевка

Бернулиевата равенка за пресеците 1 и 2 ќе биде:

$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{\vartheta_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\vartheta_2^2}{2g}$$

Од равенката за континуитет  $A_1 \cdot \vartheta_1 = A_2 \cdot \vartheta_2$  може да се определи вредноста на  $\vartheta_1$ , па за брзината во пресекот 2 се добива:

$$v_1 = v_2 \frac{A_2}{A_1}$$

Со заменување на таа вредност во Бернулиевата равенка и средување, се добива:

$$\vartheta_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \cdot (1 - \frac{A_2^2}{A_1^2})}} \quad \left[ \frac{m}{sek} \right]$$

а големината на протокот ќе биде:

$$Q_2 = A_2 \cdot \vartheta_2 = A_2 \cdot \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \cdot (1 - \frac{A_2^2}{A_1^2})}} \quad [m^3]$$

Вредностите на притисоците  $p_1$  и  $p_2$  се определуваат со манометри кои се сврзани со цевки или со диференцијален манометар кој веднаш ја мери разликата  $p_1 - p_2$ .

**16.2 Млазна пумпа (ејектор)** – често се употребува бидејќи нуди голема сигурност, има едноставна конструкција и мали димензии. За нејзиното функционирање треба да се располага со вода под притисок која е наречена погонска

вода. Погонската вода може да се обезбедува со посебна пумпа или се користи вода под притисок од водоводната инсталација. На сл. 40а е претставена шема на постројката ејектор со составните елементи. Погонската вода за ејекторот Е се обезбедува од резервоарот 1. Ејекторот по влекува вода од резервоарот 2 и ја подига до резервоарот 3. На шемата се претставени:

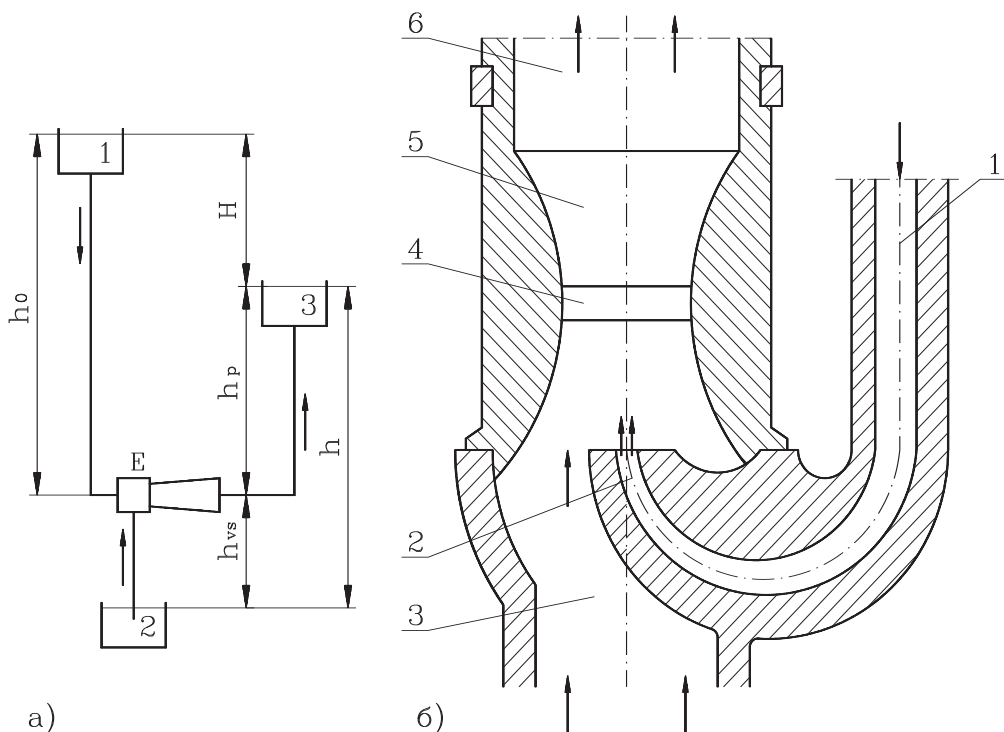
$h_{vs}$  - висина на вшмукување,

$h_p$  - потисна висина,

$H$  - разлика меѓу притисокот на погонската вода и притисокот развиен со ејекторот, изразена како висинска потенцијал на енергија во [m].

$h_0$  - висинска разлика меѓу нивото во горниот резервоар 1 и ејекторот Е.

$h$  - вкупна висина, од нивото во резервоарот 2 до нивото во резервоарот 3.



Сл. 40 Ејектор

На сл. 40б е претставена шемата на ејекторпумпа со составните делови. Течноста под притисок се доведува во ејекторот преку каналот (1) и низ млазникот (2) навлегува во неговата внатрешност. При излегување од млазникот, енергијата на притисок се трансформира во кинетичка енергија, па затоа течноста излегува со голема брзина и во просторот околу млазникот се создава потпритисок. Зоната на потпритисок се шири и во шмукачкиот канал (3) низ кој течноста од долниот резервоар навлегува во ејекторот. Во комората (4) се мешаат течностите од шмукачкиот канал (3) и течноста под притисок од каналот (1). Таа смеса се движи нагоре кон дифузорот (5). Во дифузорот, поради зголемување на волуменот, брзината на струење се намалува и постепено кинетичката енергија се трансформира во енергија на притисок. Таа енергија ја потиснува течноста низ излезниот канал (6) од ејекторот кон собирниот резервоар (3).

Функционирањето на ејекторот може да се објасни со помош на цевка со стеснување, како што е шематски прикажано на сл. 41. Ако стеснувањето го поврземе со цевка В за резервоар од кој се повлекува течност, како на сликата, тогаш поради брзината на струење на водата низ хоризонталната цевка А, прво се повлекува воздухот од вертикалната цевка В, а потоа од резервоарот С се подига столб од течност со висина  $h$ . Ако растојанието  $a$  од резервоарот С до цевката А биде помало од  $h$ , тогаш би настанало струење на течност од резервоарот С низ цевката В кон цевката А. Ако стеснувањето е доволно големо, притисокот во него може да има вредност приближно нула ( $p_1=0$ ). Тогаш може да се определи со која брзина ќе струи течноста, или при кое стеснување се постигнува определена брзина на струење. Со замена за  $p_1=0$  се добива:

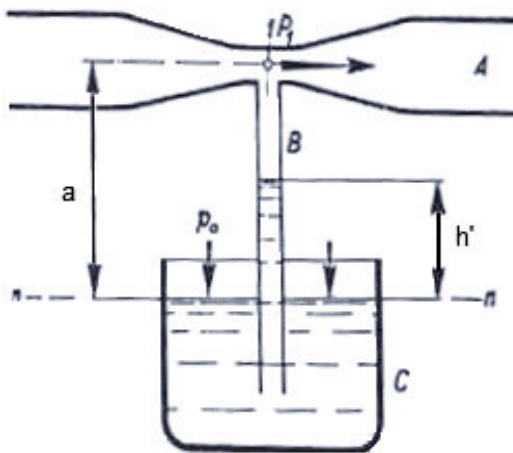
$$\frac{p_0}{\rho \cdot g} + h_1 = \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g}$$

$$v_1 = \sqrt{2g\left(\frac{p_0}{\rho \cdot g} + h_1\right)}$$

Од равенката за континуитет  $v_1 A_1 = v A$  се добива вредноста на  $v_1$  и ако во неа се замени вредноста  $v = \sqrt{2gh}$ , се добива односот меѓу напречните пресеци на цевката А (нестеснетиот дел А према стеснетиот дел  $A_1$ ).

$$\frac{A}{A_1} = \sqrt{\frac{p_0 + \rho \cdot g \cdot h_1}{\rho \cdot g \cdot h}}$$

На тој принцип се градат многу млазни пумпи за вшмукање вода, водена пара или воздух.

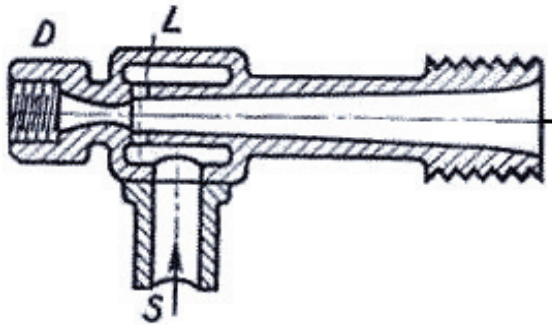


Сл. 41 Цевка со стеснување

Ејекторите се конструираат за притисок на погонската вода од 3,5 до 4 [bar] и за вшмукувачка висина до 3m, заради избегнување на кавитација. Често се употребуваат за зголемување на вшмукувачката висина на центрифугалните пумпи, особено при црпење вода од длабоки резервоари или бунари. Се поврзува за долниот крај на шмукачката цевка од центрифугалната пумпа, а како погонска вода ја користи истата вода од потисниот канал на центрифугалната пумпа. Со таа комбинација се црпи вода од длабочини над 40m, а улогата на ејекторот е да ја подигне водата до висина од каде што може да ја црпи центрифугалната пумпа.

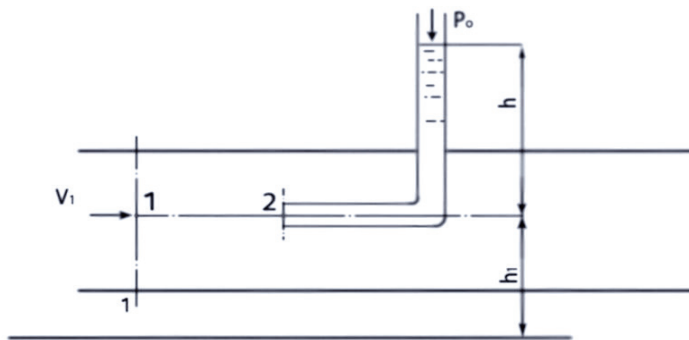
На сл. 42 е прикажан пресек на млазна шмукалка ејектор, која со навој може да се приклучи на водоводна инсталација. Водата

под притисок (3 - 6) [bar] од водоводната мрежа струи низ млазницата D, ја вшмукува водата од резервоарот преку цевката S и низ отворите L ја потиснува кон потисната инсталација кон десната страна, за која е поврзан ејекторот. Со ејекторот може да се подигнува вода на висина до 10m, а длабочината на резервоарот од каде ќе се вшмукува водата може да биде до 3m.



Сл. 42 Ејектор за приклучок со навој

**16.3 Пито - цевката** е стаклена цевка отворена, од двете страни а едниот крај е свиткан под прав агол. Со неа се мери висината на брзината или *динамичкиот притисок* ( $p_d$ ) при струење на течноста. На Сл. 43 е претставена Пито - цевката, која секогаш се поставува со свитканиот дел спротивно на правецот на струењето на течноста.



Сл. 43 Пито (Pitot) цевка



Ако се постави Бернулиева равенка за точките 1 и 2 (непосредно на устието на цевката) се добива:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + h_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + h_1$$

Бидејќи брзината на устието на цевката во точката 2 е  $v_2 = 0$ , со замена на нејзината вредност во Бернулиевата равенка се добива:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} = \frac{p_2}{\rho \cdot g}$$

Притисокот на устието на цевката ( $p_2$ ) одржува рамнотежа со столбот на течноста со висина  $h$  и со атмосферскиот притисок ( $p_0$ ),

$$\text{односно: } p_2 = h \cdot \rho \cdot g + p_0$$

Ако таа вредност за  $p_2$  се замени во Бернулиевата равенка се добива:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} = \frac{h \cdot \rho \cdot g + p_0}{\rho \cdot g}$$

односно

$$h = \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1 - p_0}{\rho \cdot g} \quad [\text{m}]$$

Столбот на течноста ( $h$ ) е збир од *висината на брзината*  $\frac{v_1^2}{2g}$  и *висината на притисокот*  $\frac{p_1 - p_0}{\rho \cdot g}$ . Со помош на висината на брзината може да се пресметува *динамичкиот притисок* ( $p_d$ ) за секоја течност ако се знае нејзината густина ( $\rho$ ), а се пресметува според равенката:

$$p_d = \frac{\rho \cdot v^2}{2g}$$

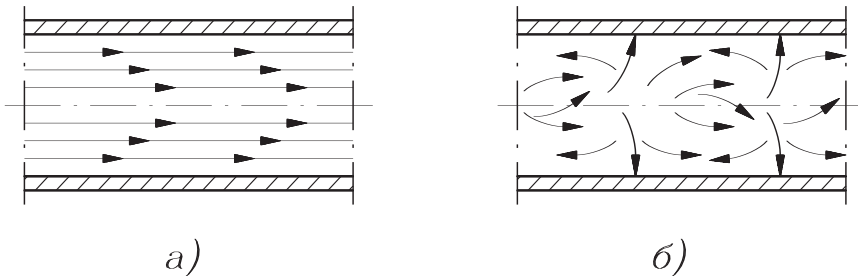
## 17.ЛАМИНАРНО И ТУРБОЛЕНТНО СТРУЕЊЕ

(Рејнолдсов број и критична брзина)

Со многубројни експерименти за струење на реален – вискозен флуид е докажано дека во практиката се среќаваат два вида на струење: *ламинарно* и *турболентно*.

**Ламинарното** струење се изведува со струјни текови како слоеви, односно ламели кај кои во траекториите на честичките, струјните линии и струјните текови, при струењето не доаѓа до мешање на флуидните честички (сл. 44а)

Ламинарно струење се среќава кај струења со мали брзини, на пример, струењето во слојот за подмачкување кај рамни плочи или кај радијалните лизгачки лежишта. Струењето низ цевки со мали брзини се одликува со параболична промена на брзината.



Сл. 44 Ламинарно и турболентно струење

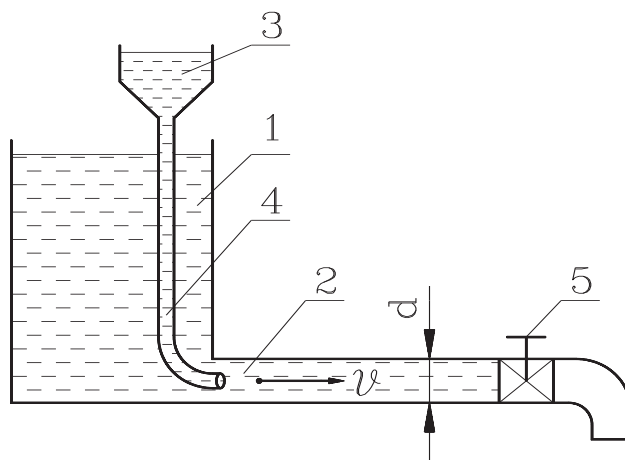
Со зголемување на брзината на струење, ламинарното струење преминува во **турболентно**, кај кое доаѓа до мешање на честичките помеѓу соседните струјни токови и струењето е разбранувано (сл. 44б). Турбулентното струење се среќава во водоводните инсталации, гасоводите, сите видови пумпи и турбини, компресори, вентилатори, струењето на воздухот во атмосферата, водата во морињата, реките и каналите. Кај турбулентното струење, на слободната површина, се појавуваат вдлабнатини или испупчувања, бидејќи брзината на струење со текот на времето се менува хаотично без некоја законитост.

Со намалување на брзината на струење турбулентното струење преминува во ламинарно кај кое слободната површина е мазна. Преминот од ламинарно во турболентно струење и обратно не

зависи само од големината на брзината на струење, туку и од други физички и геометриски карактеристики.

### 17.1 Рејнолдсов број и критична брзина

Во техниката турбулентните струења имаат поголемо значење отколку ламинарните. Разликата помеѓу овие струења ја дефинираше Рејнолдс со експериментите што ги изведувал во 1883 година. На сл. 45 шематски е претставен апаратот со кој Рејнолдс вршел експеримент и практично докажал кога струење то од ламинарно преминува во турбулентно.



Сл. 45 Рејнолдсов експеримент

Од резервоарот (1) безбојната течност истекува низ цевката (2), а од малиот резервоар (3) низ тенката цевка (4) истекува обоена течност со иста густина. Кога брзината на струење ( $v$ ) на безбојната течност е мала, струјниците се прави (паралелни), што е одлика на ламинарно струење. Со отворање на вентилот (5) се зголемува брзината на струење на течности во цевката (2), струјниците се мешаат меѓусебно и струењето преминува во турбулентно. Преминот од еден во друг вид секогаш настапувал при одредена брзина, која Рејнолдс ја дефинираше како **критична брзина**. За течности со различен вискозитет, таа брзина имала различни вредности. Тоа го поттикнало да формулира израз со кој ќе може да се дефинира видот на струење во секој

случај, за течности со различна вискозност. Тој израз е наречен Рејнолдсов број и гласи:

$$R_e = \frac{v \cdot d}{\nu}, \text{ каде што се:}$$

$v$  [m/s]- брзина на струење,  
 $d$  [m] – внатрешен дијаметар на цевката,  
 $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] – коефициент на кинематската вискозност на течноста.

Рејнолдсовиот број е бездимензионална големина и со експериментот е определена критичната големина на  $R_e = 2320$ , при која доаѓа до промена на видот на струењето. Рејнолдс констатирал дека:

За вредност на  $R_e < 2320$  - струењето е ламинарно, а  
За вредност на  $R_e > 2320$  - струењето е турбулентно.

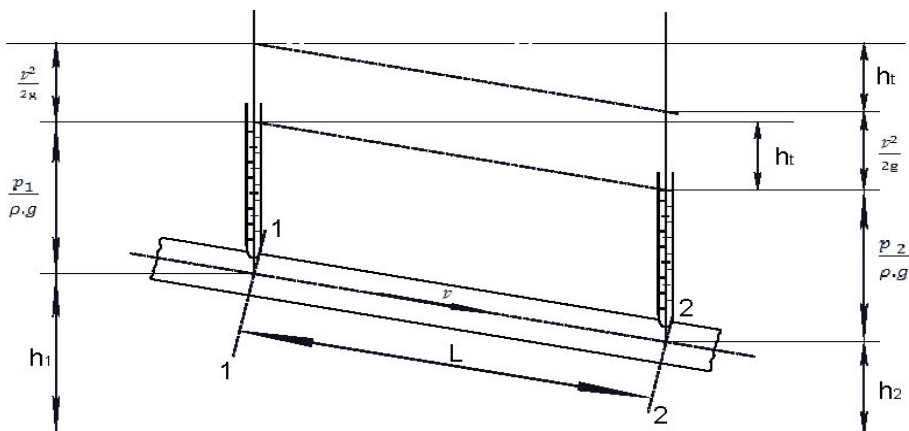
Вредноста на критичната брзина на струењето се пресметува од вредноста на Рејнолдсовиот број, и таа изнесува:

$$v_{kr} = \frac{R_{ekr} \cdot \nu}{d} \text{ [m/s]}$$

Во хидрауличните системи кои обично се употребуваат, струењето на работниот флуид е турбулентно.

## **18. РАМНОМЕРНО ДВИЖЕЊЕ НА ТЕЧНОСТ НИЗ ЦЕВКИ СО КОНСТАНТЕН ПРЕСЕК**

Поради константниот пресек на цевката, средната брзина на струење во сите пресеци ќе биде еднаква. Од Сл. 46 се гледа дека висината на брзината по должината на цевката ќе има иста вредност  $\frac{v^2}{2g}$ .



Сл. 46 Цевка со константен пресек

Бернулиевата равенка за пресеците 1 и 2 ќе биде:

$$h_1 + \frac{v^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} = h_2 + \frac{v^2}{2g} + h_t \quad \text{односно:}$$

$$h_t = h_1 - h_2 + \frac{(P_1 - P_2)}{\rho \cdot g}$$

На сл. 46 над цевката се прикажани висините на брзината и на отпорот како и промените на висината на притисокот. Ако цевката е поставена хоризонтално, тогаш:

$$h_1 = h_2$$

и претходната равенка ќе гласи:

$$h_t = \frac{(P_1 - P_2)}{\rho \cdot g}$$

Во таков случај за совладување на висината на отпорот се троши висината на притисок. Поради отпорот при струење на течност низ хоризонталната цевка доаѓа до намалување на притисокот (пад на притисок). За цевка со константен кружен напречен пресек висината на отпорот обично се пресметува според равенката на Дарси (Darcy), која гласи:

$$h_t = \lambda \cdot \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g}$$

каде што:  $\lambda$  – коефициент на триење чија големина зависи од Рејнолдсовиот број и рапавоста на цевката, за  $Re = 2320$  (ламинарно струење) односно:

$$\lambda = 64 / Re = 64 \cdot N / \vartheta \cdot d$$

Ако таа вредност се замени во Дарсиевата равенка за висината на отпорот се добива:

$$h_t = \frac{32 \cdot \nu \cdot L \cdot v}{d^2 \cdot g}$$

Висината на отпорот кај ламинарното струење е пропорционално на брзината на струење. За турбулентно струење кога вредноста на  $Re > 2320$ , се менува вредноста на коефициентот  $\lambda$ , но зависи и од рапавоста на ѕидовите на цевката низ која струи течноста.

## 19. ЗАГУБИ НА ЕНЕРГИЈА И КОЕФИЦИЕНТ НА ОТПОР ПРИ ЛАМИНАРЕН И ТУРБУЛЕНТЕН РЕЖИМ НА ДВИЖЕЊЕ

При струење на вискозна течност (реални флуиди) еден дел од механичката енергија на течноста неповратно се троши за совладување на хидрауличните отпори. Тој дел на енергија преминува во топлинска енергија која не се употребува за корисни цели. Хидрауличните системи и инсталации се составени од различни елементи низ кои струи флуидот. Сите различни елементи, прavi цевки со константен или променлив пресек, кривини, преодни делови, елементи за регулирање на протекот (вентили, разводници), рачви итн., предизвикуваат различни отпори на струењето. Според местото каде се јавуваат хидрауличните отпори, генерално се делат на два вида:

- *Линиски отпори* – отпори од триење на праволинискиот дел од инсталацијата,
- *Локални или месни отпори*

Загубите на енергија, што се последица на дејствувањето на овие отпори, се наречени *линиски* или загуби од триење и *локални загуби*.

**Линиските** или загуби од триење се последица на отпорот што се јавува поради дејството на силите на меѓусебно триење на флуидните честички и триењето по ѕидовите на цевководот и зависат од следните фактори:

- должината и дијаметарот на праволинискиот дел од цевководот,
- рапавоста на површините на ѕидовите,
- видот на струењето (ламинарно или турбулентно) и
- обликот на напречниот пресек на цевководот.

Големината на падот на притисокот поради линиските отпори помеѓу два пресека на растојание  $L$ , низ цевковод со константен напречен пресек, се определува според изразот:

$$\Delta p_1 = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v_{sr}^2 \cdot \rho}{2} \quad [\text{Pa}], \text{ каде што се:}$$

$L$  [m] – должина на цевководот,

$d$  [m] – внатрешен дијаметар на цевководот,

$v_{sr}$  [m/s] – средна брзина на струење,

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] – густина на флуидот,

$\lambda$  - коефициент на отпорот поради триење кој има променлива големина и при стационарно струење зависи од Рејнолдсовиот број  $R_e$  и релативната рапавост на цевката  $L/d$ . При ламинарно струење  $\lambda=64/R_e$ , додека при турбулентно струење големината на  $\lambda$  се определува според емпириски (експериментални) равенки, формулите на Прантл, Никурад зе, Колбрук или Алтшул, во кои  $\lambda = \lambda(R_e, \delta/d)$ .

Изгубената енергија на притисок може да се сведе и на изгубена висина:

$$h_1 = \frac{\Delta p_1}{\rho \cdot g} = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v_s^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}]$$

**Локалните** загуби можат да бидат разновидни и ги предизвикуваат отпорите што се јавуваат поради:

- нагла промена на правецот на струење,
- нагла промена на пресекот на струјниот ток (стеснувања,

проширувања, влез или излез на цевковод од резервоар и друго)

- делење на струјниот тек (разгранување на цевководот на два или повеќе делови),
- отпори низ разна арматура, вградена во цевководот за управување и регулација (вентили, славини, разводници и слично).

Големината на падот на притисокот ( $\Delta p_2$ ) во такви случаи се пресметува според изразот:

$$\Delta p_2 = \xi \cdot \frac{v_s^2 \cdot \rho}{2} \quad [\text{Pa}]$$

Изгубената енергија, поради совладување на локалните отпори, може исто така да се претстави како изгубена висина и тоа:

$$h_2 = \frac{\Delta p_2}{\rho \cdot g} = \xi \cdot \frac{v_s^2}{2 \cdot g} \quad [\text{m}], \text{ каде што е:}$$

$\xi$  - коефициент на локалниот отпор кој се определува врз основа на експериментални податоци и се зема од таблици или дијаграми. Најдобро е неговата големина да се усвои од податоците што ги препорачуваат производителите на елементите кои го предизвикуваат локалниот отпор.

Ако во цевководот постојат повеќе локални отпори, вкупната изгубена висина се добива како збир од сите локални отпори, односно:

$$h_2 = \frac{1}{2 \cdot g} \sum_{i=1}^m \xi_i \cdot v_{si}^2 \quad [\text{m}], \text{ каде што:}$$

$n$  – број на локални отпори.

Ако во цевководот постојат  $n$  делници со различен дијаметар  $d_i$  и должини  $L_i$  како и  $m$  локални отпори, тогаш во општ случај, вкупната изгубена висина се определува од:

$$h = h_1 + h_2 + = \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \left( \sum_1^n \lambda_i \cdot \frac{L_i}{d_i} \cdot v_{si}^2 + \sum_1^m \xi_i \cdot v_{si}^2 \right) \quad [\text{m}]$$

При проектирање на хидросистеми, во општ случај, треба да се води сметка при изборот на основните параметри, вкупните отпори да предизвикуваат максимално 5 до 6% пад на работниот притисок.

Димензионирањето на цевководот треба да се врши според равенката:



$$A = \frac{q_V}{v_{sr}} \quad [\text{m}^2]$$

За цевководи со кружен пресек:

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{q_V}{v_{sr}} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \cdot q_V}{\pi \cdot v_{sr}}} = 1,13 \sqrt{\frac{q_V}{v_{sr}}} \quad [\text{m}], \text{ каде што се:}$$

$A \text{ [m}^2\text{]}$  – површина на напречниот пресек на цевководот,  
 $q_V \text{ [m}^3\text{/s]}$  – волуменски проток,  
 $v_{sr} \text{ [m/s]}$  – средна брзина на струење,  
 $d \text{ [m]}$  – внатрешен дијаметар на цевководот.

Со вградување на пумпа во цевководот, во струјниот тек се доведува енергија потребна за да струи течноста низ цевководот. Големината на доведената енергија се пресметува со поставување енергетска равенка за нивоата на шмукачкиот (а) и потисниот резервоар (б). Таа енергетска равенка гласи:

$$e_1 + e_p = e_2 + e_h, \text{ каде што се:}$$

$$e_1 = \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} - \text{вкупната енергија на течноста во рамнината на нивото 1 – 1 од шмукачкиот резервоар,}$$

$e_p$  – енергија што пумпата ја предава на течноста,

$$e_2 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot H_g - \text{вкупна енергија на течноста во рамнината 2 - 2 во потисниот резервоар,}$$

$$e_h = g(h_1 + h_2) = g \cdot h - \text{енергија што треба да се потроши за совладување на хидрауличните отпори.}$$

Со замена на соодветните вредности, енергетската равенка добива облик:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + e_p = g \cdot H_g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h$$

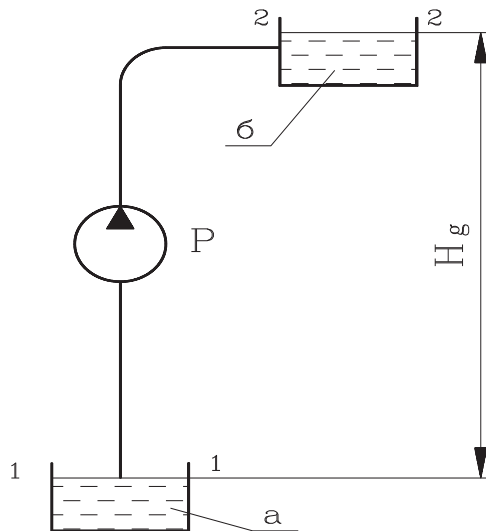
За отворени резервоари  $p_1 = p_2 = p_{at}$ , а брзините на струење на површините на резервоарите се  $v = v_1 = v_2 \cong 0$ . Со замена на овие вредности во енергетската равенка се добива:

$$\frac{p_{at}}{\rho} + \frac{v^2}{2} + e_p = g \cdot H_g + \frac{p_{at}}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \cdot h,$$

$$e_p = g \cdot H_g + g \cdot h = g(H_g + h)$$

*Пример:* За да се транспортира течноста од резервоарот (а) до резервоарот (б), (сл. 47), пумпата Р мора да доведе енергија за совладување на геодетската висина  $H_g$  и енергија потребна за совладување на хидрауличните отпори.

$$h = \frac{\Delta e}{g}$$



Сл. 47: Шема на постројка со пумпа

## 20. ИСТЕКУВАЊЕ НА ТЕЧНОСТИ НИЗ МАЛ ОТВОР

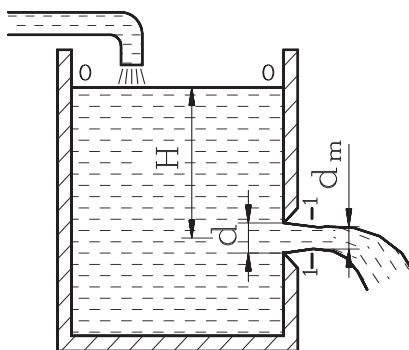
Некогаш многу повеќе енергија се губи поради локалните (месни) отпори, така што линиските загуби на енергија се незнателни и се занемаруваат во однос на месните. Таков вид струење е истекувањето низ мал отвор при излегување на течноста од садот, бидејќи тогаш скоро целата загуба на енергија се случува поради месните (локални) отпори.

## 20.1 Истекување низ мал бочен отвор во тенок сид

Малите отвори низ коишто истекува течноста се места каде што се нагласени локалните отпори при струењето. Има повеќе видови на отвори, но истекување низ мал отвор во тенок сид често се среќава кога течноста истекува од резервоарот. Резервоарите обично се со тенки сидови или пак отворот е обработен така што млазот ги допира само острите рабови, а не и бочната површина на отворот (сл. 48).

Од резервоарот во кој нивото на течноста се одржува со континуиран дотур, нека отворот за истекување се наоѓа на висина (длабочина)  $H$ . Брзината на истекување  $v_1$  на течноста во идеални услови ќе биде колку брзината на слободно паѓање од висина  $H$ . Протокот на течноста низ отворот изнесува:

$$q_{v1} = A \cdot v_1 \text{ (m}^3\text{/s) или [m}^3\text{/s]}$$



Сл. 48 Истекување низ мал отвор во тенок сид при константно ниво

За реални услови брзината на истекување се определува со примена на Бернулиевата равенка, која се поставува за пресеците 0 – 0 (површината на резервоарот) и 1 – 1 (на излезот од отворот за истекување).

$$\frac{v_0^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\rho \cdot g} + z_0 = \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p}{\rho \cdot g} + z_1 + h$$

Бидејќи:  $v_0=0$ ,  $z_0 = H$ ,  $z_1 = 0$ ,  $h = \xi \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g}$ , следува дека:

$$H = \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \xi \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \cdot (1 + \xi)$$

$$v_1^2 = \frac{1}{1 + \xi} \cdot 2 \cdot g \cdot H$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \text{ [m/s], каде:}$$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}}$$

$\varphi < 1$  е брзински коефициент на истекување. За вода тој изнесува од 0,96 до 1. Големината на коефициентот зависи од обликот на отворот, висината  $H$  и физичките својства на течноста. Експерименталните испитувања покажале дека напречниот пресек  $A$  на млазот се намалува приближно за 20% поради неговата контракција (сл. 49). Коефициентот на контракција се определува според равенката:

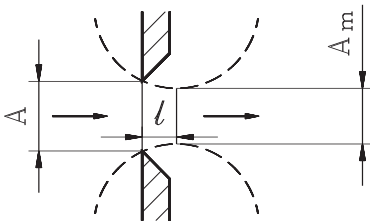
$$\psi = \frac{A_m}{A} < 1 \Rightarrow A_m = \psi \cdot A \text{ каде што:}$$

$A_m$  – минимален пресек на млазот.

Големината на протокот се определува според равенката:

$$q_V = v_1 \cdot A_m = \varphi \cdot \psi \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \text{ [m}^3\text{/s], каде што:}$$

$$\mu = \varphi \cdot \psi < 1 - \text{коефициент на истекување.}$$



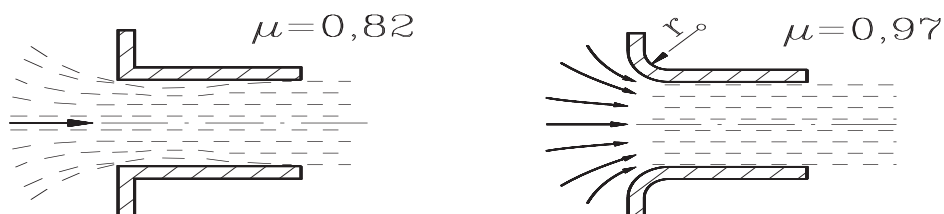
Сл. 49 Контракција на млазот

Вредноста на коефициентот  $\mu$  се определува експериментално и претставува функција од Рејнолдсовиот број  $\mu = f(R_e)$ . Неговата големина зависи од обликот на отворот и физичките својства на течноста.

За намалување на отпорот од триење, отворот се обработува или се користат приклучни елементи (млазници) со остри или заоблени рабови како на сл. 50.

Инаку вредноста на коефициентот на истекување во општ случај се движи во границите:

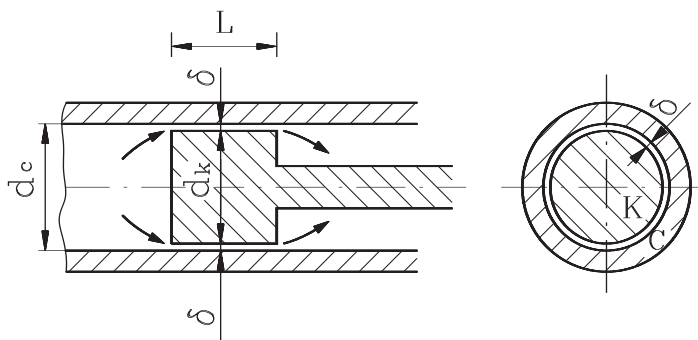
$$0,5 < \mu < 1,0$$



Сл. 50 Приклучни елементи (млазници)

## 20.2 Истекување низ прстенест зјај

Истекувањето низ прстенест зјај е честа појава во практиката. Се среќава кај хидрауличните цилиндри, мотори, запчеста пумпа, запчест хидрауличен мотор, ротор и статор кај хидрауличните машини и во многу други случаи.



Сл. 51 Истекување низ прстенест зјај

$$d_c = d_{sr} + \delta,$$

$$d_k = d_{sr} - \delta,$$

$$d_{sr} = \frac{d_c + d_k}{2}$$

На сл. 51 е прикажан прстенест зјај меѓу работен цилиндар С и клип К кој се движи низ цилиндарот. Кога зјајот меѓу надворешната и внатрешната површина на цилиндарот е многу мал  $\delta = \frac{d_c - d_k}{2}$ , тогаш падот на притисокот ( $\Delta p$ ) и големината на протокот ( $q_v$ ) можат да се пресметаат со изразите:

$$\Delta p = \frac{12 \cdot \eta \cdot q_v \cdot L}{d_{sr} \cdot \pi \cdot \delta^3} \text{ [Pa];} \quad q_v = \frac{\Delta p \cdot d_{sr} \cdot \pi \cdot \delta^3}{12 \cdot \eta \cdot L} \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Ако зјајот е многу мал, имаме случај како кај капиларните садови и струењето е со огромни отпори. Експериментално е докажано дека за да постои истекување со средни отпори зјајот треба да има димензии  $b = (2 - 8) \text{ [}\mu\text{m]}$ .

## 21. ХИДРАУЛИЧЕН УДАР И МЕРКИ ЗА НЕГОВО НАДМИНУВАЊЕ

Кај појавата кавитација беше споменат терминот хидрауличен удар како последица на нагла (моментална) промена на брзината на струење, односно работниот притисок. Моменталното зголемување на притисокот во хидрауличниот систем (инсталација) е појава наречена **хидрауличен удар**. Оваа несакана и негативна појава за инсталацијата се манифестира со треперење на целиот систем, удари, остри звуци и ако не е заштитен системот, може да предизвика хаварија. Причините за таа појава може да бидат:

- а) нагло отворање или затворање на вентили,
- б) изненадно запирање на пумпата за довод на течен флуид (прекин на електрична струја).

Најсилен хидрауличен удар настанува при моментално затворање на вентил во системот, при што моментално се запира движењето на флуидот (течноста).

Тоа особено е карактеристично при големи брзини на струење и големи протоци, бидејќи тогаш кинетичката енергија на течноста во непосредна близина на вентилот се претвора во енергија на притисок и предизвикува повеќекратно зголемување на работниот притисок во хидрауличниот систем. Таа појава особено би се манифестирала во современите хидраулични системи ако не се осигурени (заштитени), бидејќи брзините на струење се голе

ми, а затворањето на вентилите или промената на правецот на струење со распоредниците се врши за делови од секундата. Моменталното зголемување на притисокот  $\Delta p$  во системот се пресметува според равенката:

$$\Delta p = p_2 - p_1 \text{ или } p = \rho \cdot c \cdot v \text{ [Pa]}, \text{ каде што:}$$

$\rho$  - густина на течноста,

$v$  - средна брзина на струење,

$c$  – брзина на простирање на ударниот бран, т.е. простирање на звукот низ течноста.

$$c = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{k \cdot D}{E \cdot \delta}}} \text{ [m/s]}$$

$k$  – модул на еластичност на течноста,

$E$  – модул на еластичност на материјалот од кој е изработена цевката.

Времетраењето на хидрауличниот удар или период  $T$  е време додека ударниот бран ја помине двапати должината на цевко водот (од препреката - место кај што е запрено струењето до резервоарот во системот и повторно до препреката).

$$T = \frac{2 \cdot L}{c} \text{ [s]}$$

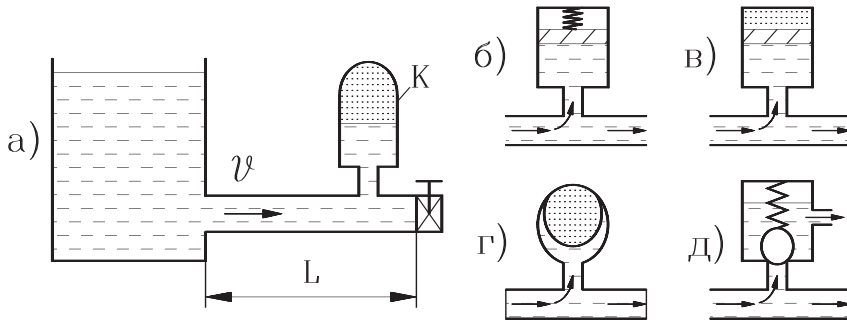
Доколку времетраењето на затворање на вентилот  $t$  е помало, односно поголемо од периодата  $T$ , хидрауличниот удар може да биде:

$t < T$  – потполн (разорен) хидрауличен удар,

$t > T$  – непотполн (индиректен) хидрауличен удар.

За намалување на штетните последици од хидрауличниот удар се врши осигурување на системите, со вградување на дополнителни елементи (компензатори на ударот), претставени на сл. 52.

Постојат повеќе видови на компензатори и тоа:



Сл. 52 Видови на компензатори

- а) воздушен компензатор,
- б) клипен компензатор со пружина,
- в) клипен компензатор со гасна комора,
- г) хидропневматски компензатор со мембрана,
- д) вентилски компензатор со пружина, и други изведби.

Со компензаторите се намалува периодата на хидрауличниот удар  $T$  на тој на чин што при моментално зголемување на притисокот во системот, дел од работната течност навлегува во компензаторот.

Кај *воздушниот компензатор* (сл. 52а), бидејќи воздухот е стислива материја, работната течност, под дејство на зголемениот притисок, го исполнува компензаторот збивајќи го воздухот во минимален волумен. Штом ќе се нормализира работниот притисок, работната течност се повлекува (враќа) во системот под дејство на притисокот на збиениот воздух.

Кај *клипниот компензатор со пружина* (сл. 52б), работната течност со зголемен притисок го поместува клипот нагоре збивајќи ја пружината. Со нормализирање на работниот притисок во системот, силата на збиената пружина го враќа клипот во првобитната положба, при што се враќа работната течност во системот. На ист начин функционираат и компензаторите на сл. 52 в и г.

За компензаторот на сл. 52д карактеристично е тоа што има сигурносен вентил и преливен канал. Кога работниот притисок во системот ќе се зголеми, ја совладува силата на пружината и го отвора сигурносниот вентил, па дел од работната течност



навлегува во компензаторот. Ако хидрауличниот удар е со силен интензитет, количината на течноста што навлегува во компензаторот е голема и преку преливниот канал ќе се врати во резервоарот на системот.

Важно е да се напомене местото на вградување на компензаторите кое е секогаш во непосредна близина на вентилите (препреките), каде што се предизвикува хидрауличниот удар. Од сите видови компензатори почесто се вградуваат воздушните компензатори со сигурносен вентил. Клипните компензатори поретко се вградуваат поради отпорите при движење на клипот.

## 22. ДВИЖЕЊЕ НА ТЕЧНОСТИ НИЗ ОТВОРЕН КАНАЛ

Движењето на течност низ отворен канал се разликува од струењето низ цевка бидејќи во каналот течноста има слободна површина на која дејствува атмосферски притисок. Ако дното на каналот е хоризонтално тогаш и површината на течноста ќе биде хоризонтална, а течноста ќе мирува. Ако дното на каналот се навали под одреден агол со хоризонталната површина (сл. 53), тогаш се навалува целата маса на течноста и нејзината површина ќе биде навалена. На честичките од течноста ќе дејствува компонентата од силата на Земјината тежа која на честичките им дава одредена брзина во правец на каналот, како што е претставено на сликата. Масата на течност ( $m$ ) во пресекот 1 – 1 која се наоѓа на длабочина  $h'$  под површината на течноста има брзина  $h_1 - h'$ , сметајќи од правецот  $a - a$ . На површината на течноста дејствува атмосферскиот притисок ( $p_0$ ), а на длабочина  $h'$  под површината на течноста притисокот ќе има вредност  $p_0 + h' \cdot \rho \cdot g$ . Во пресекот 2 – 2 истата маса на течност ( $m$ ) ќе биде на длабочина  $h''$ , а притисокот на таа длабочина е  $p_0 + h'' \cdot \rho \cdot g$ .

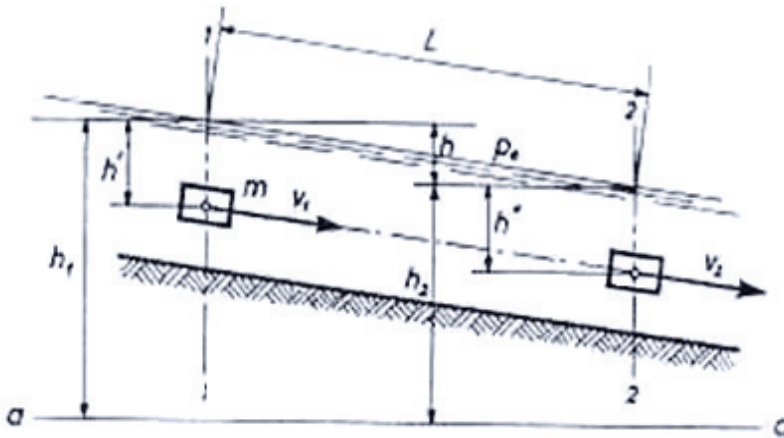
Бернулиевата равенка за **идеална** течност за пресеците 1 – 1 и 2 – 2 ќе биде:

$$h_1 - h' + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + \frac{(p_0 + h' \cdot \rho \cdot g)}{\rho \cdot g} = h_2 - h'' + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + \frac{(p_0 + h'' \cdot \rho \cdot g)}{\rho \cdot g}$$

По математичко средување на равенката се добива:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

Бидејќи во равенката ги нема длабочините  $h'$  и  $h''$ , последната равенка има *општ* карактер, и важи за честички на која било длабочина или на површината на течноста.



Сл.53 Протекување низ отворен канал

Кај **реална** течност, дел од енергијата на течноста во пресек 1 – 1 ќе се потроши за совладување на отпорот од триењето ( $h_t$ ) за да пристигне во пресекот 2 – 2. Тогаш општата равенка ќе го има обликот:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_t$$

При движење на течност низ отворен канал се можни след ниве случаи:

**а) Водата во каналот да се движи еднолично**

Во тој случај брзината на движење е секогаш еднаква, т.е.

$$v_1 = v_2$$

Тогаш равенката за движење низ отворен канал (2) добива облик:

$$h_1 - h_2 = h = h_t$$

Од последната равенка следува како заклучок: *енергијата на положба ( $h$ ) за течност со маса  $m$  која се движи еднолично, се употребува само за совладување на отпорот на триење ( $h_f$ ).*

При едноличното движење на течност во отворен канал е потребен извесен наклон (пад) со кој би се надоместиле загубите на енергија заради триењето. Висината  $h$  се вика *загуба на висината*, која го претставува падот на течноста за одредена должина  $L$ . Се пресметува релативен пад  $R_p$  (%) по единица должина според равенката:

$$R_p = \frac{h}{L} (\%)$$

**б) Водата во каналот се движи забрзано**

Забрзано движење на водата во отворен канал настапува ако вредноста на релативниот пад  $R_p$  (наклонот) на каналот е поголем отколку што е потребно за совладување на отпорот на триење или ако ширината на каналот се намалува. Ако вредноста на релативниот пад  $R_p$  е помала или ако ширината на каналот се зголемува, движењето на течноста ќе биде забавено.

**в) Пресметување на каналот**

Големината на отпорот на триење во каналот зависи од:

- обликот на каналот,
- должината на каналот,
- брзината на струење на течноста и
- рапавоста на ѕидовите на каналот.

1. Влијание на обликот на каналот. Ако низ каналот се движи еднаква количина на течност во единица време  $Q$  со средна брзина  $u$ , каналот треба да има напречен пресек  $A$ :

$$A = \frac{Q}{u} [\text{m}^2]$$

Каналот може да има различен облик (плиток, длабок, широк, тесен, со правоаголен, трапезен, кружен или валчест облик) а сепак да го има потребниот напречен пресек. Најповолен облик на каналот ќе биде кој покрај бараниот напречен пресек ќе има најмала навлажнета површина,

заради триењето на течноста со сидовите на каналот. Кај помала навлажнета површина има помала загуба на енергија од триење. Како мерка за поволен облик на канал се зема односот на напречниот пресек на каналот и зафатот на навлажнета површина  $U$  кој е наречен **хидрауличен радиус  $R$** , односно:

$$R = \frac{A}{U} [m]$$

Од последната равенка може да се констатира дека за поголема вредност на  $R$  за дадена вредност на напречниот пресек, каналот ќе биде поволен бидејќи вредноста на навлажнета површина ќе биде помала и обратно.

2. Должината на каналот има негативно влијание бидејќи колку е поголема должината на каналот, загубите на енергија за совладување на отпорот од триење се поголеми и обратно.
3. Брзината на струење има негативно влијание бидејќи секогаш во каналите струењето е турбулентно и загубите на енергија поради совладување на отпорот од триење се пропорционални со квадратот на брзината на струење на течноста. Кај симетрични канали максималната брзина е во средината на текот, а на дното и бочните страни почнува од вредност нула за во средината да достигне максимална вредност.
4. Рапавоста на сидовите на каналот има влијание врз големината на триењето меѓу течноста и сидовите. Но, експериментално е докажано дека од обликот на сидот зависи големината на брзината на струење на течноста. Ако е мала брзината на струење, тогаш постои опасност од таложење на нанос и тиња, а со големи брзини настанува брзо трошење на сидовите на каналот. Практичните податоци за средна брзина на струење и рапавост на сидот се претставени во табели кои се користат при градење на канали.

Од наведените карактеристики се поставува прашање кој е најповолен облик на канал? *За најповолен облик се дефинира каналот со релативен зададен пад (наклон) и потребен протек да има најмал напречен пресек а најголема средна брзина на струење.* Според хидрауличните пресметки, кружниот облик на каналот е најповолен, а потоа полукружниот или јајцевиден напречен пресек. Со кружен напречен пресек се употребуваат канали само во мрежата за канализација, а во другите случаи најчесто се употребуваат каналите со правоаголен и трапезен облик.

При определување на обликот за каналот особено влијание имаат следните фактори: хидрауличните услови, материјалот од кој се изработува, должината, цената, обликот на теренот на кој што се гради, видот на течноста...

Прашања за утврдување:

1. Што е струјна линија, а што струен проток ?
2. Како се одредува средна брзина на струење ?
3. Од кои членови е составена Бернулиевата равенка ?
4. Што се мери со Вентуриевата цевка ?
5. Која е разликата меѓу ламинарно и турболентно струење ?
6. Што е критична брзина на струење ?
7. Кој број се вика Рејнолдсов број ?
8. Какви загуби на енергија познаваш ?
9. Што е хидрауличен удар ?
10. Кои мерки за намалување на хидрауличен удар ги знаеш ?
11. Какво е движењето на течноста во отворен канал ?

### Заклучок

Со помош на наставните единици од хидродинамиката учениците се запознаваат со видовите на струења, основните равенки за течни флуиди (Бернулиева и Равенката на континуитет), Рејнолдсовиот број и поимот за критична брзина на струење. Низ содржините и илустрациите се запознаваат со поимите на хидрауличната енергија, загубите на енергија, каде и зошто настануваат загуби и методите за нивно намалување. Се запознаваат со поимот за хидрауличен удар во хидрауличните инсталации и методите за негово ублажување. Се среќаваат со видовите на движење на течности низ отворени канали и како се пресметува и избира најповолниот облик на каналот. Со помош на решените примери се презентирани практични проблеми кои може да се решаваат со помош на равенките и различни услови на состојбата. Стекнатото искуство може да се примени во практиката или за надградување при натамошна едукација.

## ПРИМЕРИ:

1. За колкава вредност на критичната брзина ( $v_{kr}$ ) водата почнува турбулентно да струи низ цевка со  $d = 25$  [mm], ако работната температура изнесува  $t = 20$  [°C], а коефициентот на кинематска вискозност  $\nu = 1,2 \cdot 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s]?

*Решение:*

$$R_e = \frac{v_{kr} \cdot d}{\nu} \Rightarrow v_{kr} = \frac{R_{ekr} \cdot \nu}{d} = \frac{2784 \cdot 1,2 \cdot 10^{-6}}{0,025} = 0,11136 \text{ [m/s]},$$
$$v_{kr} = 0,11136 \text{ [m/s]} = 400,896 \text{ [m/h]}.$$

2. Низ цевка со дијаметар  $d = 180$  [mm] струи масло со температура  $t = 72$  [°C] и брзина  $u = 1,2$  [m/s]. Какво ќе биде струењето?

*Решение:*

За загреано масло на  $72$  [°C],  $\nu = 0,39 \cdot 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s],

$$R_e = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{1,2 \cdot 0,18}{0,39 \cdot 10^{-6}} = 553846 > 2320,$$

што значи дека струењето е турбулентно.

3. Низ цевковод со дијаметар  $d = 150$  [mm] протекнува нафта со проток  $q_V = 15$  [m<sup>3</sup>/s]. Да се определи видот на струењето и критичната брзина за нафта, ако коефициентот на кинематска вискозност изнесува  $\nu = 0,415$  [cm<sup>2</sup>/s] ?

*Решение:*

$$u_{kr} = 0,64 \text{ [m/s]}.$$

4. Со колкава брзина ќе истекува вода од сад низ бочен отвор со дијаметар од  $10$  [mm], ако отворот се наоѓа на  $100$  [mm] од површината на водата? Брзинскиот коефициент на истеку

вање е  $\varphi = 0,75$ , а коефициентот на контракција е  $\psi = 0,85$ . Колку вода ќе истече од садот за еден час?

*Решение:*

$$u_1 = 1,05 \text{ [m/s]}; \quad q_V = 0,189 \text{ [m}^3\text{/h]}.$$

5. Низ цевка со дијаметар  $d = 200 \text{ [mm]}$  и должина  $L = 1,2 \text{ [m]}$  струи течност со  $q_V = 0,5 \text{ [m}^3\text{/min]}$  и густина  $\rho = 880 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ . Колкава ќе биде средната брзина на струењето ( $u_{sr}$ ) и падот на притисокот ( $\Delta p$ ) на крајот од цевката, ако коефициентот на отпорот изнесува  $\lambda = 0,015$ ?

*Решение:*

$$u_{sr} = 0,265 \text{ [m/s]}; \quad \Delta p = 2,78 \text{ [Pa]}.$$

6. Од резервоар истекува вода преку цевка со дијаметар  $d = 0,1 \text{ [m]}$  и должина  $L = 50 \text{ [m]}$ . Цевката е приклучена на резервоар на длабочина  $H = 4 \text{ [m]}$ . Ако коефициентот на отпор поради триење низ цевката изнесува  $\lambda = 0,025$ , коефициентот на локалниот отпор на влез на цевката  $\xi_1 = 0,5$ , а кај вентилот  $\xi_2 = 2,5$ , да се определи големината на протокот  $q_V \text{ [m}^3\text{/s]}$  на крајот од цевката и големината на брзината на струење  $u \text{ [m/s]}$  низ цевката.

*Решение:*

$$u = 2,18 \text{ [m/s]}, \quad q_V = 0,017 \text{ [m}^3\text{/s]}.$$

7. Да се определи видот на струење на вода низ цевка (ламинарно или турбулентно) со дијаметар  $d = 10 \text{ [sm]}$ , ако протокот на водата изнесува  $Q = 5 \text{ [l/s]}$  и со кинематска вискозност  $\nu = 0,0117 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{/s]}$ .

*Решение:*

$$Re = 53846$$



Бидејќи  $53846 > 13800$ , струењето во цевката е турбулентно.

8. Да се определи масата на маслото со густина  $\rho=0,8[\text{gr}/\text{sm}^3]$ , кое истекува за  $t=10$  минути од резервоар со мал кружен бочен отвор со дијаметар  $d=10$  [mm], ако центарот на отворот се наоѓа на висина  $H=2$ [m], под нивото на маслото во резервоарот и ако коефициентот на истекување изнесува  $\varphi = 0,62$ .

*Решение:*

$$G = 83,97 \text{ [kg]}$$



# П Н Е В М А Т И К А



## 23. РАЗВОЈ И ПОДЕЛБА НА ПНЕВМАТИКАТА

Пневматиката, исто како и хидрауликата, е многу застапена во современата техника, особено во автоматизацијата, бидејќи пневматските уреди се одликуваат со голема економичност и едноставна конструкција. Особено значајна примена имаат во средини со тешки услови за работа, високи притисоци, големи работни температури, каде што има опасност од експлозија итн.

Пневматските инсталации се применуваат во валавниците, индустријата за стакло, металопреработувачката индустрија, дрвната индустрија, медицината, транспортот...

Пневматските, хидрауличните и електричните уреди често пати успешно се надополнуваат и како комбинирани инсталации бидејќи во потполност ги исполнуваат сите поставени услови при проектирање на сложени конструкции. Првите пневматски уреди, кои се употребувале се ветерниците и ковачкиот мев. Подоцна индустријата за оружје целосно е базирана врз законите на пневматиката. Денес, широка примена на пневматиката среќава ме во ракетната техника, авиоиндустријата, медицината и информатичката технологија.

Пневматиката, според големината на работниот притисок што го користи, се дели на неколку области, и тоа:

1. Пневматика на ниски притисоци на работниот флуид до 1 [bar]- се користи за пренос и обработка на податоци во информатиката. Таа област се нарекува флуидика.
2. Пневматика за средни притисоци (1 до 10) [bar]- најчесто се применува во индустријата, па затоа се нарекува индустриска.
3. Пневматика на високи притисоци (10 до 500) [bar]- се применува во индустриските уреди, кои работат со многу големи работни брзини.
4. Пневматика за многу високи работни притисоци, преку 500 [bar] - се применува кај специјални индустриски и технички уреди.

## 24. СПОРЕДУВАЊЕ НА ПНЕВМАТСКИ И ХИДРАУЛИЧНИ СИСТЕМИ

Ако пневматските системи се споредат со хидрауличните, може да се констатираат следните предности и недостатоци:

### *Предности:*

1. Воздухот, кој се користи како работен флуид во пневматиката, го има во неограничени количини. Тој, под притисок, лесно струи низ пневматските инсталации и уреди.
2. Компримираниот воздух не е запалив и нема опасност од експлозија при работата, па затоа пневматските уреди може да се употребуваат при големи работни температури, до 2000<sup>0</sup>С. Тоа значи дека нема потреба од дополнителна опрема за ладење и заштита на системот.
3. Сите пневматски уреди се со едноставна конструкција, лесни за одржување и економични во експлоатацијата.
4. Извршните уреди се со мали димензии и нечувствителни на преоптоварувања. Поради едноставната конструкција работат со големи брзини на струење и можат да издржат нагли и континуирани промени.
5. Системот е секогаш едноцевен, без повратни водови, значи за неговата изведба треба помалку материјал.
6. Искористениот компримиран воздух, кој се испушта во околината е еколошки чист.
7. За изведба на пневматските системи се користат голем број стандардни елементи.
8. Тие работат со висок степен на автоматизираност.
9. Една компресорска станица може да опслужува повеќе системи.

### *Недостатоци:*

1. Пред користење во пневматскиот систем компримираниот воздух треба добро да се подготви, т.е да се отстранат нечистотиите и влагата.
2. Бидејќи воздухот е многу стислива материја, промената на неговиот волумен негативно се одразува врз прецизноста на извршните органи.

3. Поради влажноста на компримираниот воздух, секогаш е присутна потенцијална опасност од корозија на елементите од системот.
4. За да функционира системот, мора да постои компресорска станица.
5. Пневматските системи не се употребуваат за пренесување на големи моќности.
6. За садовите под притисок потребно е дополнително осигурување, во сила се секогаш строги законски норми.

## **25. СВОЈСТВА НА ВОЗДУХОТ КАКО РАБОТЕН ФЛУИД**

Во пневматските системи, како работен флуид најчесто се користи атмосферскиот воздух, а многу ретко чисти гасови како што се кислородот, азотот или инертни компримирани гасови. Бидејќи воздухот е смеса од повеќе гасови, тој лесно го исполнува работниот простор. Исто така знаеме дека е многу стислива материја која под притисок лесно го менува својот волумен. Под дејство на покачени температури, воздухот лесно експандира и таа појава кај него е многу поизразена во споредба со другите работни флуиди. Во пневматските инсталации компримираниот воздух секогаш струи од зоната со поголем кон зоната со помал притисок. Струењето на воздухот под притисок се користи за пренесување сила на притисок заради извршување работа. Струењето може да биде турбулентно или ламинарно, исто како кај хидрауличните системи, што зависи од големината на брзината на струење. Сите реални гасови се вискозни. Поради таа особина (вискозност) при струење на гасови низ цевководи, доаѓа до пад на работниот притисок. Вкупниот пад на притисокот, освен од вискозноста, зависи и од должината на цевководот, дијаметарот, рапавоста на неговата внатрешна површина, обликот на напречниот пресек на цевководот и промените на правецот на струење (кривини, колена, рачви). Затоа, при проектирањето, треба да се избере оптимален дијаметар на цевководот според следниве критериуми:

1. Големината на работниот притисок,
2. Големината на протокот,
3. Должината на цевководот,

#### 4. Дозволениот пад на работниот притисок.

##### 25.1 Основни големини на состојбата

Основните големини на состојбата кај гасовите се: температурата ( $T$ ), притисокот ( $p$ ) и густината ( $\rho$ ), односно специфичниот волумен ( $\nu$ ).

**Притисокот** на гасот ( $p$ ) е однос меѓу силата со која молекулите дејствуваат на ѕидот од садот, на единица површина, односно:

$$p = \frac{F}{A} \text{ [Pa]}$$

Нормалниот притисок изнесува  $1,01325 \text{ [bar]} = 101325 \text{ [Pa]} = 101325 \text{ [N/m}^2\text{]}$ , што е вредност на една физичка атмосфера, при температура  $T = 273,15 \text{ [K]}$ , или  $t = 0 \text{ [}^\circ\text{C]}$ .

**Густината** на гасот ( $\rho$ ) претставува негова маса во единица волумен, односно волумен што го зафаќа гас со маса од еден килограм:

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

**Специфичен волумен** ( $\nu_s$ ) реципрочна вредност на густината, односно волумен што го зафаќа гас со маса од еден килограм:

$$\nu_s = \nu_s = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m} \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

**Температурата** ( $T$ ) на гасот претставува степен на загреаност и се изразува во Келвинови степени. Познато е дека при покачени температури, молекулите на гасот се движат со поголеми брзини и обратно. На температура од апсолутна нула  $T = 0 \text{ [K]} = -273,15 \text{ [}^\circ\text{C]}$ , молекулите не се движат. Во практиката температурата се мери најчесто со Целзиусови степени и се означува со  $t \text{ [}^\circ\text{C]}$ . Врската помеѓу Келвиновите и Целзиусовите степени е дадена со равенката:

$$T \text{ [K]} = 273 + t \text{ [}^\circ\text{C]}.$$



## 26. РАВЕНКА НА СОСТОЈБА НА РЕАЛНИ ГАСОВИ

Кај гасовите, густината ( $\rho$ ) е променлива големина и зависи од големината на притисокот ( $p$ ) и температурата ( $T$ ). Таа зависност е определена со равенката на состојба на гасот (Геј - Лисаков - Мариотов закон), која за идеални гасови гласи

$$\frac{p}{\rho} = p \cdot \nu = R \cdot T \quad \text{каде што:}$$

$p$  [Pa] – апсолутен притисок на гасот,

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] – густина на гасот,

$\nu = 1/\rho$  [m<sup>3</sup>/kg] – специфичен волумен,

$R$  [J/kg K] – гасна константа, за сув воздух изнесува 287,

$T$  [K] – температура.

Равенката на состојбата може да се прикаже и во следниот облик:

$$p = \rho \cdot R \cdot T = f(\rho, T)$$

Промената на густината кај гасовите, може да се пресмета со равенката:

$$\rho = \frac{p \cdot T_0}{p_0 \cdot T} \cdot \rho_0 \quad [\text{kg/m}^3] \quad \text{каде што:}$$

$\rho_0, p_0, T_0$  - вредности на почетокот, а

$\rho, p, T$  – вредности на крајот од промената на состојбата.

### 26.1 Основни промени на состојбата

Во текот на движењето, промената на состојбата на гасот, може да биде:

**Изотермска** – кога нема промена на температурата ( $T = \text{const.}$ ). Тогаш густината на гасот е функција од промената на притисокот, т.е.  $\rho = f(p)$ , а равенката на состојба има облик:

$$p_1 \cdot \nu_1 = R \cdot T_1,$$

$$p_2 \cdot \nu_2 = R \cdot T_2.$$

За  $T = \text{const.}$  ќе биде:  $p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2 = \text{const.}$  односно:

$$\frac{p_1}{\rho_1} = \frac{p_2}{\rho_2} \quad (\text{Бојл-Мариотов закон}).$$

**Изобарска** – кога нема промена на притисокот ( $p = \text{const.}$ ), тогаш густината на гасот е функција од промената на температурата, т.е.  $\rho = f(T)$ , а равенката на состојба ќе има облик:

$$p_1 \cdot v_1 = R \cdot T_1, \\ p_2 \cdot v_2 = R \cdot T_2.$$

За  $p = \text{const.}$   $\Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$ , т.е.  $\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{T_1}{T_2}$  (Геј – Лисаков закон).

**Изохорска** – кога нема промена на волуменот ( $v = \text{const.}$ ) тогаш равенката на состојба има облик:

$$p_1 \cdot v_1 = RT_1, \\ p_2 \cdot v_2 = RT_2.$$

За  $v_1 = v_2 = \text{const.}$   $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$  (Шарлов закон).

**Политропска** (баротропска) промена, која е зададена со релацијата:

$\frac{p}{\rho^n} = \text{const.}$ , а равенката на состојба има облик:

$$p_1 \cdot v_1^n = p_2 \cdot v_2^n = \text{const.}$$

при што сите три големини на состојбата на гасот имаат променлива вредност. Овде  $n$  е експонент на политропата. Со промена на вредноста за експонентот  $n$ , се добиваат промените на состојбата и тоа:

за  $n = 0$ , се добива равенката на изобара ( $p = \text{const.}$ ),

за  $n = 1$ , равенката на изотерма ( $T = \text{const.}$ ) и

за  $n = \infty$ , равенката на изохора ( $v = \text{const.}$ ).

Во специјален случај, кога експонентот на политропата  $n = k$ , се добива Поасоновата равенка на изентропа (адијабата), која гласи:

$$\frac{P}{\rho^k} = \text{const.} \quad \text{каде што:}$$

$k = \frac{c_p}{c_v}$  - експонент на адијабатата,

$c_p$  [J/kg K] – специфична топлина при константен притисок на гасот ( $p = \text{const.}$ )

$c_v$  [J/kg K] – специфична топлина при константен волумен на гасот ( $v = \text{const.}$ ).

$$\text{За воздух при } 0 \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad k = \frac{1010}{720} = 1,4.$$

**Адијабатска** промена на состојбата на гасот е промена без размена на топлина со околината. При таква промена основните големини  $p$ ,  $v$  и  $T$  се променливи, а равенката на состојба има облик:

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} = \text{const.}$$

Кај изентропска (адијабатска) промена на состојбата на гасот, промената на густината од притисокот е зададена со релацијата:

$$\rho = \rho_0 \cdot \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{каде што:}$$

$\rho_0, P_0$  – вредности на почетокот на промената,  
 $\rho, P$  – вредности на крајот на промената.

## 27. СТРУЕЊЕ НА КОМПРИМИРАН ВОЗДУХ

Со основните промени на состојбата ги анализираме термодинамичките процеси, кои промената на енергијата во механичка работа, ја посматраат како последица од промената на состојбата. Меѓутоа, во пневматските системи, поголемо значење има претворањето на енергијата на притисок во механичка работа. При струење на компримиран воздух низ проводниците, енергијата на притисок се трансформира во сила на

притисок, која преку извршните уреди извршува механичка работа. Во пневматските уреди со автоматски или полуавтоматски машини, трансформација на енергијата се врши со струење на воздухот и експанзија (зголемување на волуменот). Струењето на компримиран воздух се користи за пренесување на силата на притисок, поради извршување определена работа.

Количината на компримиран воздух, која струи со брзина  $v$  [m/s] низ определен напречен пресек на проводникот  $A$  [m<sup>2</sup>], може да се пресмета со:

$$q_V = A \cdot v \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Во пресметките, честопати е потребно да се определи количината на компримиран воздух  $q_m$  [kg], што е потрошена во единица време. Таа количина се пресметува според равенката:

$$q_m = q_V \cdot \rho = A \cdot v \cdot \rho \quad [\text{kg/s}], \quad \text{каде што:}$$

$A$  [m<sup>2</sup>] – површина на напречниот пресек на проводникот,  
 $v$  [m/s] – средна брзина на струење на компримираниот воздух,  
 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] – густина на компримираниот воздух.

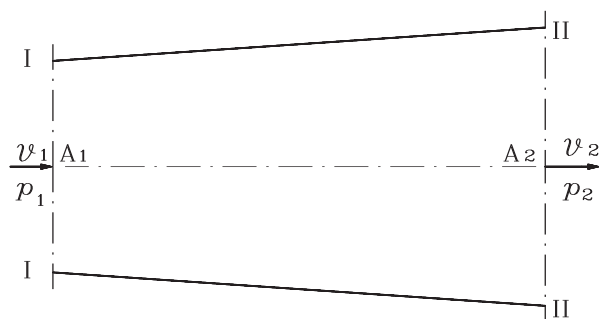
## 28. РАВЕНКА НА КОНТИНУИТЕТ

Да разгледаме цевкина инсталација на некој систем од пресекот I – I до пресекот II – II, со соодветни напречни пресеци  $A_1$  и  $A_2$  (Сл. 54). Количината на компримираниот воздух што ќе проструи низ пресекот I – I при стационарно струење ќе биде еднаква со количината што излегува низ пресекот II – II. Ова равенство претставува равенка на континуитет, која гласи:

$$q_m = q_V \cdot \rho = v_1 \cdot A_1 \cdot \rho = v_2 \cdot A_2 \cdot \rho \quad [\text{kg/s}], \quad \text{каде што:}$$

$v_1$  и  $v_2$  - средни брзини на струење,  
 $\rho_1$  и  $\rho_2$  - густини на компримираниот воздух во соодветните пресеци.

Треба да се напомене дека кај течните флуиди, равенката на континуитет важи и за волуменскиот проток, кој се мери во [m<sup>3</sup>/s].



Сл. 54 Цевкина инсталација

## 29. БЕРНУЛИЕВА РАВЕНКА

Бернулиевата равенка за компримиран воздух ја анализира вкупната енергија на флуидот, која претставува збир од кинетичката и потенцијалната енергија во течна или гасовита состојба, која струи низ проводникот. Компримираниот воздух има мала густина, а поради големата брзина на струење, кинетичката енергија и енергијата на притисок се значително поголеми од потенцијалната енергија. Да анализираме компримиран воздух, кој струи низ проводник (сл. 54). Во пресекот I - I, компримираниот воздух има средна брзина  $v_1$ , притисок  $p_1$  и густина  $\rho_1$ . Бидејќи потенцијалната енергија се занемарува, вкупната специфична енергија во тој пресек за маса од еден килограм изнесува:

$$e_1 = \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} \text{ [J/kg]}$$

Ако низ пресекот II - II струи истата количина на компримиран воздух со средна брзина  $v_2$ , притисок  $p_2$  и густина  $\rho_2$ , специфичната енергија ќе изнесува:

$$e_2 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \text{ [J/kg]}$$

При идеални услови на работа, кога не се зема во обзир вискозноста на компримираниот воздух, односно неговото триење, енергијата во пресекот I - I ќе биде еднаква со енергијата во пресекот II - II, односно:

$$e_1 = e_2 \quad \text{или} \quad \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho}$$

Во реални работни услови, поради струењето на комприми раниот воздух со голема брзина, има триење, па затоа дел од енергијата ќе се троши за совладување на отпорите од триење, и се претвора во топлина. Потрошената енергија за совладување на отпорите од триење ќе биде еднаква на разликата од енергиите во пресеците I - I и II - II, односно:

$$e = e_1 - e_2, \text{ или}$$

$$e = \left( \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} \right) - \left( \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \right)$$

Изгубената енергија, што се троши за совладување на отпорите при струење, во реални услови се манифестира како пад на работниот притисок по должината на проводникот во правецот на струење.

### **30. СПОРЕДУВАЊЕ НА ЗАГУБИТЕ ВО ЦЕВКИТЕ ОД ТРИЕЊЕ И ОД ПРОМЕНА НА НАСОКАТА НА ДВИЖЕЊЕ (СТРУЕЊЕ) НА ГАСОВИТЕ**

Во практиката, работниот притисок кај секој пневматски систем има определен пад во правецот на струење, односно од почетокот кон крајот на цевната инсталација. Падот на притисокот е последица од различни видови на отпори при струењето, а најголеми се отпорите од триење. При димензионирањето (пресметката) на цевководот, покрај отпорите од триење се земаат предвид и отпорите што се појавуваат како последица на промена на насоката на струење (локалните отпори) на гасовите.

Големината на отпорите од триење зависи од повеќе фактори. За пресметка на цевководот се употребува равенката на континуитет или Бернулиевата равенка, а големината на отпори

те се пресметува со примена на Бернулиевата равенка за определен пресек и положба.

Ако се примени Бернулиевата равенка за струење на воздух низ цевка со константен напречен пресек ( $A = \text{const}$ ), со константна средна брзина на струење ( $v = \text{const}$ ) и константна густина ( $\rho = \text{const.}$ ), таа ќе гласи:

$$p_1 = p_2 + \xi \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho$$

Енергијата на компримираниот воздух што се троши за совладување на отпорите при струење изнесува:

$$e = \xi \cdot \frac{v^2}{2}, \text{ каде што:}$$

$\xi$  - претставува коефициент на локалните отпори при струењето.

Големината на овој коефициент зависи од видот на струењето и геометриската форма на проводникот (цевководот).

За праволиниски проводници  $\xi$  се одредува со помош на изразот:

$$\xi = \lambda \cdot \frac{l}{d}, \text{ каде што:}$$

$l$  [m] - должина на проводникот,

$d$  [m] – внатрешен дијаметар на проводникот и

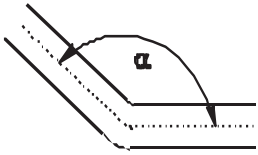
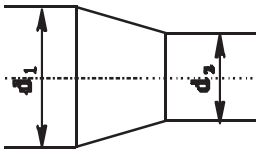
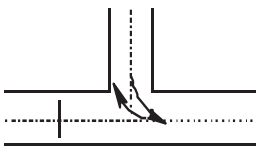
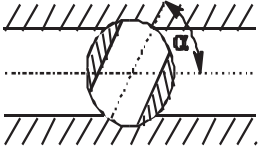
$\lambda$  - коефициент на отпорот, чија големина зависи од вредноста на Рејнолдсовиот број и релативната рапавост на внатрешната површина на проводникот.

За големината на коефициентот на локалните отпори  $\xi$  при струење на компримиран воздух низ проводници (цевководи) со променлив напречен пресек, какви што најчесто се применуваат, производителите на одредени елементи од системот ја даваат точната вредност на коефициентот  $\xi$ , која е добиена експериментално.

Ако се направи споредба на загубите од триење и локалните отпори, експериментално е докажано дека најголем дел од енергија (загуба) се троши за совладување на отпорите од триење. Истиот заклучок следува и при анализирање на равенките за

пресметка на количеството на енергија која се троши за совладување на отпорите при струење или за пресметка на коефициентот на локалните отпори. Големината на енергијата што се троши за совладување на отпорите од триење зависи пропорционално од квадратот на брзината на струење, при поголеми брзини на струење ќе има поголеми загуби на енергија и обратно. Големината на коефициентот на локални отпори зависи пропорционално од должината на проводникот, а обратно пропорционално од големината на напречниот пресек (дијаметарот). Големината на коефициентот на отпорот  $\xi$  има занемарливо влијание.

Во следната табела е даден преглед на неколку различни елементи од пневматски системи со зададени вредности на коефициентот  $\xi$ .

Елемент од пневматскиот систем	Шематски приказ	Коефициент на отпорите во зависност од обликот			
		$\alpha = 15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$
Кривина		$\xi = 0,05$	0,15	0,27	1,19
Нагло стеснување		$d_2^2/d_1^2 = 0,1$	0,2	0,4	0,6
		$\xi = 0,49$	0,42	0,33	0,25
T приклучок		$\xi = 1,3$			
Слабина		$\alpha = 10^\circ$	$30^\circ$	$50^\circ$	$90^\circ$
		$\xi = 0,8$	7,5	49,2	$\infty$



Прашања за утврдување:

1. Кои се предностите на пневматиката ?
2. Кои се недостатоците во однос на хидрауликата ?
3. Дали ги знаеш својствата на воздухот како работен флуид ?
4. Како гласи равенката на континуитет за гасовити флуиди ?
5. Какви видови на загуби познаваш ?
6. Што е изобарска промена ?
7. Што е политропска промена ?
8. Што е адијабатска промена ?
9. Зошто доаѓа до пад на работниот притисокот по должина на спроводните цевководи ?
10. Кои загуби на енергија се поголеми, од триење или од локални отпори ?

Заклучок:

Преку последната тема учениците се запознаваат со гасовите како работен флуид. Се информираат за разликите меѓу течните и гасовитите флуиди, својствата на воздухот како работен флуид и неговите основни карактеристики. Се запознаваат со условите за компримирање на воздухот, струењето низ пневматски инсталации, видовите отпори на струење и загубите на енергија кои настануваат поради тие отпори.

На крајот се прават споредувања за големината на загубите од триење и од локалните отпори (поради менување на правецот на струење). Од презентираниите информации може да се направат споредувања каков работен флуид да се примени за одредени ситуации (течен или гасовит), за определени работни услови. Основните податоци нудат доволно информации за успешно продолжување со едукацијата и следење на наставната програма од Хидропневматска техника во трета година. На крајот се дадени неколку задачи со кои може да се вежбаат равенките и учениците да се запознаат со основните закономерности.

## ПРИМЕРИ:

1. Да се определи густината на сув воздух при температура од 50 [°C] и натпритисок од 4 [bar].

*Решение:*

$$p = p_{at} + p_n = 1,01 + 4 = 5,01 \text{ [bar]} = 5,01 \cdot 10^5 \text{ [Pa]}.$$

$$\rho = \frac{1}{\nu} = \frac{p}{R \cdot T} = \frac{5,01 \cdot 10^5}{287 \cdot (273 + 50)} = 5,4 \text{ [kg/m}^3\text{]}.$$

2. Да се пресмета температурата во резервоар со волумен од 9 [m<sup>3</sup>], ако во него има 40 [kg] воздух со натпритисок од 3 [bar].

*Решение:*

$$T = \frac{p \cdot V}{m \cdot R} = \frac{(1,01 + 3) \cdot 14 \cdot 10^5}{40 \cdot 287} = 314 \text{ [K]}.$$

$$t = T - 273 = 41 \text{ [}^\circ\text{C]}.$$

3. Во цилиндар се збива 0,2 [kg] воздух при политропска промена со вредност на експонентот  $n = 1,3$ . Да се определат: почетниот и крајниот специфичен волумен на воздухот, ако почетниот притисок  $p_1 = 1,2$  [bar], при температура  $t = 14$  [°C]. Односот меѓу почетниот и крајниот волумен на воздухот во цилиндарот изнесува  $\frac{V_{s1}}{V_{s2}} = 3,5$ .

*Решение:*

$$V_1 = 0,69 \text{ [m}^3\text{/kg]};$$

$$V_2 = 0,2 \text{ [m}^3\text{/kg]};$$

$$p_2 = 1,2 \cdot 3,5^{1,3} \text{ [bar]} = 6,12 \text{ [bar]} = 6,12 \cdot 10^5 \text{ [Pa]}.$$

4. Да се определи притисокот на крајот од праволиниски гасовод со должина од 150 [m] и дијаметар  $d = 32$  [mm], а почетен притисок  $p_1 = 2$  [bar]. Средната брзина на струење изнесува  $v = 7$  [m/s], температурата  $t = 26$  [°C], густината  $\rho = 2,27$  [kg/m<sup>3</sup>],

коэффициентот на динамичка вискозност  $\eta = 158 \cdot 10^{-6} \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$  и  $\lambda = 0,024$ .

*Решение:*

$$p_2 = p_1 - \Delta p = 1,94 \text{ [bar]} = 1,94 \cdot 10^5 \text{ [Pa]}.$$

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Т. Бундалевски: „Механика на флуидите”, Скопје, 1992
2. М. Попов, С. Косовац: „Хидраулика и пнеуматика”, Белград, 1983
3. П. Митровиќ, П. Митов, З. Радојевиќ: „Хидраулика и пнеуматика”, Белград, 1993
4. М. Мирчевски: „Хидраулика со хидраулични машини 1” Скопје, 1981
5. П. Јанев Хидропневматска Техника за III и IV год, машинска струка, Скопје, 1996 год.
6. В. Зрниќ: „Пнеуматика”, Белград, 1980
7. Група автори: „Уљна хидраулика”, Белград, 1988
8. П. В. Коваљ: „Хидраулика”, Москва, 1979
9. Б. Черне: „Хидраулика”, Скопје, 1974
10. В. Летиќ, П. Малешев: „Увод во пневматиката”, Н. Сад, 1978
11. С. Николиќ, Д. Стојиќ: „Збирка решени задачи од Хидраулика со хидраулични машини”, Белград, 1976
12. С. Пановски: „Величини, единици, ознаки”, Битола, 1993