

Қазақстан Республикасының Білім және ғылым министрлігі

Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды мемлекеттік университеті



Дюсембаева А.Н., Танашева Н.К.

СҰЙЫҚ ЖӘНЕ ГАЗ МЕХАНИКАСЫ

5В071700-Жылу энергетикасы мамандығына арналған

электрондық оқу құралы

Buketov University

Қарағанды, 2018

Оқу үрдісінде қолдануға ұсынылды  
Профессор Ж.С. Ақылбаев атындағы жылу физикасы  
кафедрасының мәжілісінің 2018ж. 27.04. №9 хаттамасы  
Физика – техникалық факультетінің әдістемелік  
комиссиясы мәжілісінің 2018 ж. 04.05. №5 хаттамасы

Танашева Н.К., Дюсембаева А.Н. Сұйық және газ механикасы. «5В071700-  
Жылу энергетикасы» мамандығына арналған электрондық оқу құралы. –  
Қарағанды, 2018. – 97 б.

Электрондық оқу құралы «Сұйық және газ механикасы» пәніне сәйкес  
келеді. Басылым жоғары оқу орындарындағы физика-техникалық факультетінің  
5В071700 – «Жылу энергетикасы» және де басқа техникалық мамандықтарында  
оқитын студенттерге арналған.

## Кіріспе

*Сұйық және газ механикасы* – сұйық және газ қозғалысы мен тепе-теңдігінің негізгі заңдарын, сонымен қатар қатты денелермен күштік әсерлесуін қарастыратын ғылым.

Сұйық және газ механикасы математика, физика, техникалық термодинамиканың негізгі принциптерінен шығады және алынған нәтижелер эксперименттік зерттеулермен сәйкестендіріледі.

Сұйық және газ механикасын екі негізгі топқа бөлуге болады :

- *сұйық және газдың теориялық механикасы*, мұнда тамшылы сұйық және газдардың қозғалысы мен тепе-теңдігі теориясының негізгі ережелері қарастырылады (гидроаэростатика және гидроаэродинамиканың жалпы заңдары);

- *сұйық және газдың қолданбалы (немесе техникалық) механикасы* , яғни ондағы заңдарды практикалық жағдайларда қарастырады (кұбырөткізгіштердегі қозғалысты , саңылау мен насадкалардан өтуді , қатты денелердің еруі және т.б.).

«Сұйық және газ механикасы » пәнінде оқытылатын заңдарды білу және қолдану :

- барлық мүмкін болатын құбырөткізгіштердің (ауаөткізгіштер, суөткізгіштер, газөткізгіштер, буөткізгіштер) есебі үшін ;

- гидравликалық және ауа үрлегіш машиналарын (насостар, компрес сорлар, желдеткіштер ) құрастыру үшін ;

- қазандық қондырғыларын, пеш және кептіргіш қондырғыларды, ауа және газдан тазалайтын аппараттарды , жылуалмастырғыш аппараттарды жобалау үшін ;

- көптеген жылыту және желдеткіш қондырғалырының есебі және т.б. үшін қажет .

### *Қысқаша тарихи мәліметтер.*

Сұйық механикасы өзінің тарихи дамуында ұзақ жолдан өтті.

Гидрадинамиканың бірінші зачаткасы антиктік периодқа жатады. 15 ғасырдың ортасында Леонардо да Винчи (1452 – 1519жж.) бірінші рет зертханалық тәжірибие жасады. Ол саңылау мен суағар арқылы өтетін каналдардағы су қозғалысына қатысты кейбір сұрақтарды зерттеп эксперименттік гидравликаға бастаушы жол салды. ал Ньютон (1642 – 1724жж.) қозғалмалы сұйықтардағы ішкі үйкеліс туралы негізгі ережелерді айтты.

Теориялық және эксперименттік әдістер синтезіне негізделген сұйық механикасының қарқынды дамуы 20 ғасырға жатқызылады.

Қазіргі таңда авиациялық техникада, гидромашинажасауда, гидротехникалық құрылыста және жылу энергетикада қарқынды дамуда .

# 1 Сұйық пен газдың негізгі физикалық қасиеттері

## 1.1 Сұйық түсінігі анықтамасы, оның классификациясы

Сұйық – аққыштық қасиетке ие физикалық дене. Сұйықтың белгілі бір пішіні болмайды, ол құйылған ыдыс пішінін қабылдайды.

Сұйық және газ механикасында аққыштық қасиетке ие барлық ортаны «сұйық» терминімен байланыстыра қарастырады.

Техникалық қасиеттеріне байланысты сұйықты екі топқа болады: *аз сығылатын (тамшылы)* және *сығылатын (газтәрізді)*.

*Тамшылы сұйықтар* – өлшемі қандай да бір күш әсер етсе де өзгермейтін, белгілі бір көлемі сұйық, яғни мұндай сұйықтардың пішіні оңай өзгергенімен көлемі өзгере қоймады.

Тамшылы сұйықтарда:

- сығылғанда қарсылу мәні үлкен болады (толықтай сығылмайды);
- жанама және созылу күштеріне қарсылық мәні аз, ол температуралық ұлғаюдың аздығына, сұйық бөлшектері арасындағы үйкеліс күшінің мәні кіші болғанына байланысты.

Оларға су, мұнай, май, керосин, бензин, сынап және тағы басқалары жатады.

*Газтәрізді сұйықтар деп* – ыдыстың пішінін толықтай қабылдайтын және көлемі өзгертін сұйықтарды айтамыз. Олар сығылады және белгілі күштің әсерінен ұлғаяды, яғни мұндай сұйықтар пішінін де, көлемін де оңай өзгертеді.

Газтәрізді сұйықтарда (қалыпты жағдайдағы барлық газдар):

- температура жоғарлаған кезде көп мөлшерде сығылады;
- созушы күштерге қарсыласу мүлдем болмайды.

*Реалды(нақты) сұйықтар* – табиғатта бар сұйықтар.

*Идеал сұйық* – созу күштеріне ешқандай қарсыласу білдірмейтін абсолютті сығылмайтын, бөліктері абсолютті қозғалғыштыққа ие сұйықтар. Реалды сұйықты идеал сұйықпен ауыстыруға болады, бірақ тұтқырлық өзгерген кезде қажетті түзетулерді енгізеді.

## 1.2 Тығыздық

*Сұйықтың тығыздығы* – бірлік көлемдегі сұйық массасы. Сұйықтың тығыздығы келесі формуламен анықталады, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1.1)$$

мұндағы

$m$  - сұйықтың массасы, кг;

$V$  - сұйықтың көлемі, м<sup>3</sup>.

*Сұйықтың салыстырмалы тығыздығы* – берілген шарттардағы су ( $t=3,98^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho_c=1000\text{кг/м}^3$ ) тығыздығының қарастырылатын сұйық тығыздығына

қатынасы. Сұйықтың салыстырмалы тығыздығы төмендегі формуламен анықталады:

$$\rho_0 = \frac{\rho_c}{\rho_c}, \quad (1.2)$$

мұндағы

$\rho_c$  - қарастырылатын сұйық тығыздығы, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_c$  - берілген шарттардағы судың тығыздығы, кг/м<sup>3</sup>.

### 1.3 Меншікті салмақ

Сұйықтың меншікті салмақ – бірлік көлемдегі сұйықтың салмағы. Сұйықтың меншікті салмағы келесі формуламен анықталады, Н/м<sup>3</sup>:

$$\gamma = \frac{G}{V} = \rho g, \quad (1.3)$$

мұндағы

$G = mg$  - сұйықтың салмағы (Ньютон заңы), Н;

$g$  - еркін түсу үдеуі, м/с<sup>2</sup>.

Салыстырмалы меншікті салмақ –  $t=4^0\text{C}$  кезіндегі судың меншікті салмағының қарастырылатын сұйықтың меншікті салмағына қатынасы. Салыстырмалы меншікті салмақ төмендегі формуламен анықталады:

$$\gamma_0 = \frac{\gamma_{жс}}{\gamma_с}, \quad (1.4)$$

мұндағы

$\gamma_{жс}$  - қарастырылатын сұйықтың меншікті салмағы, Н/м<sup>3</sup>;

$\gamma_с$  - берілген шарттардағы судың меншікті салмағы, Н/м<sup>3</sup>.

### 1.4 Сығылғыштық

Сығылғыштық – қысым немесе температураның өзгерісі кезінде сұйықтың көлемін өзгерту қасиеті. Сұйықтың сығылғыштығы қысым 0,1 МПа ұлғайған кезде көлемнің өзгерісін (азаюын) көрсететін көлемдік сығылу коэффициентімен, м<sup>2</sup>/Н, сипатталады. Көлемдік сығылу коэффициенті келесі формуламен анықталады.

$$\beta_v = \frac{V - V_0}{P - P_0} \cdot \frac{1}{V_0}, \quad (1.5)$$

мұндағы

$V$  және  $V_0$  - сәйкесінше соңғы  $P$  және бастапқы  $P_0$  қысым кезіндегі көлемдер.

*Серпімділіктің көлемдік модулі* – көлемдік сығылу коэффициентіне кері шама. Серпімділіктің көлемдік модулі,  $\text{H}/\text{м}^2$ , төмендегі формуламен анықталады.

$$E_0 = \frac{1}{\beta_v}. \quad (1.6)$$

### 1.5 Температуралық ұлғаю

*Сұйықтың температуралық ұлғаюы* – температураның жоғарлауына байланысты сұйықтың көлемінің ұлғаю қасиеті. Ұлғаю шамасы температура  $1^\circ\text{C}$ -ге жоғарлаған кездегі көлемнің салыстырмалы ұлғаюын көрсететін температуралық ұлғаю коэффициентімен сипатталады, температуралық ұлғаю коэффициенті,  $1/^\circ\text{C}$ , келесі формуламен анықталады:

$$\beta_t = \frac{V_t - V_0}{t - t_0} \cdot \frac{1}{V_0}, \quad (1.7)$$

мұндағы

$V_0$  және  $V_t$  -сәйкесінше бастапқы  $t_0$  және соңғы  $t$  температуралардағы сұйықтың көлемі .

Белгілі бір сұйық үшін  $\beta_t$  және  $t_0$  температура кезіндегі көлемді біле отырып,  $t_0$ ,  $^\circ\text{C}$  температураға дейін қыздыру кезіндегі көлемді төмендегі формуламен анықтауға болады:

$$V_t = V_0[1 + \beta_t(t - t_0)]. \quad (1.8)$$

### 1.6 Тұтқырлық

*Сұйықтың тұтқырлығы* – дегеніміз ішкі күштер әсерінен сұйықтың жеке бөлшектері немесе қабаттардың салыстырмалы орын ауыстыру кезіндегі қарсылық білдіретін реал сұйықтың қасиеті. Қабаттар әр түрлі жылдамдықпен бірінің үстінен бірі жылжиды (сырғанады), соған байланысты қабаттар қозғалысының салыстырмалы жылдамдығы және олардың жанасу ауданына пропорционал қабаттар арасындағы ішкі үйкелісті тудырады.

Үйкелістің меншікті күші (*жанама кернеу*) – Ньютон орнатқан бірлік беттен  $S$  өтетін қабаттар арасындағы ішкі үйкеліс күші  $T$ . Үйкелістің меншікті күші келесі формуламен анықталады:

$$\tau = \frac{T}{S} = \frac{\mu_s \Delta u}{\Delta y}, \quad (1.9)$$

мұндағы

$\mu_6$  - динамикалық тұтқырлық коэффициенті ( сұйықтың қасиетін сипаттайтын ішкі үйкеліс коэффициенті ) ;

$\frac{\Delta u}{\Delta y}$  - көрші қабаттардың қозғалыс жылдамдықтарының олардың арасындағы ара қашықтықтың қатынасын көрсететін жылдамдық градиенті.

*Динамикалық тұтқырлық коэффициенті*, Па·с, келесі формуламен анықталады:

$$\mu_6 = \frac{\tau}{\Delta u \div \Delta y}. \quad (1.10)$$

Практикалық мақсаттар үшін динамикалық тұтқырлық коэффициентінің қарастырылатын сұйық тығыздығының қатынасына тең кинематикалық тұтқырлық коэффициентін, м<sup>2</sup>/с, қолданады:

$$\nu = \frac{\mu_6}{\rho}. \quad (1.11)$$

Сұйықтың тұтқырлығы тұрақты шама емес. Ол бірнеше факторларға байланысты, ең негізгілерінің бірі – температура. Температура жоғарлаған кезде тамшылы сұйықтың тұтқырлығы азаяды. Мысалы, температура 0° С тан 100°С-қа жоғарлаған кезде сұйықтың тұтқырлығы шамамен 6 есеге төмендейді .

Сұйықтың тұтқырлығы *вискозиметр деп* аталатын арнайы құралмен өлшенеді.

### **1.7 Беттік керілу**

*Беттік керілу* – дегеніміз өзара тартылатын молекулалар арасында беттік қабат түзетін сұйықтың қасиеті. Беттік керілу сұйықтың бос бетін азайтуға тырысады және  $\sigma$  беттік керілу коэффициентімен сипатталады .

Беттік керілу оның бос бетіндегі сұйық немесе газдың түрімен, қоспамен және температурамен анықталады.

Ауамен жанасатын су үшін беттік керілудің  $\sigma$  температураға тәуелділігі  $T$ , °С төмендегідей

$$\sigma = 10^{-3} (76 - 0,15T). \quad (1.12)$$

### **1.8 Қысым**

*Қысым* - қоршаған қабыршаққа материалды бөліктердің (соққы ) әсерінің нәтижес. Қысым Р кг/м<sup>2</sup>, Па, бар, кгс/см<sup>2</sup>, мм .сын. бағ., мм .су. бағ. өлшенеді.

Қысымды келесідей түрлерге бөледі: барометрлік (атмосфералық), асқын (манометрлік ), вакуумдық .

*Атмосфералық қысым* –  $t=0^0C$  кезінде теңіз деңгейіндегі атмосфералық ауаның орташа қысымы (1атм=101325Па=760мм.сын.бағ.).

Техникалық атмосфера  $1 \text{ ат} = 98066,5 \text{ Па} = 735,5 \text{ мм.сын.бағ}$ . Атмосфералық қысым барометрмен өлшенеді және *барометрлік қысым* деп аталады.

*Асқын қысым* – атмосфералықтан жоғары қысым. Асқын қысым манометрмен өлшенеді және *манометрлік қысым* деп аталады.

*Вакуумдық қысым* – атмосфералықтан төмен қысым. Ол вакуумметрмен өлшенеді.

Егер процесстер асқын қысым кезінде орындалса, онда абсолютті қысым келесі формуламен анықталады:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{ман}} + P_{\text{бар}}. \quad (1.13)$$

Егер процесстер вакуумдық қысым кезінде орындалса, онда абсолютті қысым келесі формуламен анықталады:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{бар}} - P_{\text{вак}}. \quad (1.14)$$

## Бақылау сұрақтары мен тапсырмалар

1. Сұйық дегеніміз не?
2. Сұйықтар қандай түрлерге бөлінеді?
3. Газ тәрізді сұйықтардың тамшылы сұйықтардан айырмашылығы?
4. Реал және идеал сұйықтардың арасындағы айырмашылық неде?
5. Сұйықтың негізгі физикалық қасиеттерін ата.
6. Сұйықтың тұтқырлығы қандай құралмен өлшенеді?
7. Қысыс түсінігіне анықтама бер.
8. Қысымның қандай түрлерін білесіз?
9. Егер процесс асқын қысым кезінде орындалса, абсолютті қысым қалай анықталады?
10. Егер процесс вакуумдық қысым кезінде орындалса, абсолютті қысым қалай анықталады?

## 2 Гидростатика негіздері

*Гидростатика* – сұйық және газдың тепе теңдік заңдарын зерттейтін сұйық және газ механикасының бөлімі. Сұйық тепе теңдікте болған кезде, яғни тыныштық күйде болса, онда ол идеал сұйық қасиеттеріне өте жақын қасиеттермен сипатталады.

### 2.1 Сұйықтың тыныштық күйі және әсер етуші күштер

Тыныштық күйде тұрған сұйыққа екі ішкі күш ісер етеді: массалық (көлемдік) күш және беттік күш.

*Массалық күш* – сұйық массасына пропорционал ішкі күштер (егер масса біртекті болса сұйық көлеміне, яғни барлық көлемдегі оныңтығызлығы бірдей болады) – ол инерция күші және ауырлық күші.

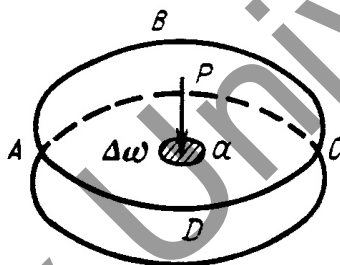
*Беттік күштер* – берілген массада шекаралық беттеріндегі нүктелерге ісер ететін күштер. Олар атмосфералық қысымға, қазандағы бу қысымына, поршень қысымы және т. б. байланысты .

## 2.2 Гидростатикалық қысым

Сұйық тепе теңдік күйде тұрған кезде әсер етуші ішкі күштерге байланысты сұйықта гидростатикалық қысым пайда болады.

*Гидростатикалық қысым* – тыныштықта тұрған сұйықтың түбінде орналасқан нүктедегі сығылу кернеуі.

Кез-келген пішінді ыдыста орналасқан тыныштықта тұрған сұйықтың кейбір көлемдерін 2.1 суретте қарастырамыз. Ондағы көлемге әсер етуші ішкі күштердің ( оның ішінде сұйықтың ауырлық күші ) әсерінен сұйықтың ішінде берілген көлемнің барлық нүктелерінде ішкі күштер пайда болады.



2.1 - сурет. Гидростатикалық қысымды анықтау схемасы

Бұл көлемді ойша екі бөлікке бөлеміз  $ABCD$  жазықтығын алып жоғарғы бөлігін жоқ деп санаймыз. Төменгі бөліктегі тепе теңдікті сақтау үшін  $ABCD$  жазықтығына сұйық көлемінің жоғары бөлігінің төменгі бөлігіне әсерін алмастыратын күш қосу қажет. Ол үшін  $ABCD$  жазықтығынан кез - келген  $a$  нүктесін аламыз және оның жанынан шағын  $\Delta\omega$  ауданын белгілейміз. Бұл ауданның центріне ауданның барлық нүктелеріне қосылған, барлық тепе теңдік күштерімен сипатталатын  $P$  күшін орналастырамыз.

Егер  $P$  күшін шамасын  $\Delta\omega$  аудан шамасына бөлсек, онда бірлік аудандағы орташа қысым мәні пайда болады, яғни *орташа гидростатикалық қысым* және ол келесі формуламен анықталады:

$$P_{cp} = \frac{P}{\Delta\omega}, \quad (2.1)$$

мұндағы

$P_{cp}$  - орташа гидростатикалық қысым ;

$P$  - гидростатикалық қысымның суммалық күші.

Егер ауданды  $\Delta\omega$  азайтса, онда күште  $P$  азаяды, бірақ нақты гидравликалық қысым анықтайтын  $\frac{P}{\Delta\omega}$  қатынасы соңғы шама болып саналады, Па

$$\lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{P}{\Delta\omega} = p \cdot \quad (2.2)$$

*Гидростатикалық қысым* – қысым күшінің  $P$   $\Delta\omega \rightarrow 0$  болған кездегі өзі әсер ететін жазықтықтың  $\Delta\omega$  ауданына қатынас шегі.

### 2.3 Гидростатикалық қысымның қасиеттері

Гидростатикалық қысым үш қасиетке ие.

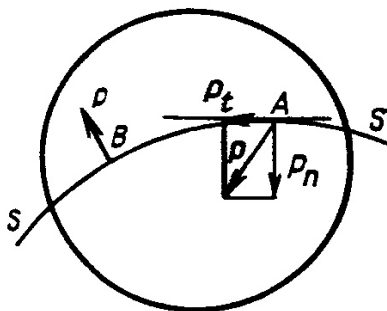
*Бірінші қасиеті.* Гидростатикалық қысым әрқашан өзі әсер ететін ауданның ішкі нормалі бойынша бағытталады.

*Екінші қасиеті.* Гидростатикалық қысым өзі әсер ететін ауданның бағытына (көлбеу бұрыш) тәуелді емес, ол кеңістіктегі нүктенің орналасуына ғана тәуелді болады, яғни гидростатикалық қысым барлық бағыттарға бірдей әсер етеді  $p_n = p_x = p_y = p_z$ .

*Үшінші қасиеті.* Нүктедегі гидростатикалық қысым оның кеңістіктегі координаталарына тәуелді болады, яғни  $p = f(x, y, z)$ .

Сұйық деңгейіндегі нүктенің бату тереңдігі жоғарласа, ондағы қысымда артады, ал керісінше нүктенің бату тереңдігі төмендесе, қысымда азаяды.

Бірінші қасиетті дәлелдейміз. Ішінен  $S-S$  жазықтығы жүргізілген тыныштықта тұрған сұйықтың кейбір көлемін 2.2 - суретте қарастырамыз.



2.2 - сурет. Гидростатикалық қысымның бірінші қасиетін дәлелдейтін схема

Сол жазықтықтан  $A$  нүктесін аламыз. Бұл нүктедегі гидростатикалық қысым ауданға нормаль бойынша емес,  $A$  нүктесінің бағыты бойынша бағытталған деп қарастырамыз. Онда гидростатикалық қысымды  $p$  екі құраушыға бөлуге болады:  $S-S$  жазықтығында нормаль  $p_n$  және жанама  $p_t$ .

Сұйық жанама қернеуге қарсылық білдірмейді және  $p_t$  құраушысының нольге тең екенің ескерсек, онда сәйкесінше гидростатикалық қысым ауданға тек нормаль бойынша әсер етеді.

Ауданға жанама бойынша бағытталған  $p_t$  нольге тең, өйткені қарама қарсы жағдайда А нүктесінде сұйық бөлшектері сол күштің ісерінен қозғалар еді, ал ол сұйықтың тепе теңдік шартына қарсы.

Ал енді В нүктесінде көрсетілгендей гидростатикалық қысым ішкі нормаль бойынша бағытта алатынын дәлелдейміз. Сұйық созылмалы кернеуге қарсылық көрсетпейтіндіктен, онда оның бөлшектері қозғалысқы келу қажет, олда сұйықтың тыныштықта тұру шартына қарсы. Соған байланысты гидростатикалық қысым тек ішкі нормаль бойынша бағытталады, яғни *гидростатикалық қысым әрқашан сығылады.*

## 2.4 Гидростатиканың негізгі теңдеулері

Сұйықтықтың тыныштығы абсолютті және қатысты болуы мүмкін.

*Сұйықтықтың абсолютті тыныштығы* – бұл Жерге қатысты сұйықтықтың тыныштығы. Сұйықтықтың қатысты тыныштығы – бұл сұйықтық бөліктерінің бір-біріне және олардың орналасатын ыдыстың қабырғасына деген қатынасы бойынша қозғалыс болмайтын тепе-теңдігі, алайда сұйықтығы бар ыдыс Жерге қатысты жылдамдықта болады.

Тыныштық жағдайында тұрған, сұйықтығы бар қоймада (2.3 сурет) А нүктесінің маңында  $h$  тереңдікте шағын көлденең  $w$  ауданын көрсетеміз. Осы ауданды сұйықтықтың бетіне жобалау арқылы, төменгі және жоғарғы негізі ауданы  $w$ , биіктігі  $h$  болатын параллелепипедті аламыз.

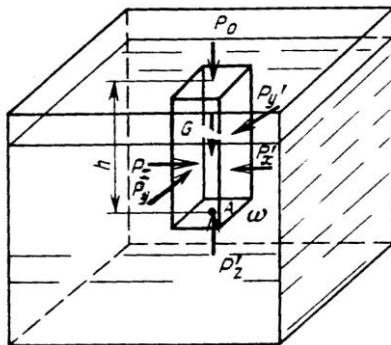
Сұйықтық пен параллелепипед тепе-теңдік күйде болғандықтан, оның барлық шектері де  $p_x - p'_x = 0$ ;  $p_y - p'_y = 0$  тепе-теңдікте болады. Төменгі шегіне әсер етуші  $p'_z$  күші қысымнан  $p_0 \omega$  бос беті мен параллелепипедтің салмағына қарай қосылады:  $p'_z = p_0 \omega + G = p_0 \omega - \gamma \omega h$

Теңдеу мүшелерін  $w$ -ге бөліп, *гидростатиканың негізгі теңдеуін* аламыз:

$$p_{abc} = p'_z = p_0 + \gamma h, \quad (2.5)$$

мұндағы,

$\gamma h = \rho g h$  - артық қысым.



2.3 - сурет. Гидростатиканың негізгі теңдеуіне тұжырымдалған сұлба

*Гидростатиканың негізгі теңдеуі* былайша оқылады: тыныштықта тұрған сұйықтықтың кезе келген нүктесіндегі толық немесе абсолютті қысымы қысымнан  $p_0$  бос беті мен нүктенің үстінде орналасушы  $h$  сұйықтық бағанасының қысымына қарай қосылады.

Егер (атмосфералық қысым)  $p_0 = p_{атм}$  болса, онда гидростатиканың негізгі теңдеуі келесі түрде көрсетіледі:

$$p_{абс} = p_{атм} + \rho h = p_{атм} + \rho gh. \quad (2.6)$$

Абсолюттік және атмосфералық қысымның айырымы *артық қысым* деп аталады және мына формуламен анықталады:

$$p_{изб} = p_{абс} - p_{атм} = \rho gh. \quad (2.7)$$

Бос беттің деңгейінен бірдей тереңдікте орналасқан нүктелер үшін гидростатикалық артық қысым бірдей. Егер өлшенетін қысым атмосфералық қысымнан кем болса, онда атмосфералық пен абсолюттік қысымның арасындағы айырымы вакуум деп аталады және келесі формула бойынша анықталады:

$$p_{вак} = p_{атм} - p_{абс} = p_{атм} - p_0 - \rho gh. \quad (2.8)$$

## 2.5 Деңгейдің беті, оның сипаты мен теңдеуі

Деңгейдің беті – қарастырылып отырған функцияда барлық нүктелері бірдей мағына беретін бет болып табылады. Мысалы, изотермиялық бет (температуралары бірдей беттер, потенциалдары бірдей және т.б). Ары қарай деңгей беті астындағы бірдей қысымды беттерді қарастырамыз.

Деңгейдің беті екі негізгі сипатқа ие.

*Бірінші.* Деңгейдің беттері бір-бірімен қиылыспайды.

Шынымен де, егер деңгей бетінің  $p_1$  қысымы деңгей бетінің  $p_2$  қысымымен қиылысса, онда осы беттердің қиылысу сызығында қысымдары бірдей болар еді, яғни  $p_1 = p_2$ , бұл мүмкін емес себебі  $p_1 \neq p_2$  болғандықтан.

*Екінші.* Бірдей қозғалатын массалық күш деңгей бетіне нормальді бағытталған.

Қарастырып отырған жағдайда сұйыққа тек тіке бағытталған ауырлық күші әсер етеді. Осыған сәйкес деңгей беті горизонтальды болады.

Деңгей бетінің барлық нүктелерінде гидростатикалық қысым бірдей болғандықтан, яғни  $p = const$ ,  $dp = 0$ . Демек, деңгей бетінің дифференциалды теңдеуі келесіде көрсетілген:

$$Xdx + Ydy + Zdz = 0, \quad (2.9)$$

мұнда  $X, Y, Z$  - координата функциялары.

## 2.6 Пьезометриялық және гидростатикалық тегеурін (напор)

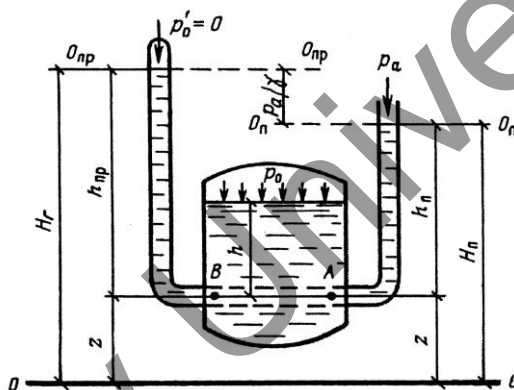
$z + \frac{P}{\gamma} = const$  теңдеуіндегі  $z$  координатасы (гидростатиканың негізгі теңдеуінің екінші жазылу түрі) *нивелірлік* немесе *геометрикалық биіктік* деп аталады.  $\frac{P}{\gamma}$  екінші қосылғыштың сызықтық өлшемдігі бар және оны пьезометрикалық биіктік деп атайды.

Артық қысымға сәйкес келетін пьезометрикалық биіктікті, ашық типті пьезометр деп аталатын, үстінен ашылатын шыны түтікте бақылауға болады.

Сұйықтықтың бос бетіне қысымның әр түрлі әсер ету жағдайларын қарастырамыз:

а) сұйықтықтың  $p_0$  бос бетінің қысымы атмосфералық қысымнан асады.

Жабық ыдыста А нүктесіне ашық типті пьезометр бекітілген. Пьезометрдегі сұйықтық деңгейі оның ыдыстағы деңгейінен жоғары болады (2.4 сурет).



2.4 - сурет. Пьезометриялық және гидростатикалық ағындар ұғымын түсіндіретін сұлба

Ашық пьезометрде орналасқан сұйықтыққа гидростатиканың негізгі теңдеуін қолдану арқылы, пьезометрдің біріктірілу деңгейіндегі сұйықтықтың абсолютті қысымын аламыз:

$$P_{abc} = P_a + \gamma h_n,$$

Мұндағы

$P_a$  - атмосфералық қысым;

$h_n$  - пьезометрдегі сұйықтықтың көтерілу биіктігі.

Осыдан пьезометрдегі сұйықтықтың көтерілу биіктігі мынаған тең:

$$h_n = \frac{P_{abc} - P_a}{\gamma} = \frac{P_{изб}}{\gamma}, \quad (2.10)$$

мұндағы

$p_{узб}$  - пьезометрдің біріктірілу деңгейіндегі сұйықтықтың артық қысымы.

б) ыдыста сұйықтықтың бос бетіне атмосфералық қысым әсер етеді, яғни  $p_0 = p_a$ .

Ыдыс пен пьезометрдегі деңгейлер бірдей болады, яғни сұйықтықтың қарастырылған көлемінің кез келген нүктесіне арналған пьезометрикалық биіктігі осы нүктенің сұйықтықтың бос бетінің астында орналысу тереңдігіне теі болады.

Сұйықтықтың берілген нүктесіндегі абсолютті қысымға сәйкес келетін пьезометрикалық биіктік *келтірілген биіктік* деп аталады. Келтірілген биіктікті ауасы жойылған үстінен жабылған шыны түтікте бақылауға болады. Мұндай түтік *пьезометр* деп аталады.

В нүктесіне бекітілген жабық пьезометрде орналасқан сұйықтыққа гидростатиканың негізгі теңдеуін қолдану арқылы келесі формуалыны аламыз:

$$p_{abc} = p_0 + \gamma h_{np},$$

мұндағы

$p_{abc}$  - В нүктесіндегі абсолютті қысым;

$p_0$  - пьезометрдегі сұйықтықтың бос бетіне әсер етуші сыртқы қысымы;

$h_{np}$  - келтірілген биіктік.

в)  $p_0 = 0$ , яғни жабық түтіктің үстіңгі бөлігінде ауасыз кеңістік болады:

$$p_{abc} = \gamma h_{np},$$

осыдан

$$h_{np} = \frac{p_{abc}}{\gamma}.$$

$h_{np}$  келтірілген биіктігі артық қысымға сәйкес келетін  $h_n$  пьезометрикалық биіктіктен көп болады. Бұл арттыру атмосфералық қысымға сәйкес келетін сұйықтық бағанының биітігіне тең, яғни

$$h_{np} - h_n = \frac{p_{abc}}{\gamma} - \frac{p_{узб}}{\gamma} = \frac{p_a}{\gamma}. \quad (2.11)$$

Сұйықтықтардағы немесе газдардағы қысымды көбінесе оған сәйкес келетін пьезометрикалық биіктік түрінде келесі формула бойынша сипатталады:

$$h = \frac{p}{\gamma}. \quad (2.12)$$

Мысалы, 0,1МПа (1ат) қысымына келесі биіктіктер сйкес келеді:

$$\text{- суда } h = \frac{p_a}{\gamma_s} = \frac{100000}{97900} = 10,2\text{ м} \approx 10\text{ м};$$

$$\text{- сынапта } h = \frac{p_a}{\gamma_{pm}} = \frac{100000}{132900} = 0,752\text{ м}.$$

Берілген нүктеде сұйықтықтар қандайда бір О-О көлденең жазықтығына (салыстыру жазықтығы) қатынасы бойынша пьезометрикалық  $h_n$  және  $z$  геометрикалық биіктіктердің қосындысы  $H_n$  пьезометрикалық ағын (напор) деп аталады, яғни

$$H_n = h_n + z = \frac{P_{uzb}}{\gamma} + z = \frac{P_{abc}}{\gamma} - \frac{P_a}{\gamma} + z. \quad (2.13)$$

Қысымның келтірілген биіктіктері  $h_{np}$  мен орналасуының геометрикалық биіктігінің қосындысының қарастырылған нүктенің ерікті жазықтыққа қатысты салыстырылуы сұйықтықтың берілген нүктесіндегі гидростатикалық ағын  $H_z$  деп аталады, яғни

$$H_z = h_{np} + z = \frac{P_{abc}}{\gamma} + z. \quad (2.14)$$

$$H_n = H_z - \frac{P_a}{\gamma}. \quad (2.15)$$

Осылайша, *пьезометрикалық ағынның гидростатикалық ағыннан айырмашылығы атмосфераға қарсы қысымды есепке ала отырып түсіндіріледі.*

Тәжірибедегі көптеген жағдайларда ашық пьезометрлермен өлшенетін артық қысыммен жұмыс істеуге тура келеді, сондықтан да пьезометрикалық ағын ұғымы гидростатикалық ағын ұғымына қарағанда үлкен мағынаға ие.

$P_{abc} = p_0 + \gamma h$  гидростатиканың негізгі теңдеуі бойынша 2.14 формуладан абсолютті қысымды сипаттай отырып, келесі формуланы аламыз:

$$H_z = \frac{p_0}{\gamma} + z + h. \quad (2.16)$$

Ыдыстағы сұйықтықтың бос бетіндегі  $p_0$  қысымы мен  $z+h$  биіктіктерінің қосындысы сұйықтықтың кез келген нүктелері үшін бірдей болғандықтан, онда

$$H_z = \frac{p_0}{\gamma} + z + h = const, \quad (2.17)$$

яғни тыныштықтағы сұйықтықтардың барлық нүктелері үшін гидростатикалық ағын тұрақты шама.

Сұйықтықтың кез келген нүктесінде жабық пьезометр орнатылса, онда сұйықтық сол бір деңгейге ғана көтеріледі. Бұл деңгей гидростатикалық ағынның жазықтығы деп аталатын  $O_{np} - O_{np}$  көлденең жазықтығын қалыптастырады.

$p_a$  атмосфералық қысым сұйықтықтағы қарастырылатын нүктенің орнынан тәуелді болмайтындықтан, онда  $H_n$  пьезометрикалық ағыны тыныштықтағы сұйықтықтың барлық нүктесінде бірдей болады, яғни

$$H_n = z + \frac{P_{abc}}{\gamma} - \frac{P_a}{\gamma} = const. \quad (2.18)$$

Осыдан тыныштықтағы сұйықтықтың барлық нүктелері үшін пьезометрикалық биіктіктерінің деңгейі пьезометрикалық ағынның жазықтығы деп аталатын сол бір  $O_n - O_n$  көлденең жазықтықта болатынын ескерген жөн.

г) сұйықтықтың  $p_0$  бос бетінің қысымы атмосфералық қысымнан кем.

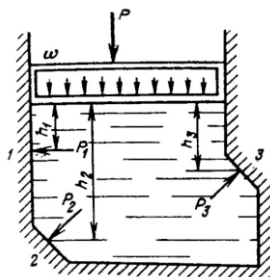
Пьезометрикалық ағынның жазықтығы  $h_{\text{вак}}$  шамадағы ыдыстағы сұйықтықтың бос бетінен төмен деңгейде орналасатын болады. Бұл жағдайда ыдыстағы,  $O_n - O_n$  жазықтығынан төмен орналасқан, сұйықтықтың барлық бөліктері атмосфералық қысымнан артық абсолютті қысымнан тұратын болады, ал осы жазықтықтан жоғары орналасқандар кем болады. Соңғы жағдайда ыдырату орны (вакуум) болады.

Вакуум теріс артық қысымды білдіреді.

## 2.7 Паскаль заңы

Гидростатиканың негізгі теңдеуі  $p = p_0 + \rho h$  сұйықтықтың бетіндегі қысым  $p_0$  сұйықтық ішіндегі кез келген нүктеге өзгеріссіз берілетінін көрсетеді.

Сұйықтықпен толтырылған ыдысты қарастырайық (2.5 сурет). Ыдыс үстінен  $\omega$  ауданды піспекпен (поршень) жабылған. Піспекке сұйықтық бетінде  $p_0 = \frac{P}{\omega}$  меншікті қысымды қалыптастыратын  $P$  сыртқы күші келтірілген.



2.5 – сурет. Паскаль заңына қарап тұжырымдалған сұлба

Гидростатиканың негізгі теңдеуінің негізінде белгіленген нүктелердің әрбірі үшін гидростатикалық қысымды жазайық.

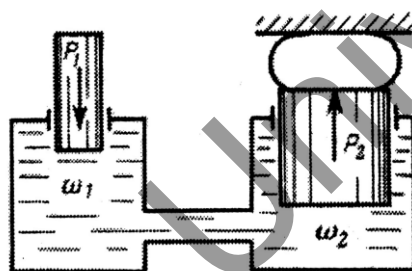
- 1 нүктесі үшін  $p_1 = p_0 + \rho h_1$ ;
- 2 нүктесі үшін  $p_2 = p_0 + \rho h_2$ ;
- 3 нүктесі үшін  $p_3 = p_0 + \rho h_3$ ;
- ерікті нүкте үшін  $n \quad p_n = p_0 + \rho h_n$ .

Теңдеуде көрсетілгендей кез келген нүкте үшін сол бір  $p_0$  сыртқы қысым кіретінін көреміз. Осыған байланысты гидростатикалық қысымның екінші қасиетін ескере отырып, Паскаль заңын қалыптастыруға болады.

**Паскаль заңы:** сұйықтықтың сыртқы бетіне келтірілген қысым осы сұйықтықтың барлық нүктелері мен барлық бағыттарына бірдей беріледі.

Паскаль заңын қолдану үшін қарапайым – гидравликалық сыққыштардың, мультипликаторлардың (қысымды жоғарылатушылар), домкраттардың, көтергіштердің және т.б. - гидравликалық машиналарының қондырғылары негізделген.

2.6 - суретінде шағын және үлкен цилиндрлі сәйкесінше  $\omega_1$  мен  $\omega_2$  аудандарынан тұратын гидравликалық сыққыштың принципальды сызбасы көрсетілген. Цилиндрлер өзара құбырмен біріктірілген.



2.6 – сурет. Гидравликалық сыққыш

Егер сұйықтықтың бетінде шағын цилиндрде піспек арқылы  $P_1$  күшімен бассақ, онда бұл күш піспектің астында  $p_1 = \frac{P_1}{\omega}$  қысымын қалыптастырады. Паскаль заңы бойынша бұл қысым сұйықтықтың барлық нүктелеріне беріледі.

Демек,  $\omega_2$  ауданды піспек үшін сол  $p_1$  қысымы беріледі және  $P_2 = p_1 \omega_2$  қысым күші әсер етеді. Осы теңдеуге  $p_1$  шамасын қойып, келесі формуланы аламыз:

$$P_2 = \frac{P_1 \omega_2}{\omega_1}. \quad (2.19)$$

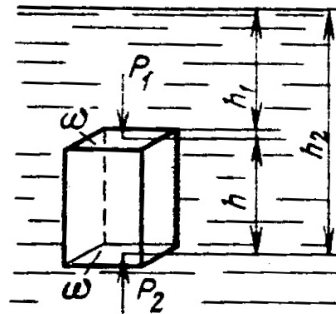
Осылайша,  $\omega_2$  ауданды піспекке сұйықтық арқылы,  $P_1$  қысымынан бірнеше есе көп  $P_2$  күші беріледі, ал  $\omega_2$  ауданы  $\omega_1$  ауданынан бірнеше есе көп.

Тәжірбие тұрғысынан цилиндрлердегі піспектердің дамушы үйкеліс күштері 2.19 формуласы бойынша есептелген күштерден аз болады. Бұл азаю орташа мәні 0,8 тең  $\eta$  қысқышының ПӘК-інде есепке алынады.

## 2.8 Сұйықтыққа енгізілген дененің қысымы мен осы дененің күші. Архимед заңы

Сұйықтыққа енгізілген денедегі сұйықтықтың қысым күшін қарастырайық (2.7 сурет).

Призма пішініндегі дене  $h$  биіктіктен және  $w$  төменгі, жоғарғы негізді ауданнан тұрады. Жоғарғы негіз сұйықтыққа  $h_1$  тереңдікте енгізілген, ал төменгіге -  $h_2$  тереңдікте.



2.7 – сурет. Сұйыққа батқан денеге күштің әсері сұлбасы

Сондықтан да денеге келесілер әсер етеді:

а)  $P_1 = \gamma h_1 w$  жоғарғы негізге әсер ететін сұйықтықтың гидростатикалық қысымының күші;

б)  $P_2 = \gamma h_2 w$  төменгі негізге әсер ететін сұйықтықтың гидростатикалық қысымының күші;

в) бүйір беттерге (призманың шектері) әсер ететін сұйықтықтың қысым күші есептелмейді, өйткені олар өзара теңестірілген.

Гидростатикалық қысымның тең әсер етуші күші  $P_2$  және  $P_1$  күштерінің айырымына тең және жоғарыға бағытталған (үлкен күштің бағытына)

$$P = P_2 - P_1 = \gamma h_2 w - \gamma h_1 w = \gamma w (h_2 - h_1).$$

$$h_2 - h_1 = h, \text{ ал } w h = V, \text{ онда}$$

$$P = \gamma V \tag{2.20}$$

Осылайша, сұйықтыққа енгізілген денеге, денемен шығарылған сұйықтықтың салмағына тең итеруші күш әсер етеді – бұл **Архимед заңы**.

Архимед заңы кез келген пішіндегі денелер үшін қолданыла береді, өйткені призма пішіні мен одан да күрделі пішіндегі басқа денелерді шексіз көптеген қарапайым тік призмалардан тұрады деп болжауға болады.

Көлемді су ығыстырымы – бұл денемен шығарылған сұйықтық көлемі.

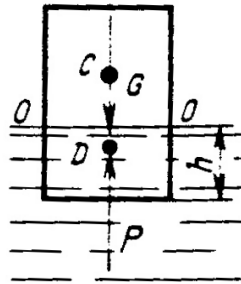
Жаппай су ығыстырымы – бұл денемен шығарылған сұйықтықтың салмағы (итеруші күшке тең).

Сұйықтыққа біртіндеп немесе толығымен енгізілген денеге (2.8 сурет) екі күш әсер етеді:

а) төменге бағытталған  $C$  оның ауырлық центріне бекітілген дененің салмағы  $G$ .

б) жоғары бағытталған, және  $D$  су ығыстырымының центрі деп аталатын қысым центрінде бекітілген итеруші (көтеруші) күш  $P$ .

Шығарылған сұйықтық көлемінің ауырлық центрі су ығыстырымының центрі болып табылады.



2.8 – сурет. Сұйықтықта батқан және онда қалқып жүрген денеге күштің әсері сұлбасы

$G$  және  $P$  күштерінің қатынастарын байланысты сұйықтыққа енгізілген дененің үш жағдайы болуы мүмкін:

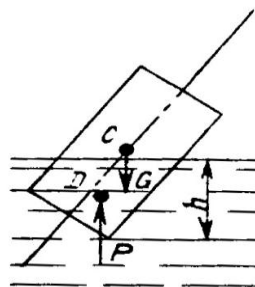
а) егер  $G > P$ , онда дене батады;

б) егер  $G = P$ , онда дене бату жағдайында жүзеді;

в) егер  $G < P$ , онда дене шығарылған сұйықтықтың салмағы  $G$  салмағына тең болмайынша қалқып жүреді (яғни итеруші немесе көтеруші күш).

Бос беттікте қалқып жүрген дененің тепе теңдігі үшін, ауырлық центрі мен қысым центрі бір вертикальда жатуы керек.

Шынымен 2.9 суретте көрсетілгендей, дененің ауырлық центрі мен қысым центрі бір вертикальда жатпайды,  $G$  және  $P$  күштері пайда болады да, денені айналдыруға тырысады.



2.9 - сурет. Сұйықтықта батқан және онда қалқып жүрген денеге күштің әсері сұлбасы

## 2.9 Тегіс беттердегі сұйықтықтың қысымдар қосындысының күші

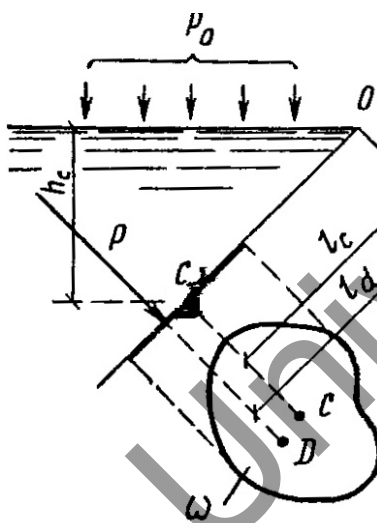
Тегіс қабырғадағы сұйықтықтың қысымдар қосындысының күші  $P$  қабырғаның суланған ауданы  $\omega$  мен осы аудандағы ауырлық центрінің гидростатикалық қысымын  $p_c$  көбейткенге тең (2.10 сурет), яғни

$$P = p_c \omega = \rho g h_c \omega, \quad (2.21)$$

мұндағы

$h_c$  - қабырғаның суланған ауданының ауырлық центрінің бату тереңдігі, м.

Қысым центрі – бұл қысымның тең әсер етуші күшінің қолдану нүктесі.



2.10 – сурет. Тегіс қабырғаға сұйықтықтың қысымдар қосындысын анықтау сұлбасы

Көлденең емес қабырғалардың ауырлық центрі үшін қысым қабырғаның ауырлық центрінен төменде орналасады. Оның орналасуы мына формула бойынша анықталады:

$$l_d = l_c + \frac{J_c}{\omega \cdot l_c}, \quad (2.22)$$

мұндағы

$J_c$  - қабырғаның суланған ауданының осы ауданның ауырлық центрі арқылы өтетін көлденең осіне қатысты инерция моменті;

$l_c$ ,  $l_d$  - қабырғаның ауырлық центрі мен қабырға бетінің бос бетпен қиылысу сызығына дейінгі қысым центрінің арақашықтары.

Кесте 2.1 – тегіс пішіндердің ауырлық центрі мен ауырлық центрі арқылы өтетін оське қатысты инерция моментінің формуласы

Тегіс пішіндер	Инерция моменті формулалары
	$x = \frac{H}{2}; J_0 = \frac{bH^3}{12}.$
	$x = \frac{D}{2}; J_0 = \frac{\pi D^4}{64} = \frac{D^4}{20,4}.$
	$x = \frac{H}{3}; J_0 = \frac{bH^3}{36}.$
	$x = \frac{H}{3} \cdot \frac{2b+a}{a+b}; J_0 = \frac{H^3(a^2+4ab+b^2)}{36(a+b)}.$
	$x = 0,424r = \frac{D}{4,71}; J_0 = \frac{D^4}{145,4}.$

### 2.10 Цилиндрлі беттердегі сұйықтықтың қысымдар қосындысының күші

Цилиндрлі беттердегі сұйықтықтың қысымдар қосындысының күші Р оны құраушылардың геометрикалық қосындысымен сипатталуы мүмкін

$$P = \sqrt{P_z^2 + P_6^2}. \quad (2.23)$$

мұндағы

$P_z$  - цилиндрлі беттердегі сұйықтықтың қысымдар қосындысы күшінің көлденең құраушысы;

$P_6$  - цилиндрлі беттердегі сұйықтықтың қысымдар қосындысы күшінің тік құраушысы.

Цилиндрлі беттердегі сұйықтықтың қысымдар қосындысы күшінің көлденең құраушысы осы қабырғаның тік проекциясының сұйықтықтарының қысымдар қосындысы күшіне тең және былайша анықталады:

$$P_z = \rho g h_c \omega_6 = p_c \omega_6, \quad (2.24)$$

мұндағы

$\omega_6$  - қабырғаның тік проекциясы.

Тік құраушы қысым денесінің көлеміндегі сұйықтықтың салмағына тең және мына формуламен анықталады:

$$P_g = \rho g V, \quad (2.25)$$

мұндағы

$\rho g$  - сұйықтықтың салмағы;

$V$  - сұйықтықтың көлемі.

Қысым денесі – берілген қисық сызықты бетпен, тік жазықтықпен және сұйықтықтың бос бетімен шектелген сұйықтықтың көлемі.

Егер көлем қабырғаның суланбаған ауданында орналасса, онда қысым денесінің салмағын теріс (жоғарыға бағытталған) деп санау қажет.

Қысымдар қосындысы күштерінің бағыты  $P_1$ ,  $P_2$  векторымен және көлденең жазықтықпен қалыптастырылатын,  $\beta$  бұрышымен анықталады:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{P_1}{P_2}, \quad (2.26)$$

мұндағы

$P_2$  - цилиндр беттеріндегі сұйықтықтың қысымдар қосындысы күшінің көлденең құраушысы;

$P_1$  - цилиндр беттеріндегі сұйықтықтың қысымдар қосындысы күшінің тік құраушысы.

### Бақылау сұрақтары мен тапсырмалар

1. Гидрогазостатика нені зерттейді?
2. Тыныштық күйде тұрған сұйыққа қандай күштер әсерін тигізеді?
3. Гидростатикалық қысым ұғымына түсініктеме беріңіз.
4. Гидростатикалық қысым қандай қасиеттерге ие?
5. Неліктен гидростатикалық қысым әрқашан сығылғыш болып келеді?
6. Сұйықтың абсолютті және қатысты тыныштығы дегеніміз не?
7. Ол гидростатиканың негізгі теңдеуі?
8. Деңгей беті дегеніміз?
9. Деңгей беті қандай қасиеттерге ие?
10. Пьезометриялық арын деп нені атайды?
11. Гидростатикалық арын деп нені атайды?
12. Паскаль заңы?
13. Гидравликалық баспасөзге сәйкес Паскальдың заңы.
14. Сұйыққа толығымен батқан денеге қандай күштер әсер етеді?
15. Архимед заңына анықтама беріңіз.
16. Сұйыққа біртіндеп батқан денеге қандай күштер әсер етеді?
17. Сұйыққа батқан және онда қалқып жүрген дененің күйі қандай?
18. Тұтас қабырғаға сұйықтың суммалы қысымының күші неге тең?
19. Цилиндрлік бетке сұйықтың суммалы қысымының күші неге тең?

20. Дене қысымы деп нені атаймыз?
21. Тұтас қабырғаға сұйықтың қысымы.
22. Гидростатикалық қарама- қайшылық.
23. Цилиндрлік беттің үстіндегі сұйық қысымы.
24. Цилиндрлік беттің астындағы сұйық қысымы.

15.

## Гидродинамика негіздері

*Гидродинамика* – ығыстырылатын және ығыстырылмайтын беттері бар сұйық пен газдың әрекеттесуі мен қозғалыс заңдылықтарын қарастыратын сұйық пен газ механикасының тарауы.

### 3.1 Гидродинамиканың негізгі түсініктері

Гидродинамиканы үйренуде негізгі объектілердің бірі сұйық ағыны, яғни шекттеулі беттіктері арасында сұйық массасының қозғалысы болып табылады.

Сұйық әр түрлі күштер әсерінен қозғалады: ауырлық күшінің; ішкі қысым; инерциялы күш және т.б.

Сұйықтың қозғалыс заңдарын оқып үйренуде екі түрлі есеппен түйісу керек болады:

1) *сыртқы есеп*, сұйық ағынының гидродинамикалық сипаттамалары көрсетілген, сұйықты айнала ағатын денеге салынған күшті табу керек.

2) *ішкі есеп*, сұйыққа әсерін тигізетін күштер берілген, ағынның гидродинамикалық сипаттамаларын табу керек.

Ағынның *гидродинамикалық сипаттамалары* болып:

- гидродинамикалық қысым;
- сұйық қозғалысының жылдамдығы.

*Гидродинамикалық қысым* – сұйықтың қозғалысы кезінде дамиды ішкі қысым.

*Берілген нүктеде сұйық қозғалысының жылдамдығы* – берілген нүктеде орналасқан, сұйық бөлшектерінің кеңістікте ауысу жылдамдығы. Жылдамдық бірлік уақыт ішінде сұйық бөлшегінің жүріп өткен жолының ұзындығымен анықталады.

### 3.2 Сұйықтық қозғалысының режимдері мен түрлерінің классификациясы

Сұйықтық ағысының екі режимі бар: ламинарлы және турбулентті.

*Ламинарлы ағыс* (қабаттық, реттелген) – сұйықтықтың жеке қабаттары бір-біріне қатысты араласпай жылжығандағы қозғалыс. Тұтқыр сұйықтықтар (майлар) көбінесе реттеліп қозғалады.

*Турбуленттік ағыс* (реттелмеген) – сұйықтық бөлшектерінің әрдайым траекториясы өзгеріп тұратын және қарқынды араласу жүретін күрделі қозғалыс. Көбінесе тұтқырлығы аз сұйықтықтар (су, ауа) ретсіз қозғалады.

Құбырдағы сұйықтық ағынының күйі (режимі) тұтқырлық күшін сипаттайтын *Рейнольдс санына* тәуелді, ол қозғалысты анықтайтын негізгі факторларды ескереді.

*Рейнольдс саны* келесі формуламен анықталады:

$$Re = \frac{vl}{\nu}, \quad (3.1)$$

мұндағы

$l$  - ағынның сипаттық сызықтық өлшемі, м;

$\nu$  - сұйықтықтың кинематикалық тұтқырлығы, м<sup>2</sup>/с;

$\nu$  - сұйықтық қозғалысының жылдамдығы, м/с.

$Re_{кр}$  *Рейнольдс критикалық саны* – қозғалыс ламинарлық режимнен турбуленттікке өтетін Рейнольдс санының мәні. Рейнольдс санының критикалық мәні сығылғын құбырларда артады және ұлғайған құбырда азаяды.

$Re > Re_{кр}$  - қозғалыстың турбуленттік режимі.

$Re < Re_{кр}$  - қозғалыстың ламинарлық режимі.

Дөңгелек ағысты құбырлар үшін  $Re_{кр} 2000 \dots 2400$ ; барлық көлденең ағыстар үшін  $Re'_{кр} = 500 \dots 600$ ; ашық арналар үшін  $Re'_{кр} = 800 \dots 900$ .

Дөңгелек ағысты құбырлар үшін Рейнольдс саны келесі формуламен анықталады:

$$Re = \frac{vd}{\nu}. \quad (3.2)$$

Барлық басқа көлденең ағыстар үшін (сонымен қатар ашық арналар үшін) Рейнольдс саны келесі формуламен анықталады:

$$Re' = \frac{\nu R}{\nu} \text{ немесе } Re'' = \frac{\nu d_s}{\nu}, \quad (3.3)$$

мұндағы

$d_s$  - эквивалентті (гидравликалық) диаметр, м.

Сұйықтық қозғалысының бірнеше түрін атауға болады: орныққан және орнықпаған; бірқалыпты және бірқалыпсыз; арынды және арынсыз.

*Орныққан қозғалыс* – уақыт өтуіне байланысты кез келген нүктедегі ағын жылдамдығы мен гидродинамикалық қысым өзгермей, ал тек қана сұйықтық ағынындағы қарастырылып отырған нүкте орнына тәуелді, яғни оның координаталарының функциясы болып табылатын сұйықтық қозғалысы.

Мысалы, тұрақты арындағы резервуар саңылауынан сұйықтықтың ағуы, каналдағы өзгермейтін көлденең қималы және тұрақты тереңдіктегі су ағыны.

*Орнықпаған қозғалыс* – уақыт өтуіне байланысты әр нүктедегі ағын жылдамдығы мен қысымы өзгертін сұйықтық қозғалысы.

Мысалы, айнымалы арын кезінде резервуар саңылауынан сұйықтық ағуы.

*Бірқалыпты қозғалыс* – ұзындығы бойынша нақты ағыстар мен ағын жылдамдығы өзгермейтін сұйықтықтың орныққан қозғалысы.

Мысалы, өзгермейтін қималы және тұрақты тереңдіктегі құбыр немесе каналдағы сұйықтық қозғалысы.

*Бірқалыпсыз қозғалыс* – ұзындығы бойынша нақты ағыстар мен ағын жылдамдығы өзгертін сұйықтықтың орныққан қозғалысы.

Мысалы, конустық құбырда және табиғи арнадағы сұйықтықтың қозғалысы.

*Арынды қозғалыс* – құбырөткізгіштің барлық көлденең қимасы атмосфералықтан жоғары қысыммен толтырылатын сұйықтық қозғалысы: сұйықтық қозғалысы қысым күштері арқасында жүзеге асады, яғни қосымша энергия шығынын тудырытын арын арқасында.

*Арынсыз қозғалыс* – атмосфералық қысымның астында орналасқан бос беті бар ағындағы сұйықтық қозғалысы.

### **3.3 Ағынның гидравликалық элементтері**

*Ағынның нақты қимасы* – сұйықтық қозғалысына нормаль (перпендикуляр) бағытталған ағын шегіндегі көлденең қима.

Нақты қима үш негізгі сипатқа ие:

- *нақты қима ауданы* -  $\omega$  (омега), м<sup>2</sup>;

- *суланған периметр* – сұйықтық канал немесе құбырдың қатты қабырғаларымен жанасатын ағынның нақты қимасының периметрінің бөлігі-  $\chi$  (хи), м;

- *гидравликалық радиус* –

$\omega$  нақты қима ауданының  $\chi$  суланған периметрге қатынасы -  $R$ , м.

Гидравликалық радиус келесі формуламен анықталады:

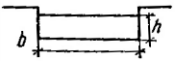
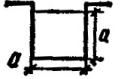


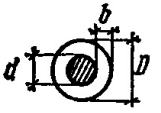
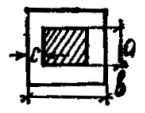
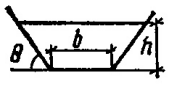


$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (3.4)$$

Жылумен қамтамасыз ету және желдету жүйелерін гидравликалық есептеу кезінде *эквивалентті диаметр* түсінігі қолданылады, ол төрт гидравликалық радиусқа тең:

$$d_e = 4R = 4 \frac{\omega}{\chi}. \quad (3.5)$$

3.1 кестеде әртүрлі пішінді ағындар үшін гидравликалық радиустар келтірілген (А.И.Куприн бойынша).

3.1 кесте - Өртүрлі пішінді ағындар үшін гидравликалық радиустар (А.И.Куприн бойынша)

Ағын пішіні	Нақты қима	Суланған периметр	Гидравликалық радиус
	$b \cdot h$	$b + 2h$	$\frac{b \cdot h}{b + 2h}$
	$a^2$	$4a$	$\frac{a}{4}$
	$\frac{\pi d^2}{4}$	$\frac{b}{4\sqrt{3}}$	$\frac{d}{4}$
	$\frac{\sqrt{3}}{4} b^2$	$3b$	$\frac{b}{4\sqrt{3}}$
	$\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$	$\pi(D + d)$	$\frac{b}{2}$
	$b^2 - a^2$	$4(b + a)$	$\frac{c}{2}$
	$b \cdot h + \frac{h^2}{\operatorname{tg} \theta}$	$b + \frac{2h}{\sin \theta}$	$\frac{h(h + b \cdot \operatorname{tg} \theta)}{\operatorname{tg} \theta (b + \frac{2h}{\sin \theta})}$
	$\frac{d^2}{4} (\pi - 2)$	$\frac{d(\pi\sqrt{2} + 4)}{\sqrt{2}}$	$\frac{d\sqrt{2}(\pi - 2)}{4(\pi\sqrt{2} + 4)}$
	$R^2 \left( \frac{\pi\alpha}{360} - \frac{\sin \alpha}{2} \right)$	$\frac{\pi R \alpha}{180}$	$\left( \frac{\pi\alpha}{360} - \frac{\sin \alpha}{2} \right) \frac{180}{\pi\alpha}$

Ағын шығыны – бірлік уақытта ағынның нақты қимасы арқылы өтетін сұйықтық көлемі,  $Q$ , м<sup>3</sup>/с.

Ағынның салмақтық шығыны – бірлік уақытта ағынның нақты қимасы арқылы өтетін сұйықтық салмағы,  $M$ , кг/с, т/ч. Салмақтық және көлемдік шығындар арасында келесі тәуелділік орын алады:

$$M = \gamma Q. \quad (3.6)$$

Ағынның орташа жылдамдығы – ағын шығынының нақты қимасының ауданына қатынасы,  $v$ , м/с

$$v = \frac{Q}{\omega}. \quad (3.7)$$

Сұйықтықтың орныққан қозғалысындағы ағынның орташа жылдамдығы –  $Q$  шығындағы  $\omega$  берілген нақты қима бойынша сұйықтықтың барлық бөлшектеріне сәйкес нақтылы жылдамдықпен қозғалатын барлық нүктелерге бірдей ағын жылдамдығы.

### 3.4 Құйынды қозғалыс

Сұйық бөлшектің траекториясы – қозғалыс барысында сұйық бөлшек салатын қисық сызық.

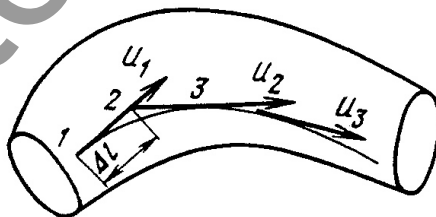
Сұйық бөлшек – пішінін өзгертуін ескермеуге болатын сұйықтықтың аз көлемі.

Сұйықтықта қозғалатын ағын өз пішіндерін өзгертпейтін қарапайым құйыншалардан тұрады деп алайық, яғни ағынды ойша қарапайым құйыншалар қатарына (трубкалар) бөлеміз. 3.1 суретте сұйықтықтың құйындық қозғалысының моделі көрсетілген.



3.1 - сурет. Сұйықтықтың құйындық қозғалысының моделі

Орныққан қозғалыста орналасқан сұйықтық ағынын қарастырайық (3.2 сурет). Бір-бірінен  $\Delta l$  арақашықтықта алынған, осы ағынның 1, 2, 3 ... нүктелерінде берілген уақыт кезіндегі сұйықтықтың бөлшектерінің шамасы мен қозғалыс жылдамдығын сипаттайтын  $u_1, u_2, u_3, \dots$  векторларын жүргіземіз.



3.2 – сурет. Сұйықтықтың ағын қозғалысының векторлық сұлбесі

Сұйықтықтың бөлшектерінің қозғалысының векторларына жүргізілген және берілген уақыт кезінде сұйықтық бөлшектерінің ретті бағытын сипаттайтын жанама қисық *тоқ сызығы* деп аталады.

Траектория  $\Delta t$  белгілі бір уақыт аралығында сұйықтықтың бір бөлшегінің қозғалу жолын көрсетеді, ал тоқ сызығы әртүрлі бөлшектерді біріктіріп және  $t$  уақытта қозғалып жатқан сұйықтықтың кейбір шапшаң сипаттамасын береді.

Егер қозғалатын сұйықтықта шексіз аз тұйық контурды белгілеп алып және сәйкес уақыт кезіне байланысты оның барлық нүктелері арқылы тоқ сызығын жүргізсек, онда *тоқ трубкасы* деп аталатын трубкалы өткізбейтін бет пайда

болады. Тоқ трубкасының ішінде қозғалатын сұйық салмағы *қарапайым құйыншаны* тудырады.

Қарапайым құйынша екі қасиетке ие:

а) бір нақты қимадағы құйыншалардың көлденең қималарының жылдамдықтары мен аудандары олардың аздығынан өзгермейді;

б) әртүрлі нақты қималардағы құйыншалардың көлденең қималарының жылдамдықтары мен аудандары өзгеруі мүмкін, алайда олардың  $\omega$  көлденең қимасының ауданында құйыншаның жеке бөлшектерінің  $v$  жылдамдық туындысы тұрақты болып қалады (*қарапайым құйыншаның үзіліссіздік теңдеуі*)

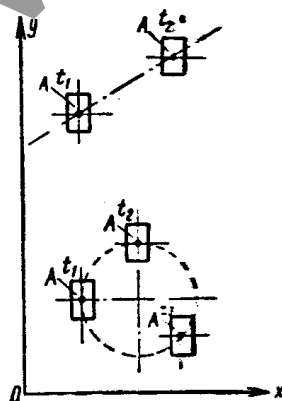
$$v_1\omega_1 = v_2\omega_2 = v_3\omega_3 = const . \quad (3.8)$$

Сол себепті, сұйықтық ағыны деп қандай да бір бағытта қозғалатын бөлшектердің үзіліссіз салмағын сипаттайтын қарапайым құйыншалардың бірлестігін айтады.

### 3.5 Қозғалысты құрайтын сұйық бөлшектердің сараптамасы

Сұйық бөлшек қаттыдан қарағанда қозғалыс кезінде пішінін өзгерте алады, яғни деформацияға ұшырайды. Сондықтан сұйық бөлшектің қозғалысы түспелі, айналмалы және деформациялық болып бөлінуі мүмкін ( қатты бөлшек үшін тек түспелі және айналмалы қозғалыстар тән).

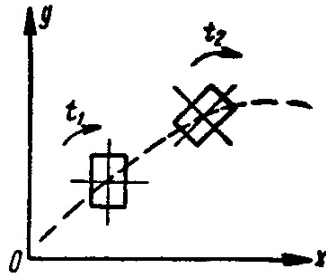
3.3 суретінде параллелепидтің сұлбалық мысалында түзу және шеңбер бойымен қозғалатын сұйықтықтың түспелі қозғалысы көрсетілген.



3.3 – сурет. Бөлшектердің айналымсыз қозғалысы

Бөлшектердің айналымсыз қозғалысы

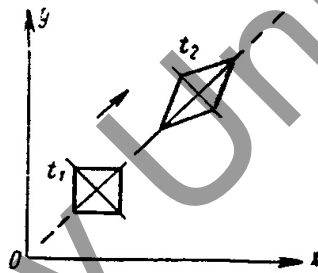
3.4 суретте сұйықтықтың түспелі және айналмалы қозғалысы сұлба түрінде көрсетілген.



3.4 – сурет. Бөлшектің айналыммен қозғалысы

*Айналмалы қозғалыс* параллелепидтің орталығы бойынша айналуын сипаттайды, мұнда параллелепидтің диагональдары өз орнын координаталық осьтер бойынша өзгертеді, ал оның бұрыштары өзгермейді. Сонымен бөлшек қозғалысы оның бұрылуы кезіндегі бұрыштық жылдамдықтың шамасы және бағытымен бағаланады.

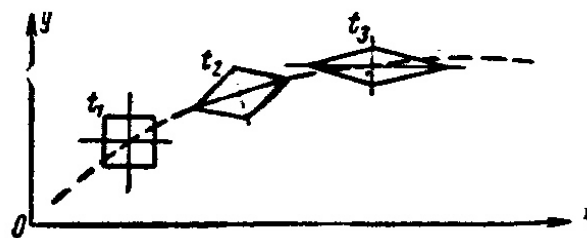
3.5 суретте сұйықтықтың түспелі және деформациялық қозғалысы көрсетілген.



3.5 – сурет. Бөлшектердің деформациясы кезіндегі қозғалыс

*Деформациялық қозғалыс* параллелепидтер ұштарының арасындағы бұрыштардың өзгеруімен сипатталады және осы бұрыштардың жылдамдықтарының өзгеруімен бағаланады (араласу қарқындалығымен).

3.6 суретте сұйықтықтың құрамдасқан (комбинирленген) қозғалысы көрсетілген (түспелі айналмалы және деформациялық).



3.6 – сурет. Бөлшектің айналмалы және деформациялық қозғалысы

### 3.6 Құйынды және құйынсыз қозғалыстар. Гельмгольц теоремасы

Құйынды қозғалыс – сұйықтықтың шектелген массасының кейбір осіне қатысты (құйынды сызығы) айналуы. Мысалы, өзіндегі су қозғалысы кезінде көпірлердің тіректерінің артында, қайықтар мен катерлердің артқы жағында, суды ескектермен ескенде, тосқауылдарды өткенде және т.б. құйындар пайда болады.

Құйынды қозғалыс екі параметрлермен анықталады: осімен және айналудың бұрыштық жылдамдығымен.

$\omega$  сұйықтық бөлшегінің айналуының бұрыштық жылдамдық векторы құйын деп аталады. Бұл вектордың шамасы және бағыты координаталар осьтеріндегі оның проекцияларымен анықталады.

Құйын шамасы, яғни айналудың бұрыштық жылдамдығы шапшаң ось айналасында келесі формуламен анықталады:

$$\omega = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}, \quad (3.9)$$

мұндағы

$$\xi = \omega \cos \alpha = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) \text{ (кси) - } Ox \text{ осі координатасына проекциясы;}$$

$$\eta = \omega \cos \beta = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) \text{ (эта) - } Oy \text{ осі координатасына проекциясы;}$$

$$\zeta = \omega \cos \gamma = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \text{ (дзета) - } Oz \text{ осі координатасына проекциясы.}$$

Осыған орай, жылдамдық өрістері құйынды болып табылады, егер осы проекциялардың кез келген біреуі нөлге тең болмаса немесе егер

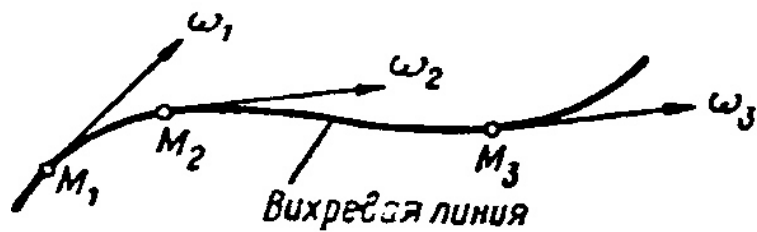
$$\frac{\partial \omega}{\partial y} \neq \frac{\partial v}{\partial z}; \quad \frac{\partial u}{\partial z} \neq \frac{\partial \omega}{\partial x}; \quad \frac{\partial v}{\partial x} \neq \frac{\partial u}{\partial y}.$$

Құйынсыз қозғалыс –  $\omega = 0$  болған кезде және осы кезде құйынның әр құраушысы нөлге бірдей теңелген кездегі, яғни  $\xi = \eta = \zeta = 0$  болғандағы қозғалыс

Құйынды сызық (айналу осі) –  $\omega$  бұрыштық жылдамдығының векторына бағытталған жанама сызық. Бұл сызық тоқ сызына сай және келесі теңдеумен анықталады:

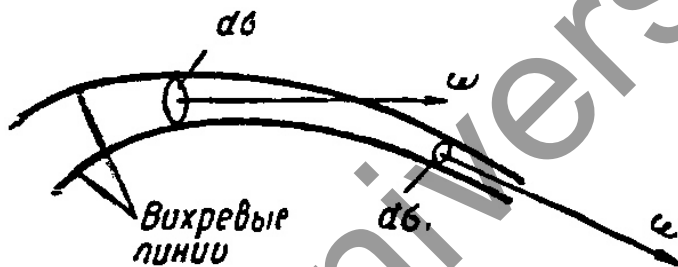
$$\frac{dx}{\xi} = \frac{dy}{\eta} = \frac{dz}{\zeta}. \quad (3.10)$$

3.7 құйынды сызық бейнеленген.



3.7 – сурет. Құйын сызығы.

Құйынды трубка – қарапайым тұйық контур арқылы өтетін құйынды сызықтар жүйесімен түзілген трубка.



3.8 – сурет. Құйынды трубка

Құйынды бау – құйынды трубканың ішінде орнатылған құйынды сызықтардың жиыны.

$j_e$  құйын кернеуі -  $d\sigma$  құйынды трубканың көлденең қимасының ауданының осы қимадағы айнарудың бұрыштық жылдамдығының орташа шамасына туындысы.

Құйын кернеуі келесі формуламен анықталады:

$$dj_e = \omega d\sigma. \quad (3.11)$$

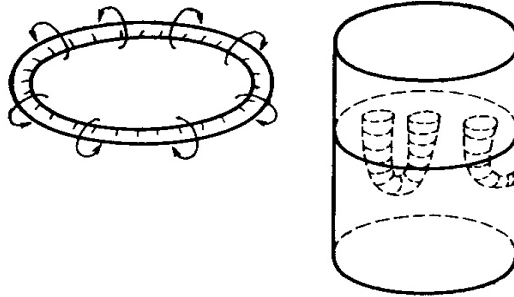
Құйынды трубка қасиеттері:

а) құйынды трубка уақыт пен кеңістікте сақталады, яғни ешқайдан көрінбейді;

б) құйын кернеуі құйынды сызық бойымен өзгеріссіз қалады, яғни

$$dj_e = \omega d\sigma = const;$$

в) құйынды трубканың тұйық сақина түзеді қалыптастырады немесе берілген сұйықтық массаларының шекараларында бітеді (3.9 сурет).



3.9 – сурет. Құйынды трубканың мүмкін болу пішіндері

Құйынды қозғалыс өздігінен пайда болмайды, ал тұтқыр емес сұйықтықта жоғалмайды.

**Гельмгольц теоремасы** идеал сұйықтықта құйынды қозғалыстың сақталу шарттарын орнатады.

*1 теорема.*

Құйынды трубканың қарқындылығы оның ұзындығы бойынша өзгермейді.

*2 теорема.*

Потенциалды массалық күштер әсеріндегі идеал сұйықтықта құйынды трубка бұзылмайды және әрдайым құйынды трубка болып қала береді.

*15. теорема.*

Потенциалды массалық күштер әсеріндегі идеал сұйықтықта құйынды трубка бұзылмайды және әрдайым құйынды трубка болып қала береді.

Потенциалды массалық күштер әсеріндегі идеал сұйықтықта құйынды трубка кернеуі уақыт өтуіне байланысты өзгермейді.

### **3.7 Жылдамдық айналымы. Стокс және Томсон теоремалары**

Жылдамдық айналымы түсінігін Томсон енгізген.

*Жылдамдық айналымы* – сұйықтықтың айналмалы қозғалысының қарқындылығы. Жылдамдық айналымы келесі формуламен анықталады:

$$\Gamma = \int_A^B V \cos \theta ds = \int_A^B u dx + v dy + w dz, \quad (3.12)$$

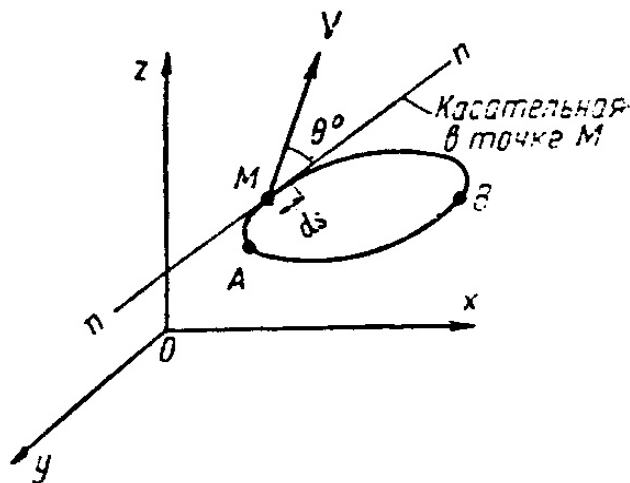
мұндағы

$V$  - берілген нүктедегі жылдамдық векторы;

$\theta$  - бірдей нүктедегі контурға жылдамдық векторы бағыты мен жанама түзген бұрыш;

$ds$  - контурлы сызық элементі;

$A, B$  - айналым шамасы есептелетін контурлық сызық аймағын анықтайтын интегралдау шектері.



3.10 – сурет. Контур бойынша жылдамдық айналымы

Кернеулік белгілі бір контур бойынша жылдамдық айналымымен байланысқан. Бұл байланыс Стокс теоремасының негізінде орнатылады.

### Стокс теоремасы

Негізсіз контур бойынша жылдамдық айналымы осы контурмен қамтылған құйындардың кернеулерінің екі еселік сомасына тең.

$$\Gamma = 2 \int_F \omega_n dF, \quad (3.13)$$

мұндағы

$\omega_n$  - қарастырылып отырған ауданға нормаль  $\omega$  вектор құраушысы;

$F$  - құйынды трубка қимасының ауданы.

**Потенциалдықозғалыс**— өзіндік осьтері айналасында айналымдық қозғалысы жоқ сұйықтықтың құйынсыз қозғалысы.

Потенциал қозғалыс үшін келесі шарттар дұрыс  $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$ .

Сұйықтықтың потенциал қозғалысы үшін жылдамдық айналымы келесі формуламен анықталады:

$$\Gamma = \int_A^B V \cos \theta ds = \int_A^B d\varphi = \varphi_B - \varphi_A, \quad (3.14)$$

мұндағы

$$d\varphi = udx + vdy + \omega dz;$$

$\varphi$  - жылдамдық потенциалы.

### Томсон теоремасы

Құйынсыз қозғалыс және жылдамдық потенциалының бірімәнділігі кезінде кез келген тұйық контур бойынша жылдамдық айналымы нөлге тең:

$$\Gamma = \int_B^A d\varphi = \varphi_A - \varphi_B = 0. \quad (3.15)$$

Жылдамдық потенциалының көпмәнділік функциясы кезінде жылдамдық айналымы нөлге тең болмайды. Бұл жағдайда  $\varphi$  мәні толық айналым кезінде  $2\pi$  шамасына артады.

*Сұйықтықтың жазық қозғалысы* – ағыстың барлық параметрлері координаталардың екі осьтері бағытында өзгеретін қозғалыс

### Бақылау сұрақтары мен тапсырмалар

1. Гидрогазодинамика нені зерттейді?
2. Сұйықтық қандай күштердің әсерімен қозғалады?
3. Ағынның қандай сипаттамалары гидродинамикалық болып табылады?  
Олардың анықтамасын беріңіз.
4. Сұйықтық ағысының қандай режимдері бар?
5. Сұйықтықтың ламинарлық және турбуленттік қозғалыстары арасында қандай айырмашылық бар?
6. Сұйықтықтың ағынының қозғалыс режимі қандай критериймен сипатталады?
7. Рейнольдс санының қандай мәндерінде қозғалыстың ламинарлық және турбуленттік режимдері байқалады?
8. Сұйықтық қозғалысының қандай түрлері бар?
9. Орныққан сұйықтық қозғалыс орнықпағаннан қандай айырмашылығы бар?
10. Сұйықтықтың арынды және арынсыз қозғалыстарының мысалдарын келтіріңіз.
11. Сұйықтықтың бірқалыпты және бірқалыпсыз қозғалыстарының арасында қандай айырмашылығы бар?
12. Ағынның нақты қима түсінігіне анықтама беріңіз?
13. Ағынның нақты қимасы қандай сипаттамаға ие?
14. Ағын шығынымен ағынның орташа жылдамдығы деп нені атайды?
15. Сұйық бөлшек және траекториясы деген не?
16. Токтың сызығы, токтың трубкасы, қарапайым ағынша деп нені атайды?
17. Қарапайым ағынша қандай қасиеттерге ие?
18. Сұйық және қатты бөлшектердің қозғалыстары қалай бөлінуі мүмкін?
19. Сұйық бөлшектердің түспелі, айналмалы және деформациялы қозғалыстары қалай сипатталады?
20. Құйынды қозғалысқа анықтама беріңіз.
21. Құйынды деген не және оның көлемі қалай анықталады?
22. Құйынсыз қозғалыс деген не?
23. Құйынды сызығы, құйынды трубкасы және құйынды бауы деп нені атайды?
24. Құйынды трубка қандай қасиеттерге ие?

25. Гельмгольц теоремасында не туралы айтылған?
26. Жылдамдық айналымы деген ұғымға анықтама беріңіз.
27. Стокс теоремасы нені білдіреді?
28. Потенциалды қозғалыс деп нені айтамыз?
29. Томсон теоремасы нені білдіреді?
30. Сұйықтықтың қандай қозғалысын жазықтық деп атайды?

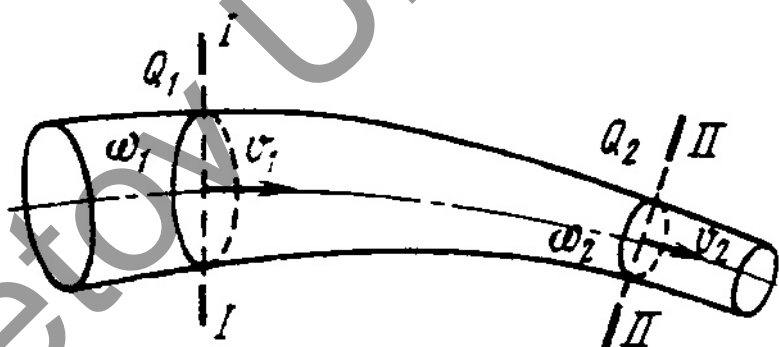
## 15. Сұйықтық және газ қозғалысының негізгі теңдеулері

### 4.1 Ағынның үзіліссіздік теңдеуі. Шығынның тұрақтылығы теңдеуі

*Қарапайым ағыншаның үзіліссіздік теңдеуі:* әртүрлі нақты қималардағы ағыншалардың жылдамдығы мен көлденең қималарының ауданы өзгеруі мүмкін, алайда ағыншаның жеке бөлшектерінің жылдамдық туындысы олардың  $\omega$  көлденең қималарында тұрақты болып қалады:

$$v_1\omega_1 = v_2\omega_2 = v_3\omega_3 = \text{const} . \quad (4.1)$$

Айнымалы қима арнасындағы орнатылған қозғалысты қарастырайық (4.1 сурет). Ағынның осіне нормаль екі негізсіз I-I және II-II қималарын таңдаймыз және қималар арасындағы бекітілген ағын аймақтарын қарастырамыз.



4.1 – сурет. Шығындардың тұрақтылығы және ағынның үзіліссіздігіне байланысты теңдеулер сұлбасы

Сұйықтық сығылмайтын, ал арнаның қабырғалары қатты болғандықтан қарапайым ағыншаның екінші қасиеті негізінде шығынның тұрақтылық теңдеуін жазуға болады:

$$Q_{I-I} = Q_{II-II} = Q = \text{const} . \quad (4.2)$$

*Шығынның тұрақтылық теңдеуі:* сығылмайтын сұйықтықтың орныққан қозғалысындағы кез келген қимасында оның шығыны бірдей болады.

$Q = v\omega$  болғандықтан, *ағынның үзіліссіздік теңдеуін* аламыз:

$$v\omega_{I-I} = v\omega_{II-II} = v\omega = \text{const} . \quad (4.3)$$

*Ағынның үзіліссіздік теңдеуі:* сығылмайтын сұйықтықтың орныққан қозғалысында ағынның орташа жылдамдығының нақты қима ауданына туындысы тұрақты шама болып табылады.

Бірлік уақыттағы сұйықтық ағынының қимасы арқылы бірдей сұйықтық мөлшері өтеді:

$$v_1 \omega_1 = v_2 \omega_2 = Q = \text{const}. \quad (4.4)$$

4.4 теңдеуінен көретініміз, ағынның орташа жылдамдықтары сәйкес қималар ауданына кері пропорционал:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \text{ немесе } \frac{v_1}{v_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}. \quad (4.5)$$

Үзіліссіздіктің дифференциал теңдеуі келесі түрге ие:

$$dQ = u d\omega = \text{const}, \quad (4.6)$$

мұндағы

$dQ$  - қарапайым ағынша шығыны;

$d\omega$  - ағыншаның көлденең қимасының тексіз аз ауданы;

$u$  - қарапайым ағыншаның көлденең қимасындағы жылдамдығы.

#### 4.2 Энергия теңдеулері

*Энергия* – дене қандай жұмыс істей алатынын көрсететін физикалық шама.

Кез келген дененің механикалық энергиясы екі шамамен сипатталатыны белгілі:

а) *кинетикалық энергия* (дененің массасы мен оның қозғалу жылдамдығына тәуелді қозғалыс энергиясы)

$$E_k = \frac{mv^2}{2}, \quad (4.7)$$

мұндағы

$m$  - дене немесе бөлшектің массасы;

$v$  - дене немесе бөлшектің қозғалыс жылдамдығы.

Б) *потенциалдық энергия* (дене мен бір дененің бөліктерінің өзара орнауымен анықталатын энергия).

Биіктікке көтерілген дене немесе бөлшектің потенциалдық энергиясы:

$$E_n = mgz. \quad (4.8)$$

Егер сұйық дене массасы  $V$  көлемге және  $P$  қысымға ие болса, онда бұл дене қысымның потенциалдық энергиясына ие болады:

$$E_0 = PV. \quad (4.9)$$

Элементар бөлшектің толық механикалық энергиясы келесі формуламен анықталады:

$$E = \frac{mu^2}{2} + mgz + PV = \frac{mu^2}{2} + mgz + \frac{Pm}{\rho}, \quad (4.10)$$

мұндағы

$m$  - элементар бөлшектің массасы ;

$u$  - элементар бөлшектің жылдамдығы.

*Бөлшектің меншікті энергиясы* – бірлік массаға қатысты энергия.

$$\mathcal{E}_{\text{yo}} = \frac{u^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g}, \quad (4.11)$$

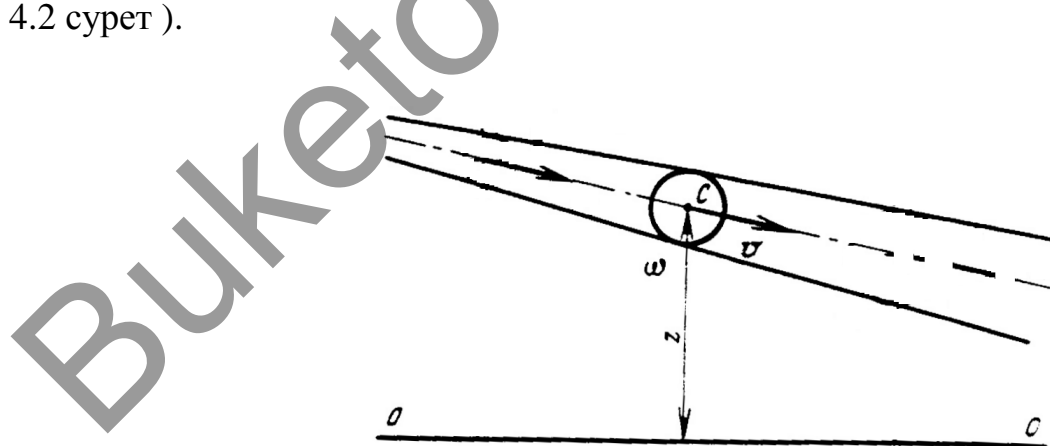
мұндағы

$\frac{u^2}{2g} = \mathcal{E}_k$  - бөлшектің меншікті кинетикалық энергиясы;

$z + \frac{P}{\rho g} = \mathcal{E}_n$  - бөлшектің меншікті потенциалдық энергиясы.

Сұйық ағыны элементар бөлшектер көпшілігінің жиынтығын құрайтындықтан, орнатылған немесе бірқалыпты өзгеріп отыратын ағынның қозғалысын есепке ала отыра сұйық ағынының салыстырмалы энергиясының соңғы өлшемдерін анықтауға болады.

Қимасы бірқалыпты көлбеу құбыр түріндегі сұйық ағынын қарастырады ( 4.2 сурет ).



4.2 – сурет. Сұйық ағынының энергия теңдеуінің схемасы

Ағынның ішінен белгілі бір  $c$  нүктесін белгілеп аламыз. Сол нүктемен таңдалған  $O-O$  жазықтығының арасын (салыстырмалы жазықтық) -  $z$  белгілеп аламыз, қима ауырлық центрінендегі сұйықтың қысымы -  $P$ , таңдалған жазықтықтағы сұйық қозғалысының орташа жылдамдығы -  $v$ .

*Ағынның толық энергиясы:*

$$\mathcal{E}_{\text{то}} = \mathcal{E}_k + \mathcal{E}_n, \text{ тең}$$

мұнда

$\mathcal{E}_k$  - ағынның меншікті кинетикалық энергиясы ;

$\mathcal{E}_n$  - меншікті потенциалдық энергиясы.

*Меншікті кинетикалық энергия төмендегі формуламен анықталады:*

$$\mathcal{E}_k = \frac{\sum \frac{u^2}{2g}}{n} = \alpha \frac{v^2}{2g}, \quad (4.12)$$

мұнда

$n$  - элементар бөлшек саны ;

$u$  - элементар бөлшек жылдамдығы;

$v$  - ағынның орташа жылдамдығы ;

$\alpha$  - қима бойынша жылдамдықтың біркелкі еместігін ескеретін коэффициент

Гидростатикалық қысымға сәйкес *меншікті* потенциалдық төмендегідей анықталады:

$$\mathcal{E}_n = \frac{P}{\rho g} + z = \text{const}, \quad (4.13)$$

яғни тыныштық күйдегі сұйықтың берілген көлемінің барлық нүктелеріндегі меншікті потенциалдық энергияның таңдалған жазықтыққа қатысты салыстыру тұрақты болады.

Онда таңдалған қимадағы ағынның *толық меншікті энергия теңдеуі* төмендегідей

$$\mathcal{E}_{\text{то}} = \alpha \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z = \alpha \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + z. \quad (4.14)$$

Ағындағы жылдамдықтың таралуы белгісіз болғандықтан , сұйық және газ механикасында олар бірдей мән болып қабылданады , ал ағынның кинетикалық энергиясын анықтау кезінде  $\alpha$  түзету коэффициенті енгізіледі .

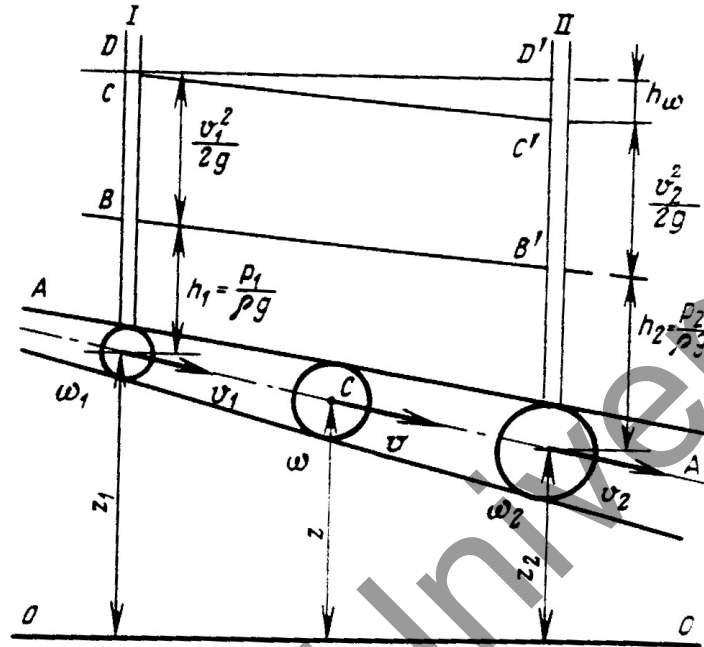
*Түзету коэффициенті*  $\alpha$  - ағын қимасында жылдамдықтың біртекті таралуы кезіндегі кинетикалық энергия өзгерісін сесптейтін *кинетикалық энергия коэффициенті* ( *Кариолис коэффициенті* ).

$\alpha = 1,0 \dots 1,13$  - тегіс турбуленттік ағын үшін.

$\alpha = 2,0$  - тегіс ламинарлық ағын үшін

### 4.3 Бернулли теңдеуі және оны практикалық түрде қолдану

Қимасы өзгеріп отыратын трубкалардағы сұйық ағынынан екі еркін I-I және II-II қимасын таңдаймыз (сурет 4.3).  $\omega_1$  және  $\omega_2$  ауырлық центрі қималарындағы қысымды  $P_1$  және  $P_2$ ,  $v_1$  және  $v_2$  - орташа жылдамдық,  $z_1$  және  $z_2$  - алынған қимадағы ағын осінің вертикаль координаталары деп белгілейміз.



4.3 – сурет. Бернулли теңдеуін сипаттайтын схема

Онда I және II қималардағы ағынның толық меншікті энергиясы сәйкесінше төмендегідей жазылады

$$\mathcal{E}'_{y\omega} = \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 \quad (4.15)$$

$$\mathcal{E}''_{y\omega} = \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 \quad (4.16)$$

Реалды сұйық қозғалысы кезінде энергияның жарты бөлігі бірінші қимадан екінші қимаға дейінгі жолдағы үйкеліс күшін жоюға жұмсалады. Ол энергия жылуға айналып, жойылады.

Шығын өлшемін  $h_w$  деп белгілейміз.

I және II қималардағы энергия балансын (реал сұйық ағыны үшін Бернулли теңдеуі) төмендегідей жазуға

$$\alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 = \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + h_w \quad (4.17)$$

немесе

$$\alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + h_\omega, \quad (4.18)$$

мұндағы

$\alpha \frac{v^2}{2g}$  - жылдам ағынның биіктігі;

$\frac{P}{\rho g}$  - пьезометр бойынша әрбір жазықтық үшін есептелетін пьезометрлік

биіктік;

$z$  - геометриялық биіктік ;

$h_\omega$  - жылуға айналған энергия бөлігіне тең жоғалған напор.

*Бернулли теңдеуі* - сұйық қозғалысы кезіндегі негізгі элементтердің арасында математикалық байланыс орнатады , яғни орташа жылдамдық пен гидродинамикалық қысым арасында . Ол энергияның бір түрі басқа бір түрге ауысып жылдамдық жоғарлаған кезде қысымның төмендейтінін , керісінше жылдамдық жылдамдық төмендеген кезде қысымның артанынын көрсетеді .

*Бернулли теңдеуінің физикалық (энергетикалық) мағынасы:* сұйықтың қозғалысы кезінде үш меншікті (ұқсастық, қысым және кинетикалық) энергияның қосындысы өзгермейді.

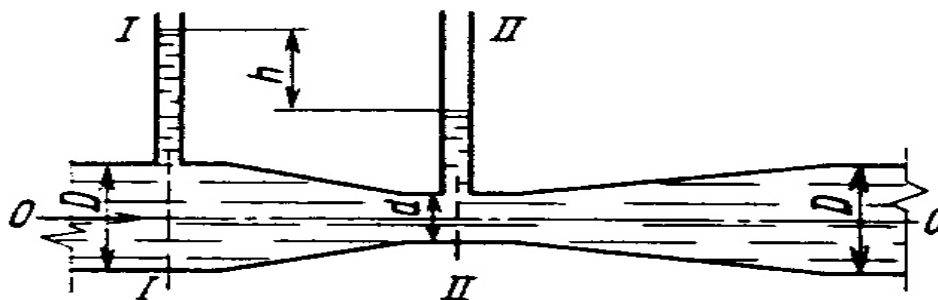
*Гидродинамикалық напор* – напордың , геометриялық және пьезометриялық биіктіктердің қосындысы.

$$H_{\omega} = \alpha \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + z. \quad (4.19)$$

Бернулли теңдеуінің негізінде құрылғылар қатары жинақталған ( Вентури суөлшегіші , суағынды насос , эжектор және т.б.).

Құбырдағы су өлшегіш құрылғы Вентури суөлшегіше Бернулли теңдеуін қолдануды қарастырамыз ( сурет 4.4), яғни диаметрі  $D$  негізгі құбырда кіші диаметрлі  $d$  құбыр орналасады. Кіші ждиаметрлі құбыр негізгі құбырмен конусты өткелдер арқылы жалғанған .

Негізгі құбыр ( I-I қима ) және тарытылған қимаға (II-II қима) көрсетуі бойынша құбырдағы сұйық шығыны  $Q$  анықталатын пьезометрлер жалғанған.



4.4 – сурет. Вентури су өлшегішінің схемасы

Сұйық шығынын анықтау үшін су өлшегіштің жалпы формуласын анықтаймыз.

$z_1 = z_2 = 0$ ;  $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$  және  $h_w = 0$  ( қималар арасындағы қашықтық аз болғандықтан  $h_w = 0$ ) шарттарын қоямыз. Құбыр осінен өтетін О-О жазықтығындағы қиманың ауырлық центрінде орналасқан нүкте үшін Бернулли теңдеуін жазамыз

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} \text{ немесе } \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}.$$

4. 4 суретте көрсетілгендей

$$\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} = h \rightarrow h = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}.$$

Соңғы теңдеуде  $v_1$  және  $v_2$  шамалары белгісіз. Үзіліссіздік теңдеуін қолдана отырып  $\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{D^2}{d^2}$  түрінде жазуға болады, осыдан  $v_1 = v_2 = \frac{D^2}{d^2}$ .

Оны түрлендіріп келесі теңдеуді аламыз

$$h = \frac{v_1^2}{2g} \left( \frac{D^4}{d^4} - 1 \right).$$

Негізгі құбырдағы (I-I қима) ағынның жылдамдығы мынаған тең

$$v_1 = \sqrt{\frac{2gh}{\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1}}.$$

$$Q = v_1 \omega_1 = v_1 \frac{\pi D^2}{4}, \text{ то } Q = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1}} \text{ болғандықтан.}$$

Беріоген су өлшегіш үшін тұрақтв шаманы  $K$  арқылы белгілейміз :

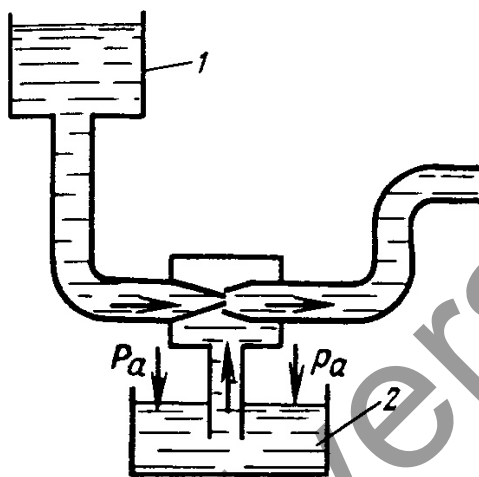
$$K = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1}}, \text{ тогда } Q = \xi K \sqrt{h},$$

мұндағы

$\xi$  - су өлшегіштегі напор шығының ескеретін коэффициент, 0,96...0,98 тең деп алынады .

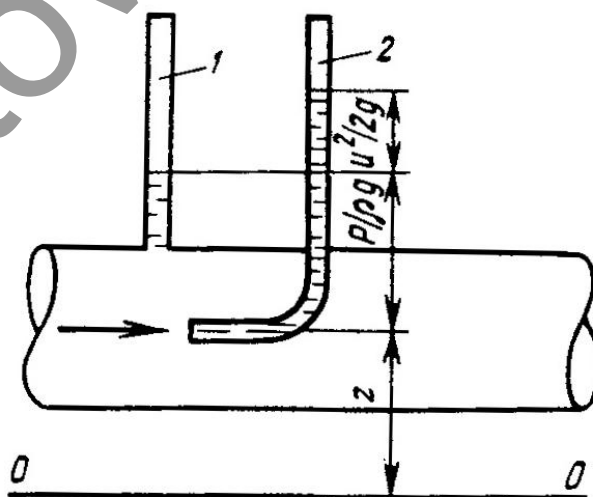
Соған сәйкес ұлғайтылған және тартылған қималардағы су өлшегіштердің диаметрін , пьезометрмен өлшенетін қысымдар айырымын  $h$  біле отырып су шығын оңай анықтауға болады.

Су ағынды насостарда су бактан 1 тарылтуы бар құбырға келіп түседі (сурет 4.5). Құбырдың жіңішке қимасында жылдамдық артады. Бұл кезде Бернулли теңдеуіне сәйкес қысым атмосфералық төменгі қысымға дейін азаяды, сондықтан 2 бакка түсірілген сұйық трубка бойымен сорылады. Қозғалыстың жылдамдық шамасы үлкен болса, сұйық 2 бактан үзіліссіз сорылады.



4.5 – сурет. Су ағынды насос схемасы

Қозғалыстағы сұйықтың ағын жылдамдығын Пито трубкасымен анықтайды. Бұл құрылғы екі шетінен ашық, шыны трубкадан тұрады (сурет 4.6).



4.6 – сурет. Пито трубкасы бар құрылғы схемасы

Қозғалыстағы сұйықтың жылдамдығы әсерінен Пито трубкасында қосымша қысым пайда болады ( жылдамдық напоры)

$$h = \frac{v^2}{2g}; \quad v = \sqrt{2gh};$$

$$v = k\sqrt{2gh},$$

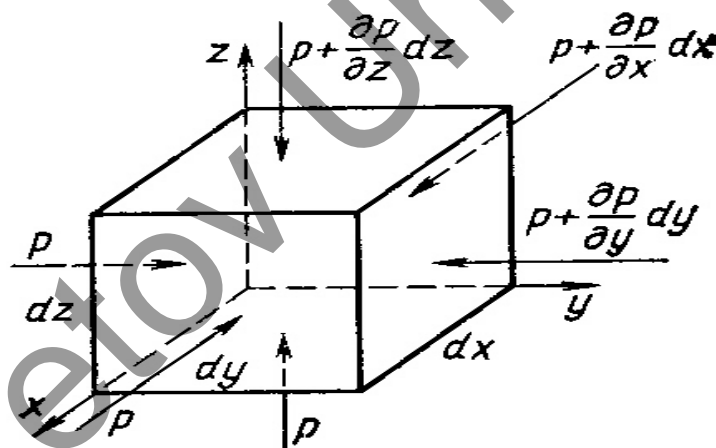
мұндағы

$k$  - трубка құрылымына байланысты және тарировка жолымен анықталатын коэффициент .

#### 4.4 Идеал жән тұтқыр сұйық қозғалысының дифференциал теңдеуі

Қарастырылатын теңдеулер сұйық элементке қатысты қозғалыс мөлшерінің сақталу заңының математикалық түрін көрсетеді : қозғалыс мөлшері векторы өзгерісінің жылдамдығы қарастырылатын сұйық элементтеріне әсер ететін барлық массалық және беттік күштердің қосындысына тең .

Мұндай элемент ретінде массалық күш векторы және беттік күштің суммалық векторы әсер ететін қабырғалары  $dx, dy, dz$  сұйық үшбұрышты параллелепедті ( сурет 4.7) қолданамыз .Бұл екі векторлар бірілк көлемге қатысыт.



4.7 – сурет. Идеал сұйықтың қозғалысы кезіндегі дифференциалды теңдеуді анықтайтын схема

Бұл жағдайда идеал сұйықтың қозғалысы қарастырылады. Бірден – бір беттік күш гидродинамикалық қысыммен  $p$  сипатталатын күш болып саналады.

$x$  перпендикуляр осінің шектеріне келесідей күштер әсер етеді:

сол жақ шетіне -  $pdydz$  ;

оң жақ шетіне -  $(p + \frac{\partial p}{\partial x})dydz$  .

Осьтің бағытын ескере отырып , бірлік көлемге қатысты,  $x$  осінің бағыты бойынша әсер ететін беттік күшті анықтаймыз,  $P_x = -\frac{\partial p}{\partial x}$ .

$$P_y = -\frac{\partial p}{\partial y}; P_z = -\frac{\partial p}{\partial z}.$$

Идеал сұйықтың қозғалыс теңдеуі (Эйлер теңдеуі ) ;

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + Y; \\ u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + Z. \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

Бірқалыпты қозғалыс үшін Эйлер теңдеуі келесідей

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + X; \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + Y \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

Бірөлшемді ағыс кезіндегі ( яғни ағын параметрлері мен жылдамдық бір координатаға байланысты ) Эйлер теңдеуі төмендігідей

$$c \frac{dc}{dx} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + X. \quad (4.22)$$

Тұтқырлық күшін есепке алғандағы қозғалыс теңдеуі күрделі болады. Идеал сұйықпен салыстырғанда беттік күштер дұрыс бағыттылмаған.

Тұтқыр сұйық үшін қозғалыс теңдеуі ( Навье – Стокс теңдеуі )

$$\left. \begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right); \\ \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right); \\ \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right); \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.23)$$

#### 4.5 Турбулентті қозғалыстың негізгі сипаттамасы

Қозғалыс процессінде турбулентті режимге сұйықтың *орын ауыстыруы, жылдамдық пен қысым пульсациясы* қасиеттері тән. Сондықтан турбулентті ағынның механизмі күрделі .

Рейнольдс саны критикалық мәнге жеткен кезде сұйықтың қозғалысы турбулентті болып есептеледі. Онда құбыр қабырғасынан оған дейін реттелген қозғалысын бұзатын және ағынның ішіне келіп түсетін жеке сұйық массалары бөлініп қалады.

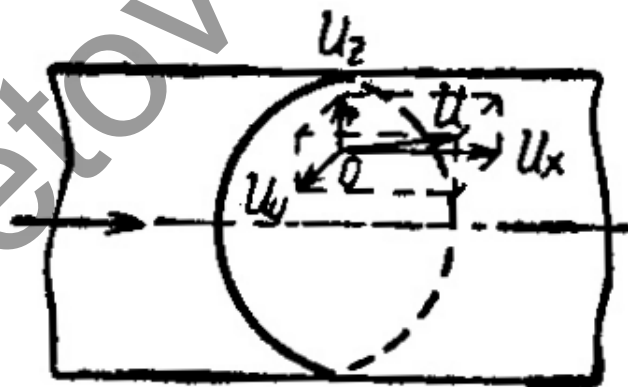
Нәтижесінде қабырғаларда пайда болған вихрьлерде диффузия пайда болады, турбуленттіліктің кинетикалық энергиясы жойылады. Соған сәйкес ағынның механикалық энергиясы біртіндеп жылулыққа айналады.

Интенсивті құйын түзу әсерінен турбуленттік қозғалыс кезіндегі сұйық бөлшектері күрделі траекториямен сипатталады, ал уақытқа байланысты ағын шығыны тұрақты болса да, жергілікті жылдамдық тұрақты болып сақталмайды.

Турбуленттік ағын кезінде алдын ала орнатылған қозғалыс болмайды. Ағынның әрбір нүктесінде жылдамдық өлшемі және бағытты бойынша үзіліссіз өзгеріп отырады.

*Лездік жергілікті жылдамдық* – турбуленттік ағын нүктесі кезіндегі жылдамдық .

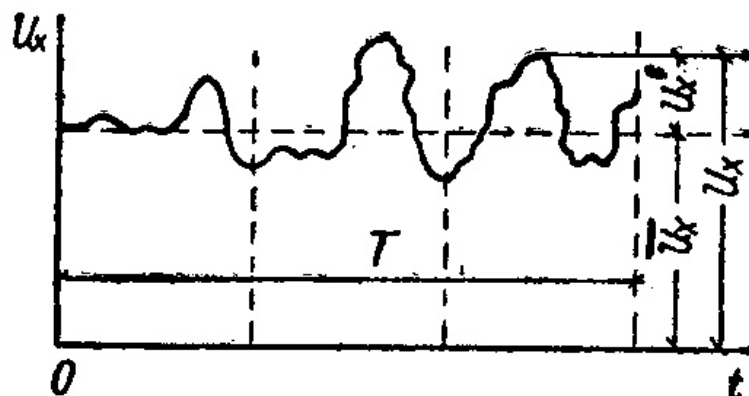
Лездік жергілікті жылдамдықты үш өзара перпендикуляр бағытта орналастырамыз. Нақты қимаға нормаль бойынша бағытталған бойлық құраушыны  $u_x$  және нақты қима ағынының жазықтығында жататын екі көлденең құраушыны  $u_y$  және  $u_z$  аламыз (сурет 4.8).



4.8 – сурет. Турбуленттік ағыстағы пульсациялық жылдамдық құраушылары

Бойлық сияқты, көлденең лездік жылдамдық құраушылары да уақытқа байланысты өзгеріп отырады.

*Жылдамдық пульсациясы* – дегеніміз жобалау кезінде лездік жергілікті жылдамдықтың қандай да бір бағытқа өзгеруі. Жылдамдықтың пульсациясы сезгіш құралдар арқылы бақыланады. 4.9 суретте пульсация графигі көрсетілген.



4.9 – сурет. Турбуленттік ағын кезіндегі лездік жергілікті жылдамдықтың пульсациясы

Жылдамдықтың өзгерісі ретсіз болып көрінеді, бірақ белгілі  $T$  уақыт аралығында орташаландырылған жылдамдық мәні тұрақты болып қалады. Ол дегеніміз жылдамдық кейбір (уақыт бойынша орташаландырылған)  $\overline{u_x}$  орташа мәнінде үзіліссіз пульсацияланады.

*Пульсациялау* – дегеніміз қандай да бір орташа мәнге қатысты шамалардың өзгеріске ұшырауы.

Графикалық орташаландырылған жылдамдық пульсациялық қисық арасында орналасқан үшбұрыштың  $u_x$  биіктігімен, абсцисса осі және бақылаудың соңғы және бастапқы моменттеріне сәйкес екі ордината осімен анықталады. Орташаландырылған жылдамдықты анықтау үшін бақылау периодының жеткілікті болуы маңызды, себебі пульсационды қисықтың заңға сәйкес периодтылығы анықталмаған.

*Орташаландырылған жылдамдық* – жеткілікті уақыт аралығында анықталатын берілген нүктедегі қозғалыстың орташа жылдамдығы.

*Пульсациялық жылдамдық құраушысы (пульсационды қосымша)* – жергілікті жылдамдықтың нақты және орташаландырылған мәндері аралығындағы айырмашылық. Пульсационды қосымша жылдамдық белгіленетін әріппен белгіленеді бірақ штрих қойылады.

Бойлық бағыттағы пульсационды құраушы төмендегі теңдеумен сипатталады.

$$u_x' = u_x - \overline{u_x} . \quad (4.24)$$

Турбулентті ағын кезінде лездік жылдамдық орнына орташаландырылған жылдамдықты қарастыруға болады. Тек орташаландырылған жылдамдықты негізге ала отырып, орнатылған турбулентті қозғалыс туралы айтуға болады.

*Турбуленттік ағын кезіндегі орташаландырылған қозғалыс теңдеуі (Рейнольдс теңдеуі)* келесідей:

$$\overline{u_x} = \frac{1}{T} \int_0^T u_x dt , \quad (4.25)$$

мұндағы

$T$  - бақылау периоды.

Сонымен қатар жылдамдықтың басқа компоненттері  $u_y$  және  $u_z$  орташаландыруға болады және уақытқа байланысты жылдам өзгеретін шамаларды, мысалы  $u_x$  және  $u_y$  жылдамдықтарының туындысын, қысымды жіне т.б.

Әдетте нақты емес орташаландырылған жылдамдық, сонымен қатар орташаландырылған жылдамдық өрісі қарастырылады.

#### **4.6 Гидромеханикалық процесстерді модельдеу және ұқсастықтар**

*Ұқсастық теориясы және модельдеу* – әрбір зерттелетін процесс үшін жалпылама өзгеріс сипаттамаларын зерртеу. Жалпылама өзгерістер.

Модельдеудің негізгі міндеті модельдік зерттеулер негізінде натурлы шарттардағы зерттелетін құбылыс немесс процесстердің ағуы жөнінде негізгі мәліметтерді алып, оларды біріктіру.

Гидрогазодинамикалық модельдеу негізінде салыстырылатын ағыстардың ұқсастықтарын елестетуге болады.

Егер біреуінің сипаттамасы бойынша ұқсастық коэффициенті (*ұқсастық критерийі*) деп аталатын кейбір тұрақты коэффициенттерді модельдік сипаттамаға көбейту арқылы басқаларын анықтауға болса онда екі ағыс ұқсас болып есептеледі.

Сұйық және газ механикасында ұқсастықтарды *геометриялық, кинематикалық және динамикалық* деп бөледі .

Егер ұқсас дене бөліктері пропорционалды және ұқсас бөліктер өзара тең болса онда екі дене геометриялық ұқсас .

Егер жылдамдық ұқсастық нүктелерде пропорционалды және жылдамдық векторының бұрыштары барлық нүктелерде бірдей болса *кинематикалық ұқсас* болады .

Динамикалық ұқсастық үшін ұқсас элементтерге және күш векторына сәйкес келетін бұрыштар теңдігіне әсер ететін күштердің пропорционалдығы қажет.

Соған сәйкес механикалық және физикалық ұқсастықтар туралы сөз болатын болса, зерттелетін нысанның геометриялық ұқсастығы, күштің және жылдамдық өрістерінің ұқсастығы есепке алынады.

Модельденетін ағыс немесе құбылыстарды ұқсастықпен қамтамасыз ету үшін кейбір өлшемсіз комплекстарды теңестіру қажет (ұқсастық критерийлерін).

4.1 кестеде ағынның физикалық параметрлері және сәйкесінше ұқсастық критерийлері. I индексмен натурлы ағынның параметрлері, ал II индексмен – модельді ағынның параметрлері белгіленген. Тәуелсіз ретінде  $K_L$  моделінің геометриялық масштабы және температура масштабы  $K_T$  алынған .

Кесте 4.1 – Ағынның физикалық қасиеттері және ұқсастық коэффициенті

Өлшемдер	Белгіленуі	Өлшем бірліктер	Ұқсастық коэффициенті
Уақыт	$t$	с	$K_t$
Сызықтық өлшем	$L$	м	$K_L = \frac{L_I}{L_{II}}$
Температура	$T$	К	$K_T = \frac{T_I}{T_{II}}$
Жылдамдық	$c$	м/сағ	$K_c = \frac{c_I}{c_{II}} = \sqrt{K_T}$
Қысым	$P$	Мпа	$K_P = \frac{P_I}{P_{II}} = \frac{K_T}{K_L}$
Тығыздық	$\rho$	$\frac{Н \cdot с^2}{м^4}$	$K_\rho = \frac{\rho_I}{\rho_{II}} = \frac{1}{K_L}$
Тұтқырлық	$\mu$	$\frac{Н \cdot с}{м^2}$	$K_\mu = \frac{\mu_I}{\mu_{II}} = \frac{1}{\sqrt{K_T}}$

4.2 кестеде динамикалық ұқсастық критерийлері берілген. Сонымен қатар критерия ескеретін физикалық фактор және оның физикалық мағынасы берілген.

Кесте 4.2 Динамикалық ұқсастық критерийі

Өлшемсіз критерий	Критериймен есептелетін физикалық фактор	Физикалық құбылыстардың интенсивтілігінің шамасы ретіндегі критерийдің физикалық мағынасы	Процесс уақытындағы ұқсастық коэффициенті процессі	Күштің ұқсастық коэффициенті
Рейнольдс саны $Re = \frac{c_0 L}{\nu}$	Үйкеліс (тұтқырлық)	Тұтқырлық күшіне инерция күшінің қатынасы шамасы	$K_t = \frac{K_\rho K_L^2}{K_\mu} = \frac{K_L}{K_\mu}$	$K_P = K_\mu^2 K_\rho = \frac{K_\rho}{K_T}$
Фруда саны $Fr = \frac{c_0}{\sqrt{gL}}$	Масса (ауырлық)	Ауырлық күшіне инерция күшінің қатынасы шамасы	$K_t = \sqrt{\frac{K_L}{K_g}}$	$K_P = K_\gamma K_L^3 \approx K_L^2 K_g$

Вебер саны $We = \frac{\rho c_0^2 L}{\sigma}$	Беттік керілу	Капиллярлы күштерге инерция күшінің қатынасы шамасы	$K_t = K_L^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{K_\rho}{K_\sigma}} = \frac{K_L}{\sqrt{K_\sigma}}$	$K_p = K_\sigma K_L$
Маха саны $M = \frac{c_0}{a_0}$	Сығылғыштық	Қысым күштеріне инерция күшінің қатынасы шамасы	$K_t = \frac{K_L}{K_a} = \frac{K_L}{\sqrt{K_T}}$	--
Турбуленттілік дәрежесі $E_0 = \frac{\sqrt{c}}{c}$	Турбуленттік үйкеліс $\tau$ (турбулентті тұтқырлық)	Инерция күштеріне турбулентті үйкеліс күштерінің қатынасы шамасы	$K_t = \frac{K_L}{K_c}$	--
Струхалы саны $Sh = \frac{c\tau}{L}$	Стационарлық емес	Стационарлы қозғалыс кезіндегі инерция күштерінің стационарлық емес қозғалыс кезіндегі инерция күштеріне қатынасы шамасы	$K_t = \frac{K_L}{K_c} = \frac{K_L}{\sqrt{K_T}}$	--
Коши саны $C = \frac{\rho c^2}{E}$	Ағатын денелердің серпімділігі	Ағынның аэродинамикалық күштерінің серпімділік күшіне қатынасы шамасы.	$K_t = \sqrt{\frac{K_\rho K_L^2}{K_E}}$	--

### Бақылау сұрақтары мен тапсырмалар

1. Элементар бөлшектің үзіліссіздік теңдеуі қандай?
2. Ағынның үзіліссіздік теңдеуі және оның мәні ?
3. Энергия дегеніміз не?
4. Кез келген заттың механикалық энергиясы қандай шамалармен сипатталады ?
5. Потенциалдық және кинетикалық энергиялардың арасындағы айырмашылықтың мәні неде ?
6. Элементар бөлшектің толық механикалық энергиясы қалай анықталады?
7. Бөлшектің меншікті энергиясын қалай анықтаймыз?
8. Ағынның толық энергиясы неге тең?
9. Меншікті потенциалдық және меншікті кинетикалық энергияларды қалай анықтауға болады ?
10. Ағынның толық меншікті энергиясы неге тең?
11. Кариолис коэффициенті нені есептейді ?
12. Сұйықтың реалды ағыны үшін Бернулли теңдеуі қандай болады ?
13. Бернулли теңдеуінің энергетикалық мағынасы ?
14. Гидродинамикалық напор дегеніміз не?
15. Вентури су өлшегіші үшін Бернулли теңдеуі қалай қолданылады?

16. Су ағынды насос мысалы негізінде Бернулли теңдеуін практикалық қолдану.
17. Пито трубкасы
18. Идеал сұйықтың қозғалысы кезінде дифференциалды теңдеу қандай болады?
19. Бірқалыпты ағыс және тегіс қозғалыс үшін Эйлер теңдеуі қандай болады?
20. Тұтқыр сұйық үшін дифференциалды қозғалыс теңдеуі қандай болады?
21. Турбуленттік қозғалыстың негізгі сипаттамалары қандай?
22. Лездік жергілікті жылдамдық түсінігіне анықтама бер.
23. Жылдамдықтың пульсациясы дегеніміз не ?
24. Орташаландырылған жылдамдық және пульсациялық жылдамдық құраушысы дегеніміз не?
25. Ұқсастық теориясы және модельдеу нені оқытады және модельдеудің басты міндеті не ?
26. Қандай ағыстар ұқсас болады?
27. Геометриялық, кинематикалық және динамикалық ұқсастықтарға анықтама бер.
28. Ұқсастық критерийі дегеніміз не және олар не үшін қажет?
29. Динамикалық ұқсастықтың қандай критерийлерін білесіз?
30. Сіз білетін динамикалық ұқсастық критерийлері қандай физикалық факторларды ескереді?

## 5 Құбырлардағы сұйық қозғалысы

### 5.1 Құбырлардың гидравликалық кедергісі

Құбырлардың гидравликалық кедергісі ағын шығындарына алып келеді. Бұл шығындар екі кедергімен анықталады:

а) ұзындығы бойынша кедергі үйкеліс күшімен шарталған.

Ұзындығы бойынша кедергіні жалпы гидравликалық шығын формуласымен анықтауға болады

$$h_l = \xi_{mp} \frac{v^2}{2g}, \quad (5.1)$$

мұнда

$\xi_{mp}$  - құбыр бойымен сұйық қозғалысының кедергі коэффициенті.

Мұндай энергия шығын түрі тік құбырлы қималарда болады, яғни сұйықтың қозғалысы бірқалыпты болған кезде және ұзындығы бойынша пропорционалды өседі  $l$ .

Құбыр бойымен сұйық қозғалысының кедергі коэффициенті мына формуламен анықталады:

$$\xi_{mp} = \lambda \frac{l}{d}, \quad (5.2)$$

мұндағы

$l$  - Құбыр ұзындығы, м;

$d$  - құбыр диаметрі, м;

$\lambda$  - Гидравликалық үйкеліс коэффициенті.

Ұзындығы бойынша ағын шығының Дарси Вейсбах формуласы арқылы анықтауға болады:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}. \quad (5.3)$$

Өлшемсіз гидравликалық үйкеліс коэффициенті берілген формула арқылы анықталады:

$$\lambda = \frac{8\tau}{\rho v^2}. \quad (5.4)$$

мұнда

$\tau$  - Жанама кернеу.

Ағынның орташа жылдамдығымен есептегенде құбыр бетіндегі үйкеліс кернеуінің динамикалық қысымға пропорционалды қатынасы гидравликалық үйкеліс коэффициент шамасын береді.

Б) жергілікті кедергілер ағын қимасының өлшемі мен жергілікті құрылыс өзгерістерімен шартталған, яғни жергілікті кедергілер арқылы ағын деформациясы. Мысалы ілмектер, бұрмалар, тетіктер және басқа қондырғылар құбырда қондырылатын.

Жергілікті ағын шығыны ағын ұзындығын байланысты емес, Вейсбах формуласы арқылы анықталады.

$$h_m = \xi \frac{v^2}{2g}, \quad (5.5)$$

мұнда

$\xi$  - жергілікті үйкеліс коэффициенті;

$v$  - құбырдағы сұйық қозғалысының қима бойымен орташа жылдамдығы.

Әрбір жергілікті кедергі коэффициент өзіндік белгісімен сипатталады  $\xi$ . Құбырдағы сұйық қозғалысының қима бойымен орташа жылдамдығы  $v$  жергілікті кедергіге дейін алынады немесе кейін бұл жерде коэффициент  $\xi$  бірдей мәнге ие болады.

Есептеуге көбінесе үлкен жылдамдықты  $v$  алады, яғни құбырдың кіші диаметрлі бөлігін.

Жалпы ағын шығыны ұзындық бойымен шығын және жергілікті шығын суммасына тең.

$$h_w = h_l + h_m. \quad (5.6)$$

Егерде құбырда бірнеше жергілікті кедергі болатын болса, онда жалпы шығын келесі формуламен анықталады

$$h_w = h_l + \sum h_m = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} + \sum \xi \frac{v^2}{2g}. \quad (5.7)$$

## 5.2 Ағыстың кенеттен ұлғаю мен тарылу кезіндегі ағын шығыны

Қарапайым жергілікті гидравликалық кедергіні і топқа бөлуге болады:

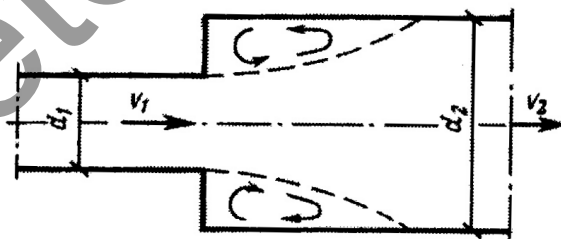
- а) ұлғаю;
- б) тарылу ;
- в) арна бұрылуы

*Кенеттен ағыстың ұлғаюы*

Бұл жағдай практикада көп кездеседі, құбыр кенеттен диаметр  $d_1$  ден  $d_2$  диаметріне дейін ұлғаяды. (сурет 5.1).

Жіңішке құбырдан ағатын сұйық ағысының осындай ұлғаюы, кең құбырдың қимасын бірден толтырмайды ол қабырғадан бөлініп алға қарай ұлғаймалы ағын ретінде қозғалады

Сақиналы кеңістікте ағынша мен құбыр қабырғасы арасында құйын түзіледі. Бұл жерде бөлшектердің үзіліссіз ауысуы негізгі ағынмен құйын бөлігінде байқалады, сол себептен механикалық энергия жылулық энергияға ауысады.



5.1 – сурет. Кенеттен құбыр ұлғаюы

Ағыстың кенеттен ұлғаю кезінде ағын шығыны Бернулли және импульс теоремасы теңдіктерінен анықталған Бордо формуласы арқылы анықталады:

$$h_m = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}. \quad (5.8)$$

5.8 теңдеу Кенеттен ұлғаю кезінде ағын шығыны лезде ағынның жоғалған жылдымдығына тең бұл Бордо теоремасын сипаттайды.

Бордо формуласын Вейсбах формуласына түрлендіруге болады:

$$h_m = \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right)^2 \cdot \frac{v_1^2}{2g} = \xi_1 \frac{v_1^2}{2g}, \quad (5.9)$$

$$\xi_1 = \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right)^2 = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^2. \quad (5.10)$$

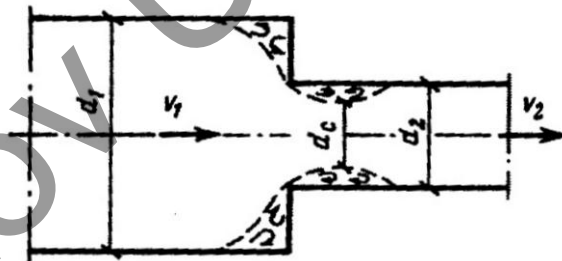
Егер жергілікті кедергі коэффициенті кең құбыр жылдамдығына сәйкестендірсе

$$h_m = \xi_2 \frac{v_2^2}{2g}, \quad (5.11)$$

$$\xi_2 = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2 = \left(\frac{d_2^2}{d_1^2} - 1\right)^2. \quad (5.12)$$

Ағынның кенеттен тарылуы:

Сұйық кенеттен тарылуы кіре беріс бұрыш ағынында жазық қимасына тарылады  $\omega_c$  (сурет 5.2). Бұл жағдайда тарылу бөлігінде құйынды сақиналы зона пайда болады.



5.2 – сурет. Кенеттен құбыр тарылуы

Кенеттен тарылу кезінде ағын шығыны  $\omega_c$  тен  $\omega_2$  дейінгі ұлғаю бөлігінде болады ұлғаю бөлігінде қима ағысының ұлғаюымен байланысқан (тарылу бөлігіндегі шығын есепке алынбайды).

$$h = \frac{(v_c - v_2)^2}{2g}, \quad (5.13)$$

$$h = \left(\frac{\omega_2}{\omega_3 \varepsilon} - 1\right)^2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} = \xi \frac{v_2^2}{2g}. \quad (5.14)$$

Жергілікті кедергі коэффициенті мына формуламен анықталады.

$$\xi = \left(\frac{\omega_2}{\omega_c} - 1\right)^2 = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)^2, \quad (5.15)$$

мұнда

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega_2} - \text{тарылу коэффициент.}$$

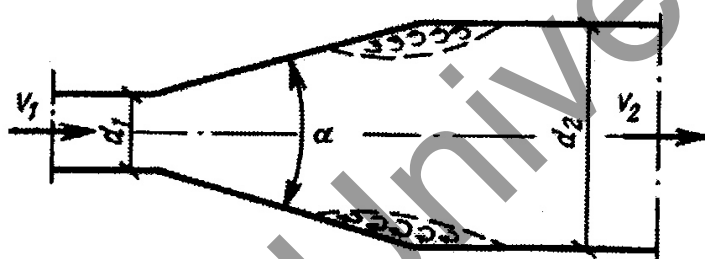
Кенеттен ұлғаюға қарағанда кенеттен тарылу кезіндегі энергия шығыны аз болады.

### 5.3 Ағыстың біртіндеп ұлғаюы мен тарылу кезіндегі ағын шығыны

*Біртіндеп ағын ұлғаюы.*

Егер ағын ұлғаюы біртіндеп болатын болса онда ағын шығынын төмендейді. Осындай ұлғаю диффузор да болады

Диффузор-құбырдың ұлғаюы



5.3 – сурет. Диффузор

Диффузорда сұйық қозғалысы кезінде ағын жылдамдығы біртіндеп азаяды, а қысым жоғарлайды.

Кинетикалық энергия бөлшектері сұйықтан қозғалатын диффузор, осьтік қабырғаға жүрген. Сұйық қабаты қабырғада кішігірім кинетикалық энергиясымен ұлғайып келе жатқан қысымды жеңе алмайды, сондықтан кері қозғала бастайды. Негізгі ағынның кері ағынмен араласу кезінде ағын қабырғадан және құйын түзілуден үзіледі.

Диффузор  $\alpha$  бұрышы үлкен болған сайын, құйын түзілу көп болады және ағын шығыны да көп болады.

Диффузор екі параметрмен анықталады:  $\alpha$  конустық бұрышпен және ұлғаю шамасы  $n$ .

Диффузордың ұлғаю шамасы мына формуламен анықталады:

$$n = \frac{\omega_2}{\omega_1}. \quad (5.16)$$

Диффузор ағын шығыны мына формуламен анықталады:

$$h_{\text{диф}} = h_{\text{расш}} + h_l, \quad (5.17)$$

мұндағы

$h_{раси}$  - Ұлағаю шығыны;

$h_l$  - Ұзына бойы үйкеліс бойынша шығыны.

Ұлағаю үшін кеткен ағын шығыны мына формуламен анықталады:

$$h_{раси} = K_{см} \frac{(v_2 - v_1)^2}{2g}, \quad (5.18)$$

мұнда

$K_{см}$  -  $\alpha$  диффузор конустық бұрышына тәуелді соққыны жұмсарту коэффициенті  $\alpha < 20^\circ$ ,  $K_{см} \approx \sin \alpha$ , а при  $\alpha > 60^\circ$   $K_{см} = 1$ .

Жергілікті ұлағаю коэффициентін мына формула арқылы анықталады:

$$\xi_{diff} = K_{см} \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2. \quad (5.19)$$

Ұзына бойы үйкеліске кеткен ағын шығыны:

$$h_l = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha}{2}} \cdot \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \cdot \frac{v_1^2}{2g}. \quad (5.20)$$

Диффузор үшін суммалық жергілікті кедергі коэффициенті келесі формуламен анықталады:

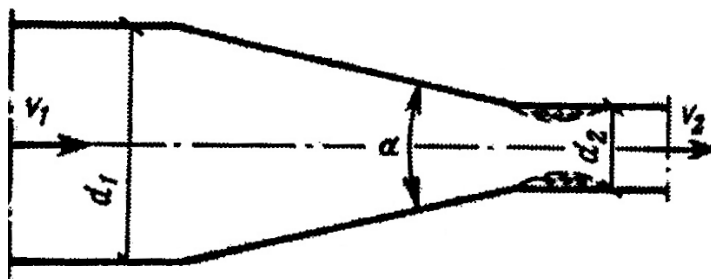
$$\xi_{diff} = K_{см} \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 + \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha}{2}} \cdot \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2. \quad (5.21)$$

ең аз ағын шығыны диффузорда ұлағаю бұрышы  $5-10^\circ$  аралығында байқалады.

Біртіндеп ағын тарылуы:

Біртіндеп құбыр тарылуы конфузор деп аталады

Сұйық қозғалысы кезінде конфузорда ағын жылдамдығы құбыр бойында ұлғаяды, а қысым төмендейді



5.4 – сурет. Конфузор

Сұйық жоғары қысымнан төменгі қысымға қозғалса, онда ағынның қабырғадан және құйын түзілуден үзілуі конфузор шыға берісінде конустық және цилиндрлік қосылуларда болуы керек.

Сондықтан бірдей гидравликалық сипаттамада және өлшемдерде кедергі конфузорда диффузорға қарағанда аз.

Конфузорда ағын шығыны мына формуламен анықталады:

$$h_{\text{конф}} = h_{\text{суж}} + h_1, \quad (5.22)$$

мұнда

$h_{\text{суж}}$  - тарылуға шығын;

$h_1$  - Ұзына бойы үйкеліс бойынша шығын.

Тарылуға ағын шығыны  $\alpha > 60^\circ$  болған жағдайда байқалады және келесі формуламен анықталады:

$$h_{\text{суж}} = \xi_{\text{суж}} \frac{v_2^2}{2g}, \quad (5.23)$$

мұнда

$\xi_{\text{суж}}$  - Жергілікті тарылу коэффициенті.

Жергілікті тарылу коэффициенті мына формуламен анықталады:

$$\xi_{\text{суж}} = K_{\text{суж}} \left( \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (5.24)$$

мұнда

$\varepsilon$  - Сығылу коэффициенті;

$K_{\text{суж}}$  -  $\alpha$  Конустың бұрышыны тәуелді сығылу коэффициенті.

Ұзына бойы ағын шығыны мына формула арқылы анықталады.

$$h_1 = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha}{2}} \cdot \left( 1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \cdot \frac{v_2^2}{2g}. \quad (5.25)$$

#### **5.4 Дөңгелек құбырдағы сұйықтың ламинарлы қозғалысы**

Ламинарлық режимде сұйықтың қозғалысы араласпайтын қабатшылы болғандықтан, сұйық ағысы құбыр осіне параллель және көлденең жылдамдық болмайды. Ламинарлық режимде сұйық қозғалысы механизмін қабатшалар диаметрі әртүрлі қозғалмалы цилиндр ретінде елестетуге болады. Кіре берістен алыстаған сайын, сұйықтың қабырғаға жанасып тұрған жерінде сұйық тежеле бастайды.

Практика жүзінде құбыр бойымен қозғалыс кезінде ламинарлы режиммен көбінесе жоғары тұтқырлы сұйықтар кездеседі (мұнай,керосин,майлар).

Негізгі біртекті сұйық қозғалысының теңдеуіне сәйкес, үйкеліс күшінің кернеуін құбырдың көлденең қима бойымен бөлінуі мына формуламен анықталады.

$$\tau = \gamma Ri , \tag{5.26}$$

мұндағы

$i$  - Гидравликалық бұрылыс;

$R$  - Ағын қимасының гидравликалық радиусы;

$\gamma$  - Сұйықтың шартты салмағы;

$\tau$  - Жанама кернеу.

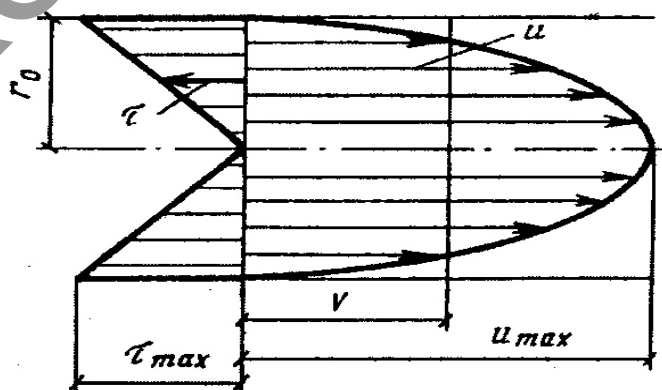
Құбыр бойымен қозғалыс кезінде гидравликалық радиус құбырдың жарты радиусына тең болады  $R = r/2$ , ал жанама кернеу мына формуламен анықталады:

$$\tau = \frac{\gamma i r}{2} . \tag{5.27}$$

5.27 теңдеуде құбырдың радиусына байланысты тұрақты  $\gamma, i$  шамаларында үйкеліс күші кернеуі өзгереді. Құбыр осінде  $r=0 \tau=0$ , ал қабырға жағында  $r=r_0$  жанама кернеу максималды шамасына жетеді.

$$\tau_{\max} = \frac{\gamma i r_0}{2} . \tag{5.28}$$

Құбыр қабырғасына жанасып тұрған қабаттағы жылдамдық молекулалық өзара күштердің болуына байланысты нольге тең, ал құбыр осінде максимал мәнге ие (сурет 5.5).



5.5 – сурет. Ламинарлы режимде жанама кернеу мен жылдамдықтың құбырдың ағын қимасында таралуы.

Сұйық бөлшектерінің қозғалыс жылдамдығы құбырдың көлденең қима бойымен құбыр осьнен нүкте қашықтығына байланысты жылдамдықтың өзгеруі заңдылығымен анықталады. ( Стокс заңы)

$$u = \frac{\gamma_i}{4\mu}(r_0^2 - r^2), \quad (5.29)$$

мұнда

$\mu$  - Сұйықтың динамикалық тұтқырлығы.

Құбыр қабырғасы  $r = r_0$   $u = 0$ , болғанда құбыр осьнде жылдамдық максималды болады.

$$u_{\max} = \frac{\gamma_i}{4\mu} r_0^2. \quad (5.30)$$

Құбырдың бойындағы көлемдік сұйық шығыны.

$$V = \pi r_0^2 \frac{h}{2}, \quad (5.31)$$

мұнда

$h = u_{\max}$  параболоид биіктігі.

Қима бойынша орташа жылдамдығы:

$$v = \frac{Q}{\pi r_0^2} = \frac{\gamma_i}{8\mu} r_0^2, \quad (5.32)$$

мұнда

$Q$  - шығын.

Құбырда сұйықтың ламинарлық қозғалысының орташа жылдамдығы максималды жылдамдықтан екі есе кіші

$$v = 0,5 u_{\max}. \quad (5.33)$$

Дөңгелең құбырларда ламинарлы ағыстың гидравликалық үйкеліс коэффициенті мына формуламен анықталады:

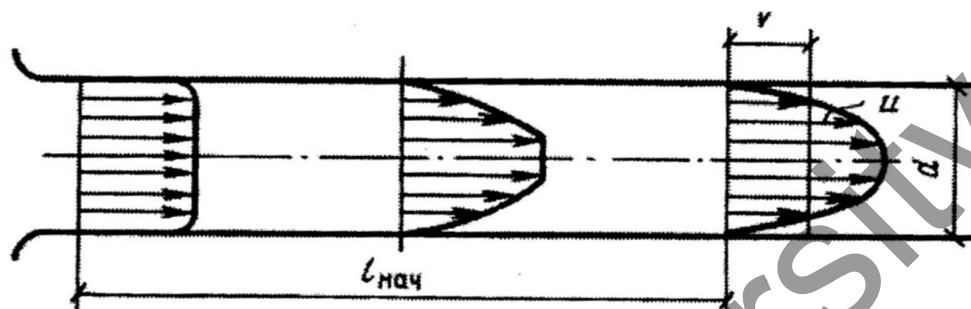
$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (5.34)$$

Дөңгелек құбырларда ламинарды ағыс кезінде ұзына бойы ағын шығыны Пуайзель формуласы арқылы анықталады.

$$h_l = \frac{32\nu l v}{gd^2}. \quad (5.35)$$

Ламинарлы ағыс кезінде ұзына бойы ағын шығыны бірінші сатылы жылдамдыққа тура пропорционалды болып келеді және құбырдың қабырғаларының кедір бұдарлығына тәуелді емес.

Ламинарлы ағыстың құбыр басындағы қозғалысын келесідей қарастыруға болады. Егер сұйық белгілі бір резервуардан тұрақты диаметрлі тік құбырға түсетін болса және ламинарлы ағыспен қозғалатын болса онда кіре беріс көлденең қимасындағы жылдамдықтар бірдей болады.



5.6 - сурет. Ламинарлы ағыстың бастапқы бөлігі

Құбыр қабырғасы жанындағы сұйық қабаттары қабырға бойындағы үйкелістен қозғалысы тежеледі, ал орталық ағын бөлігі, қарқынды қозғалады себебі ағып жатқан сұйық лезде қозғалады. Тежелген сұйық қабаттары біртіндеп ұлғаяды, құбыр радиусына тең болмағанша, яғни қабаттар құбыр осьінде бірігіуіне дейін. Ламинарлы ағынның түзілуі аяқталған соң, ламинарлы режимге сәйкес қисық жылдамдық параболалық формаға ие болады. Ламинарлы режим қозғалысының жылдамдық қалыптасу бөлігін бастапқы бөлік деп атайды.

Бастапқы бөлік ұзындығы келесі формуламен анықталады:

$$l_{нач} = d \cdot 0,029 Re. \quad (5.36)$$

Негізгі бөлігіне қарағанда бастапқы бөлікте кедергі көп, сондықтан құбыр бөлігіндегі ағын шығының мына формуламен анықтайды, ұзындығы  $l < l_{нач}$

$$h_l = K \cdot \frac{64}{Re} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (5.37)$$

мұндағы

$K$  - түзелетін коэффициент, құбыр кіре берісінің шартына Рейнольдс санына басқа факторларға тәуелді.

### 5.5 Дөңгелек құбырда сұйықтың турбулентті қозғалысы

Сұйықтар қозғалысының турбуленттік режимінің ерекшелігі – сұйық бөлшектерінің интенсивті араласуы және жылдамдық пен қысымдарының

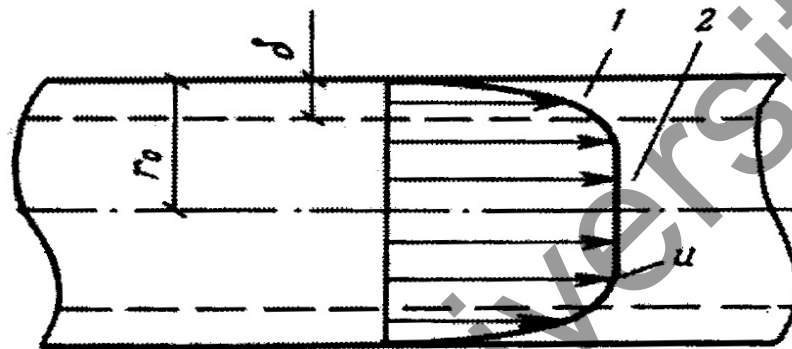
пульсациялануы. Сұйық қозғалысының турбулентті режимінді ағын екіге бөлінеді.

А) Тұтқырлы қабат – қозғалыстың жұқа тұтқырлы ортасы.

Сұйықтың динамикалық тұтқырлығы турбуленттіден көп,  $\mu \gg \varepsilon_m$ , ал тұтқырлы жанама кернеу үйкелісі турбулентті жанама кернеу үйкелісінен біршама үлкен.  $\tau_s \gg \tau_m$ .

Б) Ағынның турбулентті ядросы – тұтқырлыққа тәуелді емес қалған ағын бөлігі, турбулентті қозғалыстың аумағы.

Турбулентті ағын ядросында турбулентті жанама кернеу үйкелісі тұтқырлы жанама кернеу үйкелісінен көп есе үлкен  $\tau_m \gg \tau_s$ .



5.7 - сурет. Сұйықтың құбырдағы тұтқыр қабатты 1 және 2 турбулентті ядро ағынының бөлінуінің шартты сұлбасы

Дөңгелек құбырға тұтқырлы қабаттың қалыңдығы өте кіші және басқа формуламен анықталады.

$$\delta = \frac{30d}{Re\sqrt{\lambda}}, \quad (5.38)$$

мұндағы

$d$  - құбыр диаметрі;

$\lambda$  - гидравликалық үйкеліс коэффициенті.

Ағын жылдамдығы ұлғайған сайын тұтқырлы қабаттың қалыңдығы азаяды, ал  $Re$  үлкен санында мүлдем жоғалады.

Құбыр қабырғаларында кедір бұдырлар бар болған соң, тұтқырлы қабатта құйын түзіледі, олар ядро ағынына еніп біртіндеп бәсеңдейді.

Осы тік бағытта ядролы ағынмен қозғалған сұйық бөлшектері пульсация есебінен көлденең бағытқа ауысады. Сол себептен ядро ағынында сұйықтың араласуы және жылдамдықты түзету болады.

Турбулентті режимде жылдамдықтың таралуы бірдей, ал қабырға жанында жылдамдық өсуі ламинарлы режимге қарағанда үлкен (сурет 5.7).

Турбулентті режимде жылдамдықтың таралуын мына теңдікпен көрсетіледі;

$$u = u_{\max} \left( \frac{y}{r_0} \right)^m, \quad (5.39)$$

мұнда

$u_{\max}$  - максималды құбыр ось бойындағы жылдамдық;

$y$  - құбыр қабырғасынан қашықтық;

$r_0$  - құбырдың ішкі радиусы;

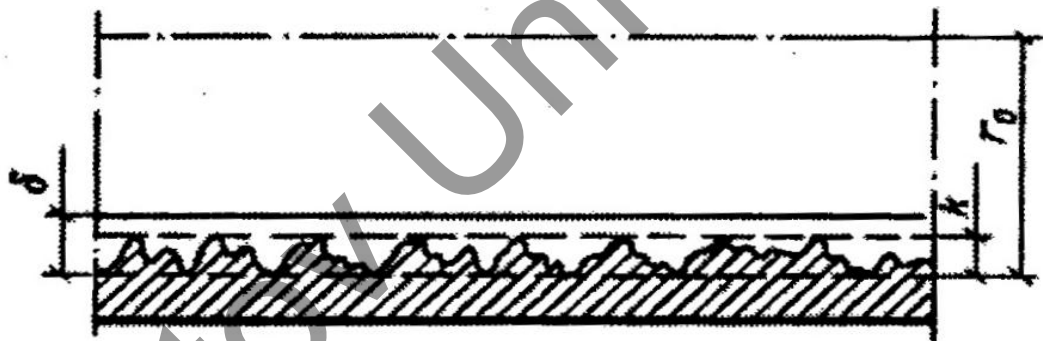
$m$  - дәреже көрсеткіші, кедір бұдыр құбырлар 0,25 және тегіс құбырлар 0,1 үшін.

Ұзына бойы турбулентті режимде ағын шығыны екінші дәрежелі жылдамдыққа пропорционалды

Қабырға кедір бұдырлығы бірнеше фактор бойынша анықталады:

- қабырға материал;
- Құбыр бетінің механикалық өңделу сипаттамасы;
- коррозияның, қорғағыш қабаттың және т.б. құбырда болу және болмауы.

*Абсолютті кедір бұдырлық* - бұл ұзындық бірлігінде өлшенген орташа кедір бұдырлықтың өлшемдері.



5.8 – сурет. Абсолютті кедір бұдырлықты көрсететін сұлба

Егер дөңес жері өлшемі қабат қалыңдығынан кіші болса  $k < \delta$ , онда барлық кедір бұдырлар қабаттың ішінде және ол гидравликалық үйкеліс коэффициентіне әсер етпейді  $\lambda$ . Ағын ядросы кедір бұдырмен емес ад тұтқырлы сұйық қабатымен байланысады. Тегіс құбыр бетімен сияқты қозғалады. Мұндай құбыр гидравликалық тегіс деп аталады және коэффициент  $\lambda$  Re санына тәуелді.

Гидравликалық тегіс құбыр үшін гидравликалық үйкеліс коэффициенті *Блазюса* формуласымен анықталады.

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}. \quad (5.40)$$

Егер дөңес жері өлшемі қабат қалыңдығынан үлкен болса  $k > \delta$ , қабырғаның кедір бұдырлығы турбулентті ағын ядросына түседі, қозғалыстың ретсіздігін ұлғайтады және энергияның ағын шығынына әсер етеді. Мұндай

құбырлар гидраликалық бұдырлау.  $\lambda$  коэффициенті Рейнольдс санына тәуелді және қатыстылық бұдырлығына (шероховатости.)

Бұдырлау құбырлар үшін гидраликалық үйкеліс коэффициенті Шифринсон формуласы арқылы анықталады.

$$\lambda = 0,11\left(\frac{k}{d}\right)^{0,25}. \quad (5.41)$$

*Қатыстылық бұдырлау* – бұл абсолютті бұдырлаудың құбырдың радиусына  $k/r_0$  және диаметріне  $k/d$  қатысы.

Турбулентті режим шартында үш гидраликалық кедергі облыстарын көрсетуге болады:

- а) Гидраликалық тегіс құбыр облысы, мұнда  $\lambda = f(\text{Re})$  ;
- б) квадраттық қа дейінгі облыс, мұнда  $\lambda = f(\text{Re}; k/r_0)$  - өтпелі облыс;
- в) квадраттық (автомодельді) облыс, мұнда  $\lambda = f(k/r_0)$  - бұдырлы құбырлар.

Практика жүзінде қолданылатын құбырлар біртекті бұдырлы болып келеді, сондықтан гидраликалық есептер кезінде бұдырлау эквивалентін қолданылады.

*Бұдырлық эквивалентін  $k_s$*  – бұл бұдырлық бөлік бірдей өлшемді ұнтақтан құрылған, есептегенде берілген бұдырлықпен бірдей шама гидраликалық үйкеліс коэффициентін береді.

### **5.6 Құбырдағы гидраликалық соққы**

*Гидраликалық соққы* – бұл тербелмелі процесс, құбырда кенеттен сұйықтың қозғалыс жылдамдығы өзгергенде тамшылы сұйықпен түзілетін процесс. Бұл процесс аз уақыт аралығында қысымның лезде жоғарлауы мен төмендеуімен сипатталады.

Гидраликалық соққы кезінде құбырда қысымның жоғарлауы мен төмендеуі құбырдағы қозғалыстағы сұйық массасының инерция күшіне байланысты.

Гидраликалық соққы мына себептен пайда болады:

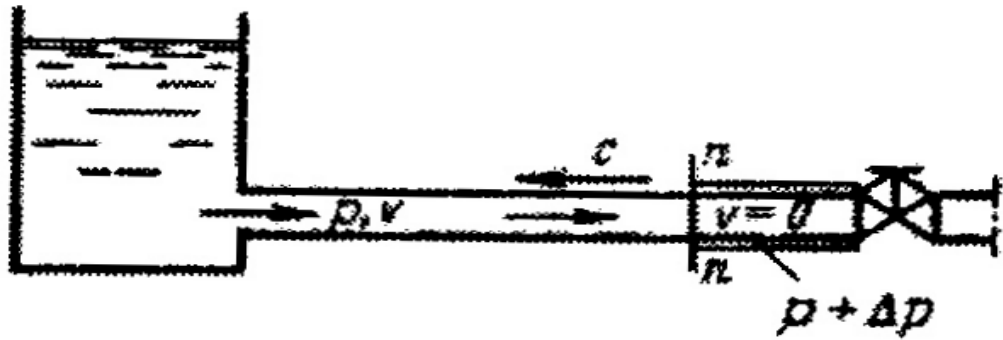
а) жапқышты (задвижка) тез ашу және жабу немесе ағынды басқару басқа қондырғымен.

б) кенеттен шығыр мен сорғының тоқтатылуы.

в) құбырдағы авария (жарылыс)

Құбырдағы гидраликалық соққыны алғашқы зерртеген Н.Е. Жуковский, 1898 жылы теориялық мәлімет беріп есептеу тәсілін ұсынды.

Гидраликалық соққы процессін келесідей көрсетуге болады. Мысалы сұйық жылдамдығы  $v$  құбыр бойымен қозғалып келе жатсын құбыр сонында кенеттен қран жыбылып қалды. (сурет 5.9).



5.9 – сурет. Гидравликалық соққы кезінде толқын соққысы қозғалысы

Сонда кранмен жанасқан сұйық бөлшектері кенеттен тоқтайды. Қозғалыс жылдамдығы жоғалады, ал кинетикалық ағын энергиясы сұйықты сығу және құбыр қабырғасы ұлғаюына әкеледі.

Сұйықты сығу себебінен қысым жоғарлайды  $\Delta p$ . Сол себептен кран жанында (қима  $n-n$ ) соққы толқыны болады, ол қысымы  $p$  және жылдамдығы  $v$  сұйық ағының қысымы  $p + \Delta p$  және  $v = 0$  болытын сұйық ағынынан бөледі.

Соққы толқыны резервуарға жеткен кезде барлық сұйық құбырдағы резервуардан кранға дейін тоқталып және сығылады, яғни бүкіл құбыр бойындағы жылдамдық нольге тең, ал қысым  $p + \Delta p$ .

Соққы толқынының таралуының жылдамдығын мына формула арқылы анықталады.

$$c = \frac{l}{\Delta t}, \quad (5.42)$$

мұнда

$l$  - құбыр ұзындығы;

$\Delta t$  -  $n-n$  қима краннан резервуарға дейінгі кеткен уақыт.

Соққы толқыны резервуарға жеткенде бүкіл құбыр бойындағы сұйық қысымы  $\Delta p$  резервуардағы қысымнан жоғары болады, сондықтан сұйық құбырдан резервуарға кіреді.  $n-n$  қимасы кері бағытта қозғала бастайды кранға сол жылдамдықпен  $c$ , өзінен соң қысым  $p$  және жылдамдық  $v$  резервуарға бағытталған. Алдыңғы жағында қысымы  $p + \Delta p$  және жылдамдығы  $v = 0$ .

Соққы толқыны кранға жеткенде, сұйық ұлғая бастайды, ал құбыр қабырғалары сығылады. Кранда кері соққы толқыны туады, өзінен кейін қысым  $p - \Delta p$  және жылдамдығы  $v = 0$  қалдырып краннан резервуарға жылдамдығы  $c$  пен таралады.

Резервуарға соққы толқыны келген соң қайтадан сұйықтың кранға қозғалуы басталады, үйкеліске кеткен энергия шығыны және құбыр қабырғаларының деформация тербелістері бәсеңдегенге дейін жалғаса берді.

Гидравликалық соққы кезінде құбырда қысымның жоғарлауы Н.Е. Жуковский формуласымен анықталады.

$$\Delta p = \rho c v = \rho v \frac{1}{\sqrt{\rho \left( \frac{1}{E_0} + \frac{d}{E \delta} \right)}}, \quad (5.43)$$

мұндағы

$c$  - соққы толқынының таралу жылдамдығы;

$\rho$  - сұйық тығыздығы;

$v$  - құбырдағы сұйық қозғалысының жылдамдығы

$E_0$  - сұйық серпімділігі модулі;

$E$  - құбыр қабырғасы материалының серпімділік модулі;

$\rho$  - сұйық тығыздығы;

$d$  - құбырдың ішкі диаметрі;

$\delta$  - құбыр қабырғасының қалыңдығы.

Жуковский формуласына сәйкес соққы қысымы өлшемі құбырдағы бастапқы су қозғалысының жылдамдығына және соққы толқынының таралу жылдамдығына тәуелді .

Құбыр қабырғалары иілгіш, құбыр диаметрі үлкен, қабырға қалыңдығы аз болған сайын гидравликалық соққы шамасы аз болады.

Жуковский формуласы тура гидравликалық соққыға сәйкес келеді.

Тура гидравликалық соққы – бұл соққы жабылу қондырғысының уақыты гидравликалық соққы фазасынан кіші  $t_{зак} < t = 2l / c$ .

Тура емес гидравликалық соққы – бұл соққы, резервуардан қайтқан соққы толқыны кранның толығымен жабылғанға дейін қайтып келеді  $t_{зак} > t$ .

Тура емес гидравликалық соққы кезінде құбырдағы қысым жоғарлауы келесі формуламен анықталады.

$$\Delta p = \frac{2 \rho l v}{t}, \quad (5.44)$$

мұнда

$t$  - жапқыш қондырғының жабылу уақыты.

Гидравликалық соққы кезінде лезде қысым көтерілуі қауіпті жағдайға әкеледі. Құбыр жарылуы мен байланысулардың бұзылуына алып келуі мүмкін.

Құбырдағы қысымның көтерілуін болдырмау үшін ең тиімді тәсіл тура гидравликалық соққының болуының мүмкіндігін жою.

Мысалы, берілген ұзындық бойынша реттелетін арматураның және ілмектің жабылу және ашылу уақыты ұлғаяды. Құбырларда сұйықтың қозғалыс жылдамдығын төмендету, берілген шығын құбыр диаметрінің ұлғаюына әкеледі.

## Бақылау сұрақтары мен тапсырмалар

1. Ағын шығыны қандай кедергілерден болады?
2. Ұзына бойы кедергісі неден болады?
3. Ұзына бойы кедергісі қай жерде болады?
4. Дарси-Вейсбаха нені тұжырымдайды?
5. Жергілікті кедергілер неден болады?
6. Жергілікті ағын шығыны қай формуламен анықталады?
7. Жалпы ағын шығыны қалай анықталады, егер құбырда бірнеше кедергілер орын алатын болса?
8. Жергілікті кедерг классификациясы
9. Кенеттен ағынның ұлғаю кезінде не болады?
10. Кенеттен ұлғаю кезіндегі ағын шығынын қай формуламен анықтауға болады?
11. Кенеттен ағын тарылуы кезінде не болады?
12. Диффузор дегеніміз не?
13. Сұйық диффузорда қозғалған кезде ағын жылдамдығы және қысым қалай өзгереді?
14. Диффузор қандай параметрмен сипатталады.
15. Қандай диффузордың ұлғаю бұрышында аз шығын байқалады?
16. Конфузор дегеніміз не?
17. Сұйық конфузорда қозғалған кезде ағын жылдамдығы және қысым қалай өзгереді?
18. Диффузор мен конфузорда ағын шығыны қалай анықталады?
19. Практика жүзінде ламинарлы және турбулентті сұйық қозғалысын қайда кездестіруге болады?
20. Ламинарлы қозғалыс кезіндегі жылдамдық таралу графигі нені білдіреді?
21. Дөңгелек құбыр бойымен ламинарлы қозғалыс кезінде ұзына бойы ағын шығының қай формуламен анықтауға болады?
22. Құбырдың бастапқы бөлігінде ламинарлы режимнің дамуы қалай жүреді?
23. Турбулентті қозғалыс режимінде ағын қандай облыстарға бөлінеді?
24. Дөңгелек құбыр бойымен сұйықтың турбулентті қозғалыс жылдамдығының таралу графигі ?
25. Қандай факторларға байланысты құбыр қабырғасының бұдырлығын (шероховатость) анықталады?
26. Қандай құбырлар гидравликалық тегіс және гидравликалық бұдырлы (шероховатый) деп аталады?
27. Турбулентті қозғалыс режимінде гидравликалық кедергіге қандай облыстарды жатқызуға болады?
28. Гидравликалық соққы дегеніміз не және неден болады?
29. Гидравликалық соққы қалай қарқындайды және қандай жағдайға алып келуі мүмкін?

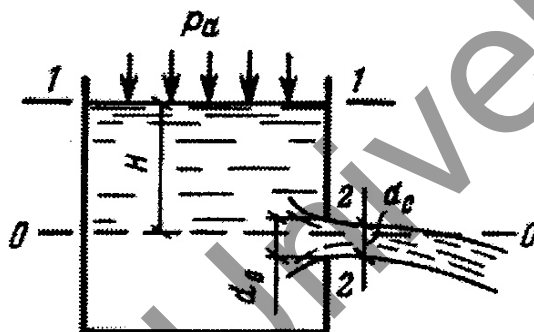
## 6 Сұғындырмадағы (насадок)және саңылаудығы сұйық ағыны

### 6.1 Тұрақты ағыс кезіндегі саңылаудағы сұйықтың ағыны

Қондырғы мен санылаудығы сұйық ағынын зерттеу практикада үлкен мән (мағына) береді, көптеген техникалық есептерде осы зерттеу нәтижесі қолданылады: өтетін сұйықтың мөлшерін есептегенде, резервуарларда (сұйық сақтайтын орын) жылдамдық босатумен қамтамасыздандырғанда, сопла мен форсункада конструирования кезінде және т.б.

Сұғындырмамен әр түрлі формадағы саңылаудан ағатын сұйық шығыны мен жылдамдығын анықтау негізгі сұрақ болып табылады.

**Ашық резервуардағы ағын.** Тұрақты ағыстағы (H) дөңгелек қимасы бар диаметрі  $d_0$  вертикальді жұқа сосуд қабырғасындағы сұйық ағынын қарастырайық(6.1 сурет)



6.1 - сурет. Тұрақты ағыстағы аз су баспаған саңылау жұқа қабырғасы арқылы сұйық ағыны

**Жұқа қабырғадағы саңылау** – бұл саңылау шетінде өткір кромкасы бар яғни сорғылап ағу шартына және қабырға форма қалыңдығына мән бермейді.

Саңылау қажеттілігінше кіші яғни  $d_0 < 0,1H$ . Онда барлық нүкте саңылаулары еркін сұйық бетіндегі бірдей тереңдікте және саңылау нүктелеріндегі қозғалыс жылдамдығы бірдей болады.

Сорғылап ағу қысу деңгейі қысу коэффициентімен анықталынады  $\varepsilon$ .

Қысу коэффициенті мына формуламен анықталынады.

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega_0} = \left( \frac{d_c}{d_0} \right)^2, \quad (6.1)$$

мұндағы

$\omega_c$  - қысу орнындағы сорғылап аққан қиманың көлденең ауданы;

$\omega_0$  - саңылау ауданы.

Коэффициент  $\varepsilon$  қысумен сипатталады. Қысу түрлері:

а) аяқталған (жетілген) және аяқталмаған;

б) толық және толық емес.

Аяқталған (жетілген) сығу – белгілі бір қашықтықта орналасқан резервуар қабатына бағытталған саңылау және саңылаудан шығатын сорғылаудағы сығуға ешқандай мән бермейді.

Аяқталмаған сығу – бұл сығу, қабырға қабаттары ағынмен сипатталады. Бұл жағдайда коэффициент  $\varepsilon$  сығу деңгейіне тәуелді  $n$

$$n = \frac{\omega_0}{\Omega}, \quad (6.2)$$

мұндағы

$\omega_0$  - саңылау ауданы;

$\Omega$  - саңылау алдындағы ағын қима ауданы

Қарапайым жағдайда үлкен резервуарлардағы кішкентай саңылау арқылы толық аяқталған сығу қарастырылады, осы кезде коэффициент  $\varepsilon = 0,61 \dots 0,63$ .

мен 2-2 қима арасындағы ағыс шығыны Вейсбах формуласымен анықталынады

$$h_w = \xi_0 \cdot \frac{v_2^2}{2g}, \quad (6.3)$$

мұнда

$\xi_0$  - қарсыласу коэффициенті.

Саңылаудағы сұйық ағынының жылдамдығы Бернулли теңдігіне сәйкес мына формуламен анықталынады:

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi_0}} \cdot \sqrt{2gH} = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (6.4)$$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi_0}} \text{ - жылдамдық коэффициенті.}$$

Саңылаудан шығатын сұйық көлемінің шығыны мына формуламен анықталынады

$$Q = v_2 \omega_c = \varepsilon \rho \omega_0 \sqrt{2gH} = \mu \omega_0 \sqrt{2gH}, \quad (6.5)$$

мұндағы

$v_2$  - саңылаудағы сұйық ағынының жылдамдығы;

$\omega_c$  - саңылаудығы сорғылап сығу ауданы;

$\mu = \varepsilon \varphi$  - шығын коэффициенті,  $\mu$  әрқашан 1 ден кіші екі фактордың әсерінен: сорғылап сығу мен қарсыласу;

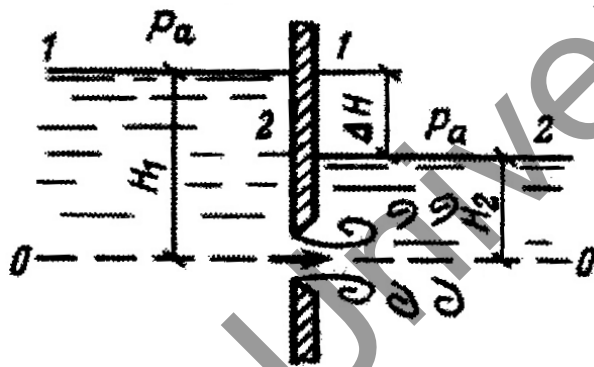
$\varepsilon, \xi_0, \varphi, \mu$  коэффициенттері Рейнольдс саны мен саңылау формасына тәуелді.

**Жабық резервуардағы ағын.** Бос сұйық бетіндегі қысым  $p_1$ , ал ортаның қысымы  $p_2$  болсын, онда жылдамдықпен сұйық шығыны келесі формуламен анықталады:

$$v = \varphi \sqrt{2g \left( H + \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} \right)}, \quad (6.6)$$

$$Q = \mu \omega_0 \sqrt{2g \left( H + \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} \right)} \quad (6.7)$$

**Су басқан саңылау арқылы ағын,** яғни газды ортада емес сол сұйықпен көрші резервуардағы (6.2 сурет)



6.2 сурет – Су басқан саңылау арқылы сұйық ағынының жылдамдығы мен сұйық шығының мына өрнекпен анықтаймыз

$$v = \nu \varphi \sqrt{2g \Delta H}, \quad (6.8)$$

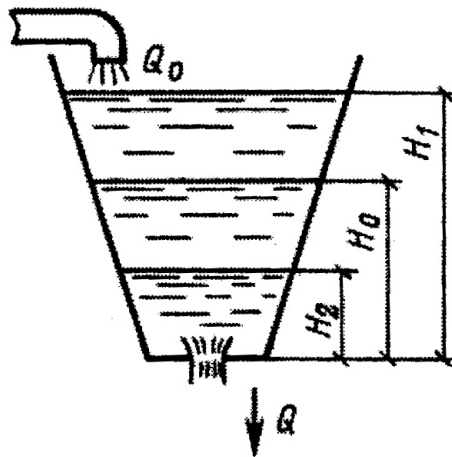
$$Q = \mu \omega_0 \sqrt{2g \Delta H}. \quad (6.9)$$

Жылдамдық пен сұйық ағынының шығыны саңылаудың орналасқан биіктігіне тәуелді емес.

### 6.2 Өзгермелі (ауытқымалы) ағыс кезінде саңылаудан сұйықтың шығуы

Өзгермелі ағыс кезінде саңылаудан сұйықтың ағуы мына жағдайда байқалады. Қоймада сұйықтың деңгейі тұрақты болмайды яғни жоғарлайды және төмендейді.

Мысалы қойманы цистернаны бассейнді және басқа сыйымдылықты босату және толтыру. Мына жағдайды қарастырайық қойма түбінің саңылауынан сұйықтың ағуы мен құйылуы бір уақытта болады.



6.3 - сурет. Тұрақты ағындағы өзгермелі ағыстың қойма (резервуар) түбіндегі саңылауындағы сұйық ағыны

$Q_0$  - жоғарыдан келетін тұрақты сұйықтықтың мөлшері;

$\omega_0$  - қойма (резервуар) түбіндегі саңылау аудыны;

$Q$  - сұйықтың ағатын мөлшері.

Сұйықтың ағатын мөлшер шығыны мына формуламен анықталынады:

$$Q = \mu \omega_0 \sqrt{2g\Delta H_0}, \quad (6.10)$$

Қарқын мына формуламен анықталынады:

$$H_0 = \frac{Q^2}{\mu^2 \omega_0^2 2g}. \quad (6.11)$$

А) егер резервуардағы сұйықтың қарқыны саңылау центрііндегі қарқынынан кіші болса  $H_2 < H_0$  онда ағып келген су көлемінен саңылау шығыны аз болады. Саңылаудың сұйық деңгейін жоғарлауын шығарады және саңылау шығынынан қарқынның жоғарлауына әкеледі.

Б) егер  $H_1 > H_0$ , онда қарқын төмендемегенге  $H_1$  до  $H_0$  дейін, сұйық деңгейі біртіндеп төмендей береді.

Сонымен, егер резервуардағы сұйықтықтың деңгейі, сәйкес қарқыннан айрықша болса, онда ауытқымалы қарқында ағып кетеді, яғни резервуардың толуымен босауы байқалады. Осы кезде ағып жатқан сұйықтың шығыны мен жылдамдығы уақыттың ағымына қарай өзгереді және қозғалысы қалыптаспайды. Бернулли теңдігі орындалмайды.

Егер ағынның қарқынымен жылдамдығы бояу өзгерсе онда қозғалысты әр уақытта оны белгіленген деп қарастыруғы болады және есепті шешіміне Бернулли теңдігін қолдануға болады.

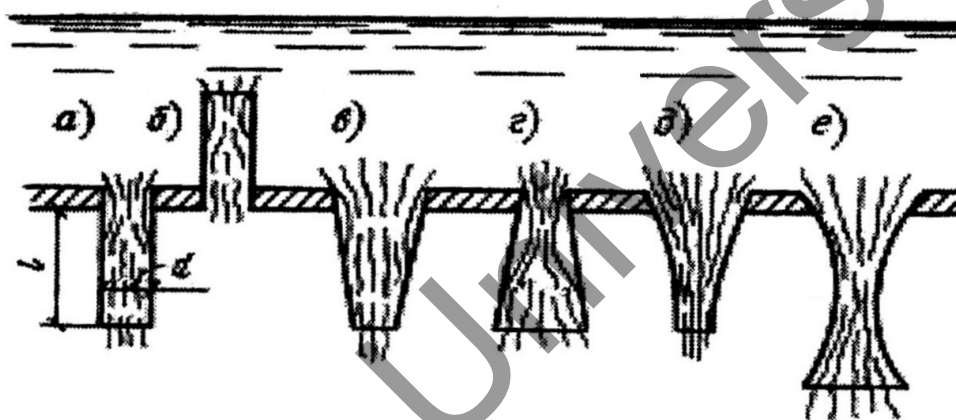
Бұл шартқа резервуар жауапты кесілген аумақ саңылауының біраз артықшылығы бар сол кезде резервуардың өзінде жылу ағысына немқұрайлық қарауға болады.

### 6.3 Сұғындырма(насадок) арқылы сұйықтың ағуы

Сұғындырма(насадок) –бұл қысқа құбыр( $l=3...4d$ ), саңылауға қосылған. Сұғындырмада(насадок) ағып жатқан сұйықтың шығының салыстырмалы саңылаудағы шығынынан көбейту үшін қолданылады және катты алыс қашықтықта қуат алу үшін алынады.

Кең таралған қондырғының түрлерін келесідей ажыратамыз:

- а) сыртқы цилиндрлік– насадок Вентури;
- б) ішкі цилиндрлік – насадок Борда;
- в) конические – сходящийся и расходящийся;
- г) конидальный (криволинейного очертания);
- д) комбинированный (диффузорный).



6.4 - сурет. Әр түрлі формадағы сұғындырма(насадок)

Сыртқы цилиндрлік сұғындырма ұзындығы екіге теңалты диаметрі бар және кіреберіс шеті айналмай орындала береді.

Тәжірибеде бұл сұғындырма мына жағдайда орындалады саңылаудың қалың қабырғасында жасағанда және кіреберіс шеті орындалмағанда.

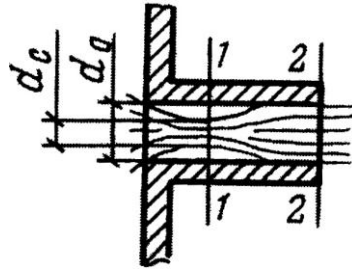
Сыртқы цилиндрлік сұғындырма арқылы сұйықтық аққанда және газдық ортада екі режимнің ағындысында байқалады:

- а) үзіліссіз
- б) үзілмелі

Үзіліссіз режим ағысындағы сұйықтық шашырандысы сұғындырмаға кіргенде қысылады сосын кеңейеді, барлық қима сұғындырманы толтыра (6.5 сурет) бұл сұғындырмада қосу коэффициенті  $\varepsilon=1$ , ал шығын коэффициенті  $\mu = \alpha\rho = \varphi$ .

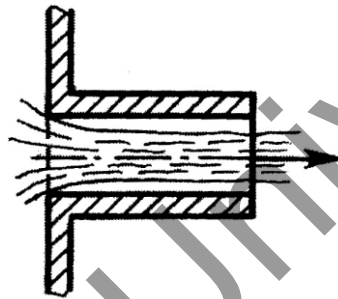
Сұғындырма ішінде кесілген қысу кезінде вакуум және сақиналы құйын аймағы түзілуі. Барлық құйын тәрізді айналмалы қозғалыс сұйықтықтағы ішкі сұғындырмада қосылады және ағынды жылдамдықтың азаюына негізгі себеп болады.

Вакуум арқылы сұғындырмада қосылған ағынды өзіндік сорғы сияқты жұмыс істейді, қосымша сұйықтықты сорады. Сондықтан қысым жоғалту ұлғайғанда саңылау шығынымен салыстырғанда сұйықтық шығыны ұлғаяды.



6.5 - сурет. Сыртқы цилиндрлік сұғындырма арқылы үзіліссіз ағын режимі

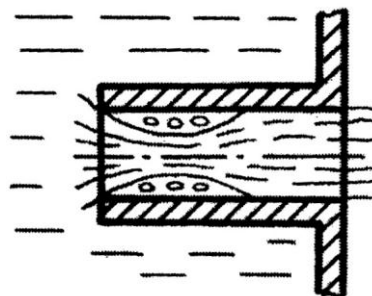
Үзілмелі режим ағуы сұйықтың сыртқы цилиндрлік сұғындырмамен сипатталынады, қысқаннан кейін шашырау кеңейеді цилиндрлік пішінің сақтайды және оның қабырғасына тимей сұғындырманың ішіне орналасады(6.6 сурет)



6.6 - сурет. Сыртқы цилиндрлік сұғындырма арқылы үзілмелі ағын режимі

$l < 2d_0$  болғанда жеткіліксіз сұғындырма ұзындығындағы ағын режимі қарастырылады. Бірақ сұғындырма ұзындығының өсуіне байланысты қарқын жоғалуына әкеледі және  $l > 6d_0$  сұғындырмадағы шығын коэффициенті төмендейді.

Ішкі цилиндрлік сұғындырма (6.7 сурет ) бұлда сыртқы цилиндрлік сұғындырма сияқты жұмыс жасайды. Бірақ шашыранды сұғындырманың кіреберісінде өте көп қысылады. Сондықтан сыртқы цилиндрлік сұғындырмаға карағанда бұл сұғындырмада жылу коэффициентімен шығыны аз болады.



6.7 - сурет. Ішкі цилиндрлік сұғындырма арқылы үзіліссіз ағын режимі

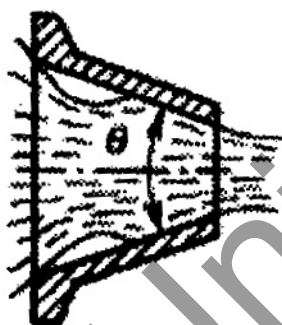
Ішкі цилиндрлік сұғындырма ұзындығының кішкентай болуына байланысты  $l < 1,5d$  үзілмелі режимде ағып өтеді. Ішкі цилиндрлік сұғындырмада үзілмей режимде жұмыс жасауға болмайды, себебі шығыны саңылау шығынынан аз болады.

Ішкі цилиндрлік сұғындырмада үзіліссіз режим жұмысында саңылау шығынымен ұлғаяды, бірақ сыртқы сұғындырмадан аздап төмен.

Ішкі цилиндрлік сұғындырманы тек сыртқы цилиндрлік сұғындырманы белгілі бір себепке байланысты қолдануға болмайтын кезде ғана қолданылады.

Конустық үйлескен сұғындырма 6.8 сурет ішкі цилиндрлікке қарағанда кіреберіске қарағанда кіреберісте шашырандыны аз қысады, бірақ шығатын кезде сыртқы қысылу пайда болады.

Бұл сұғындырма цилиндрлік сұғындырмаға қарағанда қарқын шығыны аз ал ағын жылдамдығы көп.



6.8 - сурет. Конустық үйлескен сұғындырма арқылы ағын

Конустық сұғындырмадан шыққан шашыранды үлкен кинетикалық энергияға және ұзақ қашықтыққа дейін тамшыға айналмай өзінің пішінін сақтай алатын қасиетке ие. Бұл сұғындырманың ағып кету коэффициенті кезінен конустық бұрышына  $\theta$  тәуелді. Конус бұрышының белгілі бір шегіне дейін ұлғайғанда шығын коэффициенті  $\mu$  өседі, ал әрі қарай ұлғая бергенде ол кішіриеді. Конустық қолайлы бұрышы шамамен  $13^\circ$  сәйкес келеді.

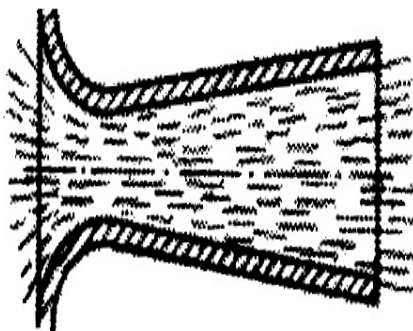
Коноидальный сұғындырма немесе сопло саңылаудан ағатын шамамен табиғи шашыранды қысу арқылы орындалады 6.9 сурет.



6.9 - сурет. Коноидальный сұғындырма ағыны

Бұндай сұғындырманың пішіні шашырандының қысылуын жояды және жоғалған энергияның барлығын минимумға жеткізеді. Коноидальный сұғындырма ағынды үлкен жылдамдықпен және 1,5 есе сұйық шығынын жоғарлатады жұқа қабырғадағы саңылаудың шығынымен салыстырғанда.

Біріктірілген сұғындырма (Вентури құбыры) коноидальдық сұғындырма және диффузордың қиыстыруын көрсетеді.



6.10 - сурет. Біріктірілген сұғындырма ағыны

Коноидальдық сұғындырмаға диффузордың қосылуы сұғындырманың тар қимасында қысымын төмендетеді сәйкесінше сұйық шығынын жоғарлатады.

Диаметрі тар қимада және коноидальды сұғындырмадағы, біріктірілген сұғындырма қарқыны 2,5 есе үлкен шығын өткізе алады коноидальдыққа қарағанда. Бірақ біріктірілген сұғындырмада үлкен емес қарқынды ( $H=1...4м$ ) қолданылады, өйткені сұғындырманың тар жерінде қысым өте төмен. Осы жағдайда қарсыласу тез арада жоғарлап сұғындырманың өткізгіштік қасиеті төмендейді.

### Бақылау сұрақтары мен тапсырмалар

1. Сұғындырмамен саңылаудан ағатын сұйық ағынын зерттеу нәтижелері қандай есептерде қолданылады?
2. Сұғындырмамен саңылаудан ағатын сұйық ағын қандай негізгі параметрлермен анықталынады?
3. Жұқа қабырғадағы саңылау дегеніміз не?
4. Саңылаудағы сұйық ағынының сығу коэффициенті неге тәуелді?
5. Аяқталған және аяқталмаған сығу анықтамаларын айтыңыз?
6. Аяқталмаған сығу кезінде сығу коэффициенті қалай анықталынады?
7. Толық және толық емес сығу анықтамасы?
8. Саңылаудан тұрақты қарқынмен ағатын сұйықтық көлемдік шығын қалай анықталынады?
9. Инверсиялық құйын анықтамасы?
10. Жабық резервуардағы сұйық ағыны мен жылдамдықты қалай анықтаймыз?

11. Саңылаудығы айнымалы қарқын кезіндегі сұйық ағынының шығыны мен жылдамдығын қалай анықтаймыз?
12. Саңылаудағы айнымалы қарқындағы сұйық ағынына мысал келтіріңіз ?
13. Егер резервуардағы сұйық қарқыны саңырау центріндегі сұйық қарқынынан төмен болса және резервуардағы сұйықтың қарқыны центр сұйық қарқынынан жоғары болса шығын қандай ?
14. Сұғындырма дегеніміз не ? Сұғындырма түрлері ?
15. Сыртқы цилиндр сұғындырмадығы үзіліссіз режим мен үзілісті режимнің айырмашылығы?
16. Ішкі және сыртқы цилиндрлік сұғындырма қалай жұмыс істейді?
17. Үзілісті режимде ағын қандай сұғындырмада қолжетімсіз?
18. Конустық үйлескен және тарқалған сұғындырмада сұйық ағыны қалай жүреді?
19. Коноидальный сұғындырманың жұмыс істеу принципі?
20. Вентура құбыры нені көрсетеді?
21. Біріктірілген сұғындырмада қандай қарқын қолдануға болады?
22. Бірлескен сұғындырма қандай қарқында жүзеге асырылады?
23. Табиғи сығылатын құйын пішіні қай сұғындырмада орындылады?
24. Конустық тарқалған сұғындырмақайда және не үшін қолданылады?
25. Конустық үйлескен сұғындырмақайда және не үшін қолданылады?

## **7 Қатты дене мен ағыстың әрекеттесуі**

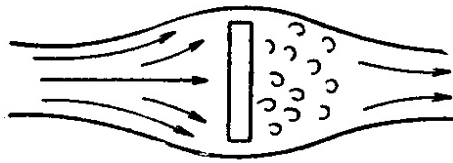
### **7.1 Жалпы мәліметтер**

Қатты денелердің сұйықтықпен ағуы кезінде (қатты денелердің сұйықтықтағы қозғалысы) басты мақсат - сұйықтық пен дененің салыстырмалы қозғалысы кезінде пайда болатын күштерді анықтау болып табылады.

Сұйық ортада қозғалып келе жатқан денеге сұйықтық қарсылық көрсетеді, ал дене жеңу үшін біраз күш жұмсайды. Мысалы, самолёт немесе автокөлік қозғалысы кезінде ауадан қарсы әрекет көреді; қайық немесе су асты кемесі судан қарсы әрекет көреді.

Егер дене тыныштық күйде болса, ал сұйықтық оны айналып ағып өтіп жатса, онда дене сұйықтықтың қозғалысына қарсылық көрсетуде. Ал оны жеңу үшін ағып жатқан сұйықтықтың ағын энергиясының жартысы жұмсалады. Мысалы, ғимаратқа ауаның қысым түсіруі, көпір тіреуішінің сумен ағуы.

Ағын жылдамдығына перпендикуляр орнатылған пластинканы сұйықтық ағынының ағып өтуін қарастырайық (7.1- сурет).



7.1 - сурет. Ағын бағытына перпендикуляр орнатылған пластинаны сұйықтық ағынының ағып өтуі

Сұйықтық ағысы пластинамен кездескенде оның беткі қабатына ағынға қарсы бағытталған қосымша қысым түсіреді. Бұл қысым ағыс бағытының өзгеруімен түсіндіріледі.

Өлшемі бойынша пластинаға әсер ететін қосымша қысым күшіне тең болатын, пластина жақтан сұйықтыққа қарсы күш көрсетіледі.

Пластинадан кейін, ағыстың пластинадан бөлінуі нәтижесінен бейберекет құйынды қозғалыс басталады. Бұл жерде қысым төмендетілген, сондықтан ағынға қарсы бағытталған қосымша қарсыласу күші пайда болады. Қарсыласу күші дененің пішініне тәуелді болғандықтан, оны *пішін қарсыласуы (сопротивление формы)* деп атайды.

Көрсетілген екі қарсыласудың қосындысын *қысымның қарсыласуы* деп атайды.

Егер пластина ағыс бойымен орналастырылса, онда қарсыласу, пластинаның бүйір беттерінде пайда болатын тангенциалды үйкеліс күштерімен туындайды, яғни *үйкеліс қарсыласуымен*.

Сұйықтық пен дененің салыстырмалы қозғалысы кезінде пайда болатын *толық қарсыласу* келесі формула бойынша анықталады:

$$F = F_{\text{давл}} + F_{\text{тр}}, \quad (7.1)$$

мұндағы

$F_{\text{давл}}$  - қысым қарсыласуы;

$F_{\text{тр}}$  - үйкеліс қарсыласуы.

Толық қарсыласу *Ньютон формуласы* бойынша анықталады:

$$F = C \omega \rho \frac{v^2}{2}, \quad (7.2)$$

мұндағы

$C$  - қарсыласу коэффициенті;

$\omega$  - дененің сипаттамалық ауданы;

$\rho$  - сұйықтық тығыздығы;

$v$  - сипаттамалық жылдамдық.

## 7.2 Қысым қарсыласуы

Қысым қарсыласуы келесі формула бойынша анықталады:

$$F_{\text{давл}} = C_o \omega \rho \frac{v^2}{2}, \quad (7.3)$$

мұндағы

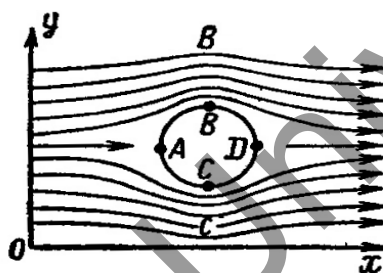
$C_o$  - қысым қарсыласуының коэффициенті;

$\omega$  - дененің миделдік қиылысу ауданы.

Дененің миделдік қиылысуы – қозғалыс бағытына перпендикуляр, дененің жазықтықтағы кескіні.

Дөңгелек цилиндрді тұтқырлығы жоқ сұйықтықтың ағып өтуі.

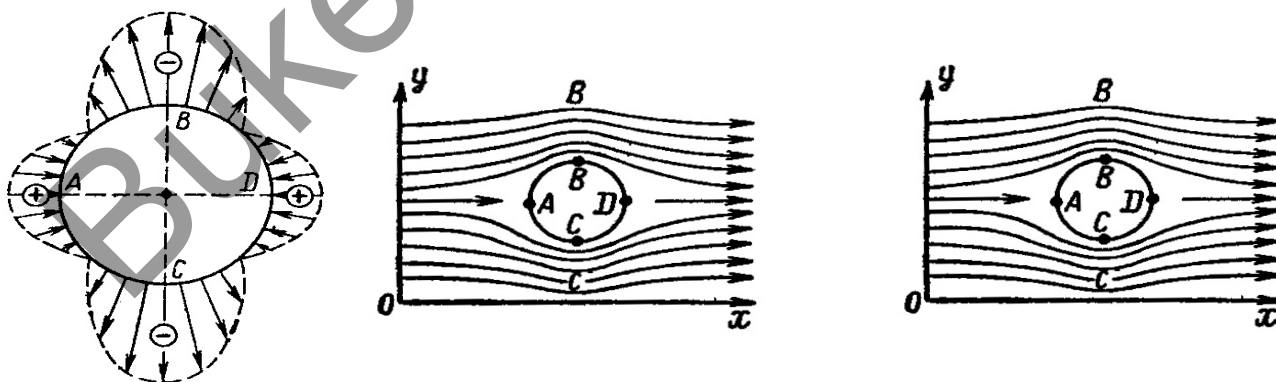
Дөңгелек цилиндрді тұтқырлығы аз сұйықтықтың ағып өтуін қарастырайық (үйкеліссіз). Ағыс суреті симметриялы (7.2 сурет): цилиндрдің бүйір беттерінде ағыс жылдамдатылған болса, тура және артқы беттерінде – баяулатылған.



7.2 - сурет. Цилиндрдің тұтқырлықсыз сұйықтықпен ағуы

$A$  және  $D$  критикалық нүктелерінде ағыс жылдамдығы 0-ге тең, ал қысым барлық нүктелерге бірдей максималды өлшемге тең.

Цилиндр бетіне қысымды тарату 7.3 суретте көрсетілген.



7.3 - сурет. Цилиндрдің тұтқырлығы жоқ сұйықтықпен ағуы кезіндегі қысымның таралуы

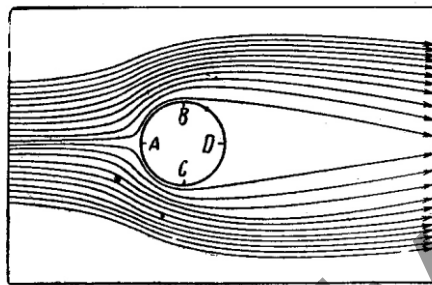
Ағыс екпініндегі қысымға қарағанда сұйықтық қысымы көп жерде, қысым күшін сипаттайтын сызықтар, цилиндр қабырғаларына бағытталады.

Өзара перпендикуляр  $AD$  және  $BC$  жазықтықтары қысым күштерінің симметриялы болғаны үшін олардың равнодействующая нөлге тең. Идеалды сұйықтың бірқалыпты ағыны цилиндрға күштік әсер етпейді, яғни цилиндрдің қарсылығы 0-ге тең.

Шынайы бақыланып отырған құбылыстарға қайшы келетін бұл тұжырым, *Эйлер-Даламбер парадоксы* деп аталады.

*Дөңгелек цилиндрдің тұтқырлығы (вязкость) жоғары сұйықтықпен ағуы*

Цилиндрдің тұтқырлығы жоғары сұйықтықпен ағуы кезінде (7.4 сурет) цилиндрдің беттеріне жанаса қозғалып келе жатқан бөлшектер, үйкеліс күшінің әсерінен кинетикалық энергиясының жартысын жоғалтады.



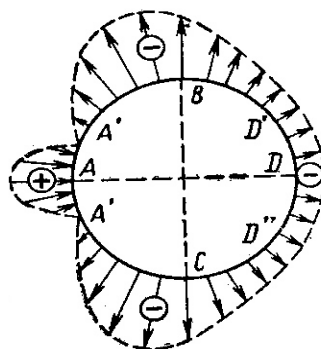
7.4 - сурет. Цилиндрді тұтқырлығы жоғары сұйықтықтың айналып ағуы

Нәтижесінде бұл бөлшектер қысым жоғарылайтын  $BD$  ауданына жете алмайды,  $D$  нүктесіне жетпей тоқтайды. Сондықтан, сыртқы ағыс қысымының әсерінен кері бағытта қозғала бастайды.

Жылдамдықты арттырған кезде қайтарылмалы ағыстың аумағы үлкейді де одан үлкен құйын пайда болады. Ары қарай құйын ағып жатқан денеден бөлініп, ағыс бойымен төмен ағып кетеді. Оның орнына тура солай бөлініп кететін жаңа құйын пайда болады.

Денеден кейін құйындардың пайда болуы цилиндрдің арты жағындағы қысым, бірқалыпты ағыстың қысымымен салыстырғанда күрт төмендеуіне әкеледі.

Тұтқырлығы жоғары сұйықтықпен ағатын цилиндр бетінде қысымның таралуы 7.5 суретте көрсетілген



7.5 - сурет. Тұтқырлығы жоғары сұйықтықпен ағатын қысымның таралуы

Цилиндрдің бүйір бетіндегі қысым идеалды сұйықтықтың қозғалысы кезіндегі пайда болатын қысыммен сәйкес келеді (7.3 сурет). Цилиндрдің артқы бөлігіне жақындауына байланысты цилиндр бетіндегі қысым азаяды, сәйкес жерлерге қарағанда.

Осылайша, цилиндрға дейін және цилиндрдан кейін күштер бір-бірін өтемейді. Қысым күштерінің тең әсерлігі сұйықтықтың ағысына бағытталған, сондықтан өзімен бірге қарсылық күштерін тудырады.

*Өзге пішінді денелердің сұйықтықпен ағуы.*

Бұл жағдайда ағынды дененің пішіні қысымның қарсыласуын және үйлестіру сипатын анықтайды.

Бұл денелер үшін сұйықтық ағысы кезіндегі қысымды үйлестіру Рейнольдс санына тәуелді. Себебі қысымның қарсыласуы ағыстың сипатына байланысты, не  $C_D$  коэффициенті дене пішініне және Рейнольдс санына тәуелді.

Әдетте  $C_D$  коэффициентін денені аэродинамикалық трубада сынау арқылы табады. Рейнольдс саны артқан сайын  $C_D$  коэффициентінің мәні артады және Рейнольдс санының үлкен көрсеткішінде тұрақты өлшемді қабылдайды.

Рейнольдс саны келесі формуламен анықталады:

$$Re = u_\infty \frac{l}{\nu}, \quad (7.4)$$

мұндағы

$u_\infty$  - екпінді ағынның жылдамдығы;

$l$  - өзіндік сызықтың мөлшері (мысалы, шар үшін-оның диаметрі).

*Симметриялы емес денелердің сұйықтықпен ағуы*

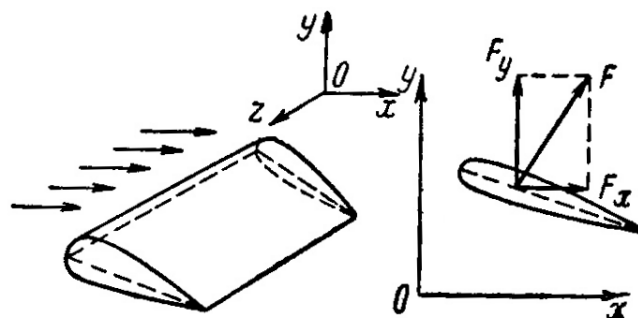
Егер дене симметриялы емес немесе оның симметрия жазықтығы ағысқа қарай көлбеу орналасса (7.6 сурет), онда ағын жақтан денеге әсер ететін қорытқы күш, ағыс бағытымен сәйкес келмейді.

Бұл күшті екі құрамдас бөліктерге бөлуге болады:

а)  $F_x$ , ағыс бойымен бағытталған- *бүйірлік қарсыласу*;

б)  $F_y$ , ағысқа перпендикуляр - *көтергіш күш*.

Ағыс бағыты мен қанат көрінісі арасындағы бұрышты -«шабуыл бұрышы» арттырған кезде, қанаттың сорғыш жағында ағыстың бөлінуі мүмкін, нәтижесінде қарсыласу күрт артып, ал көтергіш күш төмендейді.



7.6 - сурет. Көтергіш күш ұғымының схемасы

### 7.3 Үйкелістің қарсыласуы. Шекаралық қабат

Үйкеліс қарсыласуы мына формуламен анықталады:

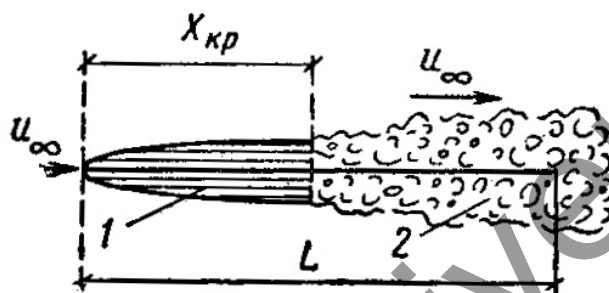
$$F_{mp} = C_F \omega \rho \frac{u_\infty^2}{2}, \quad (7.5)$$

мұндағы

$\omega$  - дененің ағында беті;

$C_F$  - үйкеліс қарсыласуының коэффициенті.

Үйкелістің бұл түрін ағыс бойымен орнатылған пластинаның ағында байқауға болады (7.7 сурет).



7.7 - сурет. Жазық пластина бойлай ағу. 1- ламинарлы шекаралық қабат, 2- турбулентті шекаралық қабат

Үйкелістің қарсыласуы кезінде ағыс бөлінбейді, бірақ пластина бойында сұйықтықтың шекаралық қабаты пайда болады. Көлденең өлшемдері ағыс бойымен төмен қарай жоғарылайды.

*Сұйықтықтың шекаралық қабаты* – Рейнольдстің үлкен санында тұтқырлыққа байланысты, дененің сыртқы бетіне жалғасатын ағыс аумағы.

Шекаралық қабат сыртында ағыс жылдамдығы пластина болмағандағы жалдамдықтай болады, яғни тұтқырлық күшінің әсері айтарлықтай аз.

Шекаралық қабат сыртында тұтқырлық күштері елеулі ықпал етеді.

Шекаралық қабат ағынды дененің алдыңғы нүтесінен басталып, бүкіл беті бойынша, бірте-бірте ұлғаяды.

*Шекаралық қабаттың қалыңдығы* - еркін ағыстың жылдамдығынан  $u_\infty$  1%-дан кем емес жылдамдықтағы пластинадан ара қашықтық.

Шекаралық қабат *ламинарлы* және *турбулентті* болып бөлінеді. Шекаралық қабаттың қалпынан үйкеліс қарсыласуының өлшемі тәуелді.

Пластинаның алдыңғы бөлігінде шекаралық қабат ламинарлы сипатқа ие болады. Ламинарлы қабаттың қалыңдауына байланысты ол беріктігін жоғалтып, турбулентті шекаралық қабатқа ауысады.

Шекаралық қабаттың жағдайы осы қабаттағы қозғалысты сипаттайтын Рейнольдс санынан тәуелді.

Рейнольдс саны мына формуламен анықталады

$$\text{Re} = \frac{u_{\infty} L}{\nu}, \quad (7.6)$$

мұндағы

$L$ - пластина ұзындығы.

Жазық пластина үшін ламинарлы шекаралық қабат турбуленттіге ауысады егер

$$\text{Re}_{кр} = \frac{u_{\infty} x_{кр}}{\nu} = 485000, \quad (7.7)$$

мұндағы

$x_{кр}$  - пластинаның алдыңғы бүйірінен шекаралық қабаттың ламинарлы бөлігінің соңына дейінгі ұзындық.

Егер  $L < x_{кр}$ , онда бүкіл шекаралық қабат ламинарлы.

Егер  $L > x_{кр}$ , шекаралық қабаттың жарты бөлігі ламинарлы, ал жартысы турбулентті –яғни *аралас шекаралық қабат*.

### Бақылау сұрақтары мен тапсырмалар

1. Ағыс бағытына перпендикуляр, пластинаны сұйықтық ағысының айналып ағуының механизмін түсіндіріңіз.
2. Пішіннің қарсыласуы дегеніміз не?
3. Қысымның қарсыласуы дегеніміз не?
4. Сұйықтық пен дененің салыстырмалы қозғалысы кезінде толық қарсыласу қалай анықталады?
5. Ньютон формуласы қандай түрде және нені анықтауға мүмкіндік береді?
6. Қысымның қарсыласуы қалай анықталады?
7. Дененің миделдік қиылысуы дегеніміз не?
8. Цилиндрді тұтқырлығы жоқ сұйықтықтың ағуы қалай өтеді?
9. Тұтқырлығы жоқ ағу кезінде қысым қалай таралады?
10. Эйлер-Даламбер парадоксы қалай тұжырымдалады?
11. Цилиндрді тұтқырлықты сұйықтықпен ағуы кезінде қандай құбылыс орын алады?
12. Тұтқырлығы жоғары ағу кезінде қысымды тарату қалай жүзеге асады?
13. Басқа пішінді дененің сұйықпен ағуы кезіндегі механизмі қандай?
14. Қысымның қарсыласу коэффициенті қандай факторлардан тәуелді?
15. Қарсыласу коэффициенті Рейнольдс санынан қалай тәуелді?
16. Симметриялы емес денелердің сұйықпен ағуы кезінде не болады?
17. Бүйірлік қарсыласу дегеніміз не?
18. Көтергіш күш дегеніміз не?
19. Үйкеліс қарсыласуы қалай анықталады?
20. Үйкеліс қарсыласуын қайда байқауға болады?
21. Сұйықтықтың шекаралық қабатына анықтама бер.

22. Шекаралық қабат қалай басталады және қалай жалғасады?
23. Шекаралық қабаттың қалыңдығы деп нені айтамыз?
24. Қай кезде шекаралық қабат ламинарлы және турбулентті сипатта болады?
25. Аралас шекаралық қабат дегеніміз не?

## 8 Ағыстар теориясының негізі

### 8.1 Ағыстардың жіктелуі

*Еркін ағыс* – қатты қабырғалармен шектелмеген ағыс.

*Батырылған(затопленная)ағыс* – бұл ағыс түрі ортада өзінде бар физикалық қосылыстармен араласып кетеді.

Мысалы, су қоймасынан саңылауынан шығып жатқан су ағысы; тұйық қойма саңылауынан атмосфераға шығып жатқан ауа ағысы, ауаның бірдей тығыздықта болу шартында.

*Батырылмаған (незатопленная)ағыс* – өзінің жақсы физикалық құрамымен ортада таралады.

Например, ағыс еркін ұшуда болғандағы ауаның қойманың саңылауынан шапшуы.

Ағыстар жіктеледі:

а) тыныштық ортаға және ауа ағынына ағуы бойынша. Ауа ағынына өтуі бойынша келесідей ағыстарды жіктейді:

- *шатастырылған ағыс* – жылдамдық бағыты ағыс бағытымен сәйкес келетін, ағынға өтіп жатқан ағыс;

- *жөнелту ағынындағы ағыс*, ағыс жылдамдығы ағыс осіне тік бұрышты бағытталғанда.

- *қарсы ағындағы ағыс*, ағыстың бойлық жылдамдығының векторы және ағыс жылдамдығы бір біріне қарама қарсы бағытталғанда.

Б) шапшуды жасауға кететін энергияны түріне байланысты:

- *механикалық ағыс*-вентилятор, компрессор, эжектормен туындайтын шапшулар.

-*конвективті ағыс*-эртүрлі денелердің суық немесе ыстық беттерінен ауаның сууы немесе ысуы әсерінен пайда болатын шапшулар;

в) *бастапқы қиылысу пішіні бойынша*:

- дөңгелек қиылысуда шапшу *остік-симметриялы* деп аталады;

-тұрақты биіктікте шексіз ұзын сызық формасындағы қиылысу – *жазық-параллельді (жазық)*;

г) *қоршаған орта мен шапшудың температурасына тәуелді*:

-*изотермиялық ағыс*, ағыс температурасы мен қоршаған орта температурасы бірдей болғанда;

-*изотермиялық емес ағыс*, ағыс температурасы мен қоршаған орта температурасы әртүрлі болғанда;

д) ағып өту режиміне тәуелді:

-ламинарлы ағыс;

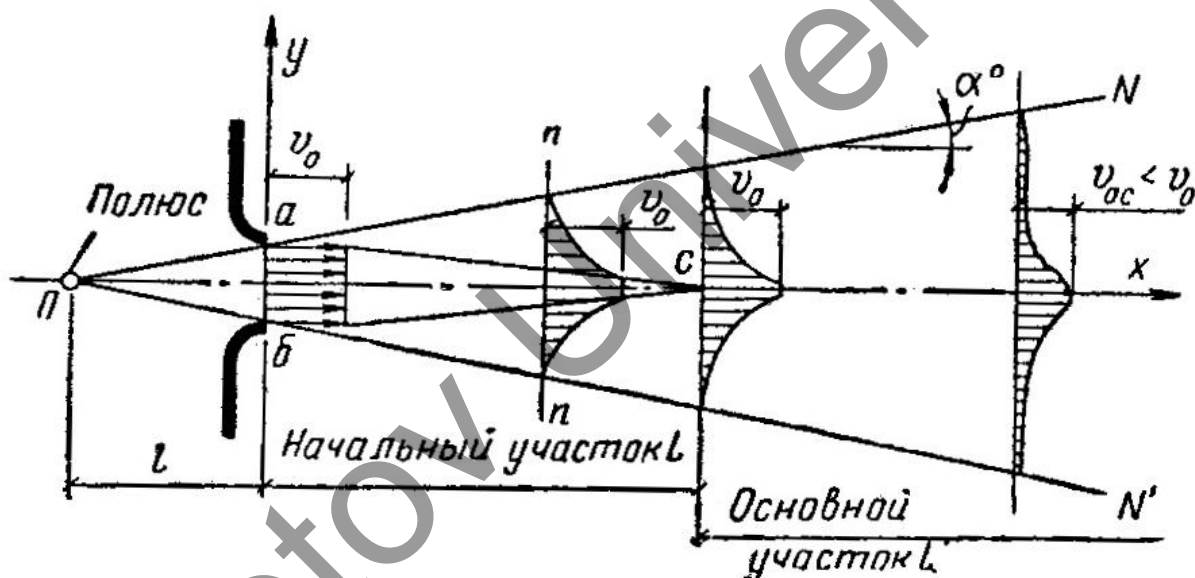
-турбулентті ағыс;

е) *иректелген ағыс*- бастапқы қиылысында жылдамдықтың айналмалы құрамдас бөлігі бар ағыс.

Тәжірибелер көрсеткендей, шапшу мен сұйықтықтың сыртқы кеңістігінде масса алмасу құбылысы жүреді. Сонымен қатар, процесс кезінде шапшу (струя) үлкен мөлшерде массаны қамтиды, сондықтан шапшу қозғалысының бағытында оның массасы артады.

## 8.2 Ағыс құрамы

Г.Н.Абрамовичтың тәжірибиелері бойынша, шапшуды тудыратын сұйықтық қозғалысын келесідей сипаттауға болады (8.1 сурет).



8.1 - сурет. Еркін батырылған шапшудағы сұйықтықтың қозғалысы

Шығыс а-б қиылысында ағыс жылдамдығы барлық нүктелерде өзара тең.

$L$  ұзындық бойымен (*бастапқы бөлікте*) осьтік жылдамдық өлшемі бойынша тең және шығыс қиылысу  $v_0$  жылдамдығына тең.

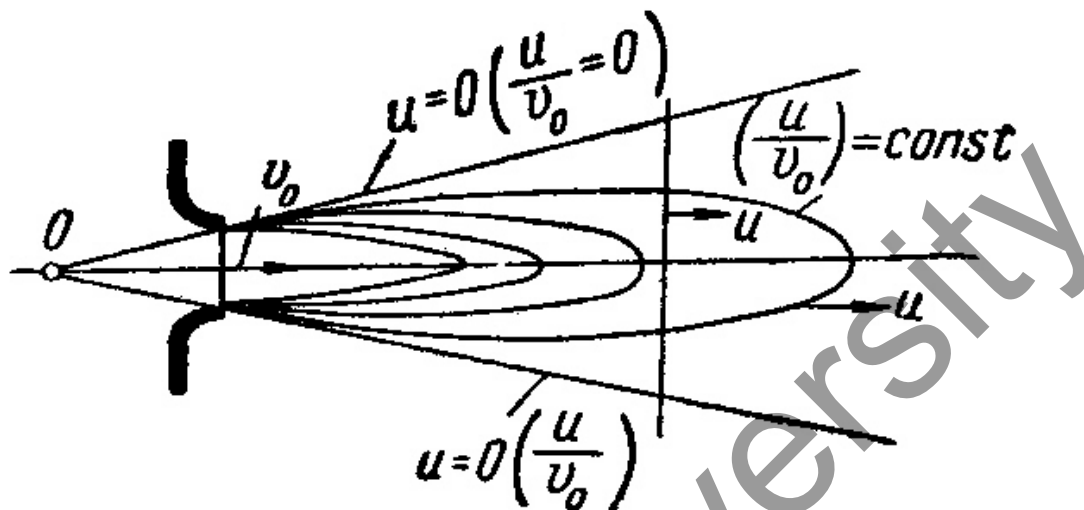
Кейбір аралық қиылысуда n-n бастапқы бөлікте жылдамдықтар эпюрасы 8.2 суретте көрсетілгендей түрге айналады.

Ары қарай осьтік жылдамдық біртіндеп азаяды. Шапшудың  $L$  ауданында  $v_{oc} < v_0$ , осьтік жылдамдық *негізгі* деп аталады, ал негізгі ауданды бастапқыдан бөліп тұратын ағын қиылысын – *өтпелі* деп атайды.

Аbc үшбұрышында сұйықтық жылдамдығының шапшуы барлық нүктелерде өзара тең және  $v_0$ -ға тең. Бұл аумақ *ағын ядросын* құрайды.

$ON$  және  $ON'$  шекаралық сызықтарда бойлық жылдамдықтар 0-ге тең. Бұл сызықтар осьте  $O$  нүктесінде қиылысады, ол «*полюс*» деп аталады.

Егер  $ON$  және  $ON'$  шекаралық сызықтар арасына *изотак* (тең жылдамдықты сызықтар) салыстырмалы координатада көрсетілген, онда олар шам алауына ұқсайтын сызықтар жүйесін құрайды (8.2 сурет).

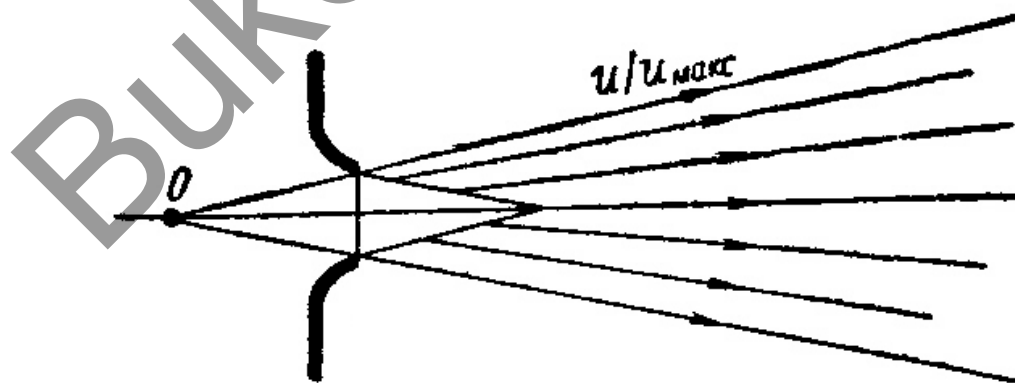


8.2 - сурет. Изотак-сызықтарынан алау  $u/v_0 = const$   $u$  - берілген нүктедегі жылдамдық,  $v_0$  - шығыс қиылысындағы жылдамдық.

*Алау* – дегеніміз салыстырмалы координатада құрастырылған изотак жүйесі.

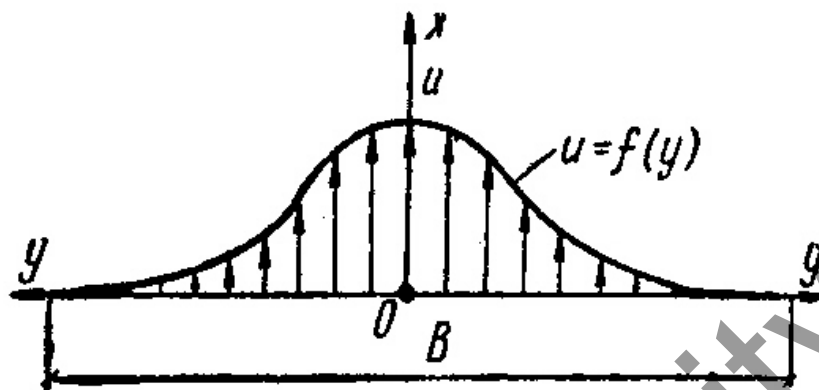
*Алау теориясы* – осы аудандағы жылдамдықтар жиегі теориясы.

Егер изотактарды өлшемсіз жылдамдықтарға құрастырса, бірақ басқа координатада, онда мұндай сызықтар алау емес, *түзулер түйінін* құрайды (8.3 сурет).



8.3 - сурет. Изотак-сызықтары жүйесі  $u/u_{max}$

Ұзындығы  $B$  су ағынының бойлық қиылысында абсолютті жылдамдықтарды үйлестіру (эпюра) 8.4 суретте көрсетілген.



8.4 - сурет. Су ағыны бойлық қиылыста жылдамдықтарды үйлестіру  $u = f(y)$

Су ағыны дөңгелек бойлық қиылыста осьтік жылдамдық теңдеуі (Г.Н. Абрамович теңдеуі)

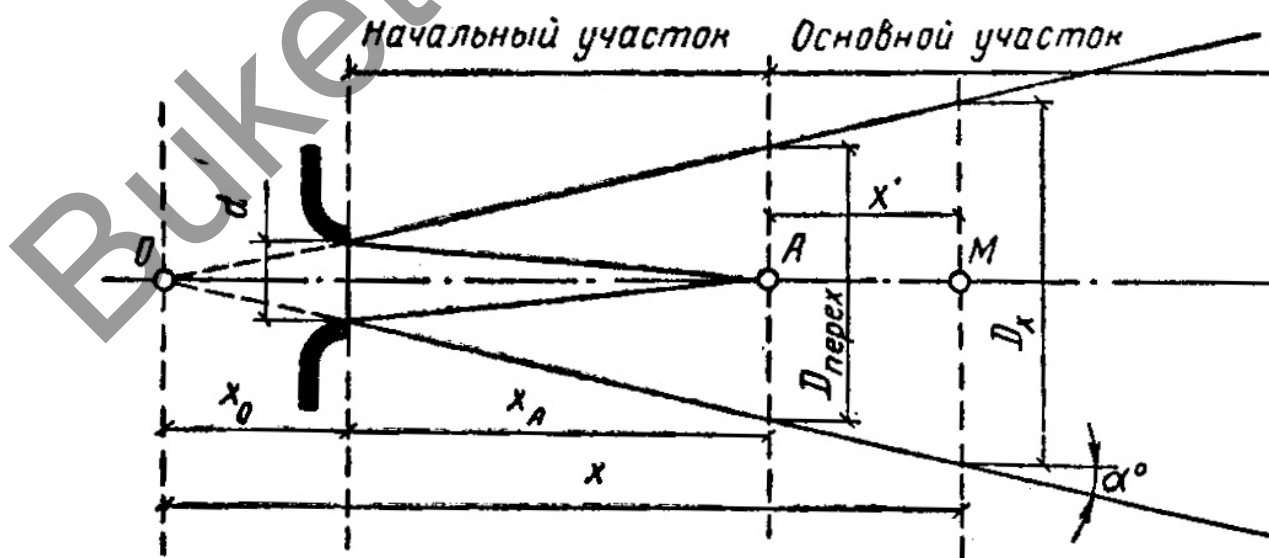
$$u_x = v_0 \frac{0,48}{\frac{ax}{d} + 0,145} = \frac{0,48d}{ax + 0,145d}, \quad (8.1)$$

мұндағы

$x$  - полюстан  $M$  нүктесіне дейінгі қашықтық (8.5 сурет);

$a$  - турбуленттік коэффициенті,  $0,07 \dots 0,08$ ;

$d$  - дөңгелек ағыстың диаметр.



8.5 - сурет. Ағынды құру схемасы

Шығыс қиылысудан полюсқа дейінгі қашықтық мына формуламен анықталады.

$$x_0 \approx -0,15 \frac{d}{a}, \quad (8.2)$$

Шығыс қиылысудан өткізгіш қиылысқа дейін қашықтық, яғни бастапқы аудан ұзындығы келесі формуламен анықталады:

$$x_A = 0,335 \frac{d}{a}, \quad (8.3)$$

Өткізгіш қиылысының диаметрі мына формуламен анықталады:

$$D_{перех} = 3,3d, \quad (8.4)$$

Ұлғаю бұрышының формуласы:

$$tg \alpha = 3,4a, \quad (8.5)$$

x қашықтықтағы ағын диаметрі келесі формуламен анықталады:

$$D_x = D_{перех} + 6,8ax, \quad (8.7)$$

Ағынды сипаттайтын негізгі көрсеткіштер болып:

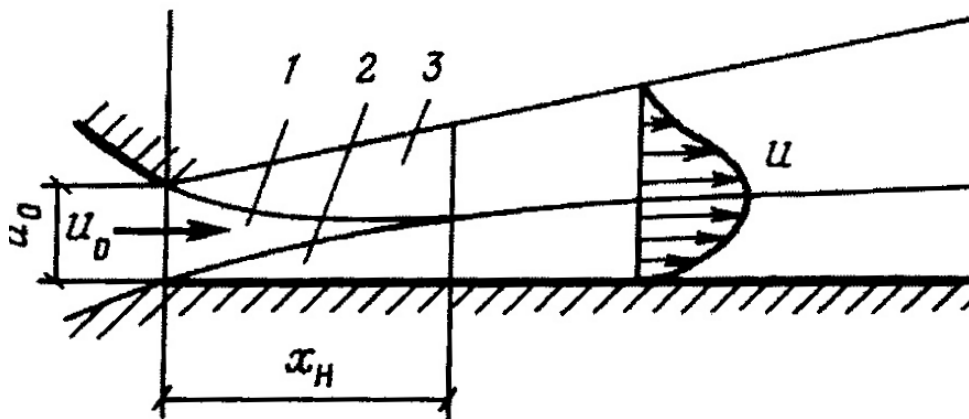
- осьтік жылдамдық;
- дөңгелек ағыс үшін диаметр және жазық ағыс үшін ені;
- шығын;
- орташа жылдамдық.

### **8.3 Шектелген кеңістікте ағынның таралуы**

*Жартылай шектелген ағыс* – бір жағынан қатты қабырғамен шектелген, ал екінші жағынан қозғалыссыз шексіз ортамен жанасады.

Мысалы, жазық бетімен таралып жатқан ағыс.

Жартылай шектелген ағыстың басты ерекшелігі, оған қатты беттен кедергі әсерін тигізуінде, нәтижесінде осы бет бойымен *қабырғалы шекаралық қабат* пайда болады (8.6 сурет).



1-құйын ядро, 2-қабырғадағы шекаралық қабыршақ  
3-құйынды шекаралық қабыршақ

8.6 - сурет. Жартылай шектелген құйын

Жартылай шектелген қима құйынында шектелмеген қабыршақ құйынымен қабырға қабыршағы айқасады бұны өтпелі деп атаймыз. Бастапқы және өтпелі қимаға дейін бастапқы участок шайылады, онда құйын ядросы қабырғадағы шекаралық қабыршақ пен құйын арасында орналасқан. Өтпелі қимадан кейін негізгі құйын учаскасы орналасқан. Қабырға қабыршағындағы қозғалыс режиміне байланысты ламинарлы немесе турбулентті болады.

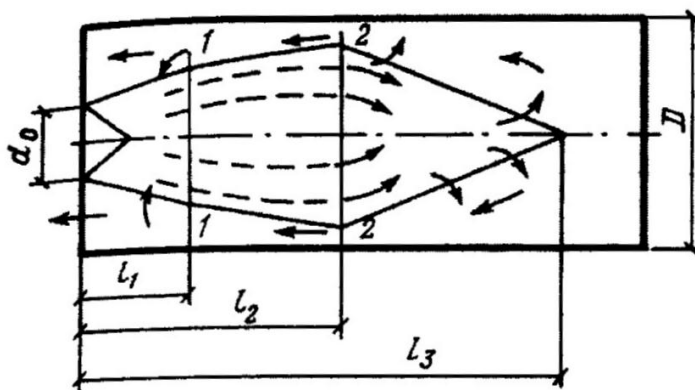
Жартылай шектелген құйындағы көлденең қимадағы максималды жылдамдығы шектелген жақын бетте қарастырылады.

Шектелген құйын тұйық және транзиттік болып бөлінеді.

Дөнгелек бекітілген құйын цилиндр ортасындағы ашық соңында орналасады. (8.7 сурет)

Цилиндр қимасының көлденең ауданы 40-45 жеткенде, құйын ұлғаюын тоқтатады. Ішіндегі шығын төмендей бастайды және белгілі бір қашықтықтан кейін нөлге тең болады, құйын толығымен таралып кетеді.

Құйыннан ажыратылған салмақ кері қарай бағытталады және цилиндрдің кңре беріс саңылауында болшетене жоғалады.



8.7 - сурет. Тұйық шекаралық құйын

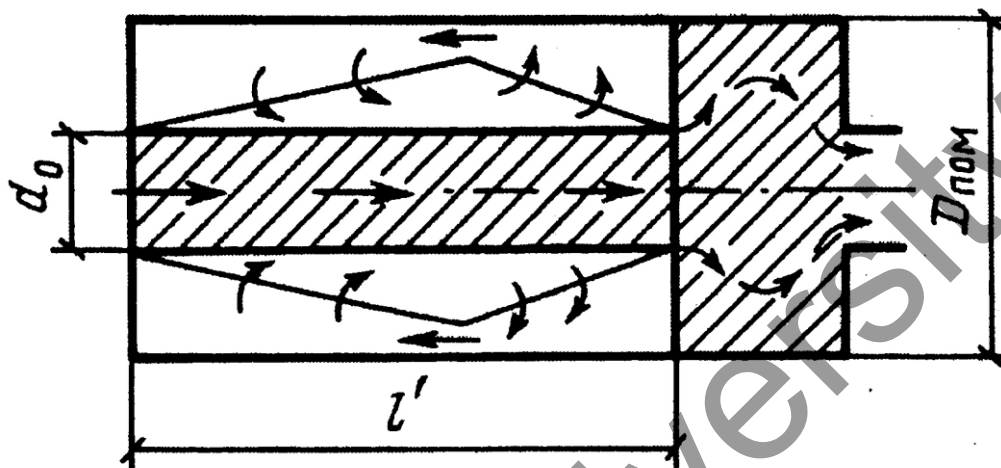
Тұйық шектелген құйын 3 участкамен сипатталады

- 1-1 қимасына дейін еркін жайылу

- 1-1 қимасынан 2-2 қимасына дейін тығыздап жайылу

Әр участок құйын шекарасын тіксызықты деп айтуға болады.

Шектелген транзиттік құйын тұйық құйыннан ажыратылады: цилиндрге бір торцтан кіреді, ал шыққанда бағыттары қарама-қарсы 8.8 сурет.



8.8 - сурет. Транзитті шектелген құйын

Участок тарылғаннан кейін транзиттік масса барлық қиманы толтыра жайылады. Қайтарылған токтар бекітілген массадан тұрады.

### Бақылау сұрақтары мен тапсырмалар

1. Бос ағысқа (струя) анықтама беріңіз.
2. Батырылған(затопленная) ағыс пен Батырылмаған (незатопленная) ағыстардың айырмашылығы?
3. Батырылған(затопленная) ағысқа мысал келтіріңіз?
4. Батырылмаған (незатопленная) ағысқа мысал келтіріңіз?
5. Ағыс қандай түрлерге жіктеледі?
6. Ағыс түзілуінің энергия түрі бойынша жіктелуі?
7. Остік-симметриялы жазық-параллельді (жазық) ағыстан айырмашылығы?
8. Изотермиялық және изометриялық емес ағыстар анықтамасы.
9. Қандай ағыс иректелген деп аталады?
10. Ағыстың өтіп кету режиміне байланысты ағыс классификациясы?
11. Бос батырылған ағыста сұйық қозғалысы қалай жүреді?
12. Бастапқы ағыс бөлігі дегеніміз не?
13. Ағыстың қай бөлігі негізгі болып табылады?
14. Бастапқы бөлік пен негізгі бөлікті бөлетін ағыс қимасы қалай аталады?
15. Ағыс ядросы деп нені айтады?
16. Иизотах дегеніміз не?
17. Ағыс алауына анықтама беріңіз

18. Қандай жағдайда алау түзіледі?
19. Қандай жағдайда тік құйын түзіледі?
20. Ағыстың көлденең қима бөлігінде барлық жылдамдыққа сәйкес сипаттама.
21. Ағыстың көлденең қима бөлігінде жылдамдық эпюрасы қандай түрде болады?
22. Абрамович Г.Н теңдігі қандай түрге ие
23. Ағыс қандай параметрлермен сипатталады.
24. Қандай ағыс жартылай шектелген деп аталады?
25. Жартылай шектелген ағыстың ерекшелігі?
26. Жартылай шектелген құйындағы көлденең қимадағы максималды жылдамдығы қайда қарастырылады
27. Жартылай шектелген ағысты қашан бос ағысты екі еселенген аудан ретінде қарастыруға болады?
28. Тұйық ағыс деп нені атайды?
29. Транзитті ағыс деп нені атайды?
30. Қандай бөліктер шектелген тұйық ағысқа сәйкес.

## 9 Аэростатика мен аэродинамиканың негіздері

### 9.1 Газдардың термодинамикалық қасиеті

Тамшы сұйықтардан айырмашылығы газдар температура мен қысым өзгерген кезде өз көлемін біраз өзгертуге қабілетті.

Тек 100 м/с аспайтын қозғалыс жылдамдығы кезінде ғана тамшы сұйықтар қозғалысының заңдарын газдар үшін де қолдануға болады.

Сондай-ақ көптеген аэродинамиканың заңдары термодинамиканың негізгі жағдайларына байланысты жасақталады, газдардың маңызды термодинамикалық қасиетін қысқаша қарастырайық.

Газдың термодинамикалық қасиеті сипатталады: Термодинамическое состояние газа характеризуется:

- қысыммен  $P$ ;
- тығыздығымен  $\rho$ ;
- температурамен  $T$ .

Бұл параметрлердің арасындағы тәуелділік *идеал газ жағдайы* теңдеуімен көрсетіледі:

$$PV = RT, \quad (9.1)$$

мұнда

$R$  - универсалды газ тұрақтысы.

Газ жағдайының өзгерісі жылулық, механикалық немесе бірлескен ықпал кезінде болуы мүмкін.

*Жылулық ықпал* жылуды газдан бөліп беру немесе газға жылуды хабарлау есебінен болады.

*Механикалық ықпал* кейбір жұмысты газдың берілген көлемімен іске асыру есебінен немесе оған кейбір ішкі жұмысты үстемелеу кезінде, мысалы, газды сығу кезінде.

Тұрған газға хабарланатын жылу, оның температурасын жоғарылатуға ішінара шығындалады, яғни, газдың ішкі энергиясын арттыруға және ішкі жұмысын іске асыруға (газды кеңейту жұмысына) - бұл *термодинамиканың бірінші заңы*

$$\Delta Q = \Delta U + A. \quad (9.2)$$

Егер газ қозғалса, онда жылудың бөлігі кинетикалық энергияның өзгеруіне жұмсалады

$$\Delta Q = \Delta U + A + \Delta \frac{v^2}{2}, \quad (9.3)$$

мұнда

$\Delta \frac{v^2}{2}$  - газдың кинетикалық энергиясының өзгерісі.

Негізгі термодинамикалық процестер: изохоралық  $V = const$ ; изобаралық  $P = const$ ; изотермиялық  $T = const$ ; адиабаталық  $\Delta Q = 0$ ; политроптық.

Сұйық және газ механикасында стандартты газ үшін жақсы физикалық шарттарда ( $t=0^\circ\text{C}$  и  $P=10^5\text{Па}$ ) немесе стандартты физикалық шарттарда ( $t=20^\circ\text{C}$  и  $P=10^5\text{Па}$ ) алынған құрғақ атмосфералық ауа қолданылады.

## 9.2 Ауырлық күші өрісіндегі газдардың тепе - теңдігі

Тек ауырлық күші әрекетімен табылатын газдың тепе-теңдік шартын қарастырайық.

Сұйықтың тепе-теңдік теңдеуінен, газдардың тепе-теңдік теңдеуі газдың сығылуымен ерекшеленеді, яғни температура мен қысымнан газ тығыздығының  $\rho$  тәуелділігі есебінен.

Бұл тәуелділік газдың бір күйден екінші күйге өтудің сол немесе басқа процесімен анықталады. Сондықтан әртүрлі процес кезінде ауырлық күші өрісіндегі газдардың өзіне тән тепе-теңдік заңы бақыланады. Осыған байланысты үш жағдай қарастырылады:

- біртекгі атмосфера,  $\rho = const$  болғанда;
- изотермиялық атмосфера,  $P / \rho = const$  болғанда;
- политропикалық атмосфера,  $P / \rho^n = const$  болғанда.

*Біртекгі атмосфера.*

$\rho = const$  болғанда газдық ортада тұрғын қысымды тарату сығылмайтын сұйықтықта қысымды таратумен ұқсас. Сонымен бірге *гидростатиканың негізгі теңдеуі* орындалады

$$z + \frac{P}{\gamma} = \text{const} . \quad (9.4)$$

Қысымды тарату келесі формуламен анықталады:

$$P = P_0 + \rho g(z_0 - z) , \quad (9.5)$$

мұнда

$P_0 - z_0$  биіктіктегі белгілі қысым.

Ұзындық(сызықтық) заңы бойынша берілген нүктенің орналасу биіктігінің өсуімен қысым кемиді.

Теңіз деңгейінде шамамен  $z = z_0$ ;  $P_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$  және  $\gamma = 11,5 \text{ Н/м}^3$ ;  $P = 0$  ең биік нүктесінде, біртекті атмосфераның биіктігі анықталады:

$$z - z_0 = h = \frac{P_0}{\gamma} = \frac{1,01 \cdot 10^5}{11,5} = 8800 \text{ м}.$$

Бірақ бұл нәтиже нақты шарттарға сәйкес келмейді және биіктіктердің өте үлкен айырмашылығы кезінде тығыздықтың тұрықтылығы туралы шамалауды қолдану айтарлықтай қателікке алып келуі мүмкін.

*Изотермиялық атмосфера.*

$P/\rho = \text{const}$  болғанда газдың тепе - теңдігі кезінде биіктік бойынша қысымды тарату келесідегідей анықталады:

$$P = P_0 e^{-\frac{gh}{R_0 T}} . \quad (9.6)$$

Биіктіктің өзгеруі кезінде қысымның өзгеруі экспоненциалды заңына бағынады.

*Политропикалық атмосфера.*

$P/\rho^n = \text{const}$  болғанда адиабатты процесті қарастырудан бастап нәтижелі зерттеу.

Қоршаған ортадан бөлектенген кейбір массалардың сығылатын газ элементін қарастыра отырып, ортаның әсерін сәйкесінше оның қысымының потенциалдық энергиясын анықтайтын беттік күштермен ауыстыру қажет. Газ элементі сондай-ақ қоршаған ортадан жылулық энергияны қабылдай алады немесе қоршаған ортаға оны жұмсай алады.

Сондықтан газ үшін оның ішкі энергиясын есепке алуы керек.

Адиабаталық процес кезінде газдың тепе-теңдік шарттарын анықтайтын теңдеу, мынадай түрде болады.

$$gz + \left(\frac{k}{k} - 1\right) \frac{P}{\rho} = gz_0 + \left(\frac{k}{k} - 1\right) \frac{P_0}{\rho_0} . \quad (9.7)$$

$k$  - ны  $n$ -ға ауыстырып, политропты процес үшін қысымды тарату заңын аламыз

$$gz + \left(\frac{n}{n} - 1\right) \frac{P}{\rho} = gz_0 + \left(\frac{n}{n} - 1\right) \frac{P_0}{\rho_0}. \quad (9.8)$$

Полиетропты процес кезінде температураны тарату заңы, келесі түрге ие

$$T = T_0 - \frac{gh(n-1)}{nR_0}, \quad (9.9)$$

мұнда

$$h = z - z_0.$$

Адиабаталық процес кезінде температураны тарату заңы, келесі түрде болады

$$T \approx T_0 - 0,01h. \quad (9.10)$$

Адиабаталық процесте ауаның температурасы ұзындық(сызықтық) заңы бойынша биіктік бойынша әрбір 100м арқылы шамамен  $1^{\circ}\text{C}$  –қа кішірейіп, биіктіктің өсуімен кемиді.

Теңіз деңгейіне шамалап  $z = z_0$ ;  $P_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$  және  $\gamma = \rho_0 g = 11,5 \text{ Н/м}^3$ ;  $P = 0$  ең жоғарғы нүктесінде, адиабаталық процес кезінде атмосфера биіктігі анықталады:

$$z - z_0 = h = \frac{kP_0}{k-1} \rho_0 g = \frac{1 \cdot 4 \cdot 1,01 \cdot 10^5}{0,4 \cdot 11,5} = 30000 \text{ м.}$$

Осылайша, адиабаталық процес кезінде атмосфера биіктігі шектеулі және шамамен 30км тең.

### **9.3 Газ ағындары үшін шығынды сақтау теңдеуі мен Бернулли теңдеуі**

Газ ағындары үшін салмақтық немесе жаппай шығынды сақтау теңдігі орындалады.

Жаппай шығын – бұл бірлік уақытта ағынның көлденең қимасы арқылы ағатын газдың массасы.

*Салмақтық шығын* – бұл бірлік уақытта ағынның көлденең қимасы арқылы ағатын газдың салмағы.

Жаппай шығынды сақтау теңдеуі 1748 ж алғаш рет М.В Ломоносов тұжырымдаған *материяны сақтау заңына* негізделіп шығарылады. Бұл заң былай: бірлік уақытта белгіленген қозғалыс кезінде газдың қарапайым ақырын ағысының әрбір көлденең қимасы арқылы сол массадан газ ағуы керек.

Газдың қарапайым ақырын ағысы үшін *жаппай шығынды сақтау теңдеуі*

$$\rho_1 u_1 \Delta \omega_1 = \rho_2 u_2 \Delta \omega_2, \quad (9.11)$$

мұндағы

$\rho$  - газдың тығыздығы;

$u$  - газ жылдамдығы;

$\Delta\omega$  - газдың қарапайым ақырын ағысының көлденең қимасының ауданы.

Газдың салмақтық шығынын сақтау теңдеуі

$$\mu_1 \Delta\omega_1 = \mu_2 \Delta\omega_2 = const, \quad (9.12)$$

мұнда

$\gamma$  - газдың салыстырмалы салмағы.

Сығылатн газдың ақырын ағысы үшін шығынды сақтау теңдеуі былай: жаппай (салмақтық) шығын белгіленген қозғалыс кезінде берілген қарапайым ақырын ағыстың барлық қимасы үшін тұрақты шама бар.

Сығылатын газдың ағыны үшін шығынды сақтау теңдеуі

$$M = \rho v \omega = const \text{ немесе } G = \gamma \omega = const, \quad (9.13)$$

мұнда

$v$  - орташа жылдамдық;

$\rho v$  - газдың салыстырмалы салмағы.

Газдың салыстырмалы салмағы – бірлік уақытта ағынның көлденең қимасы ауданының бірлігі арқылы ағатын газдың массасы.

Газдың қарапайым ақырын ағысы үшін Бернулли теңдеуі

- адиабаталық процесте

$$gz + \left(\frac{k}{k} - 1\right) \frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2} = const; \quad (9.14)$$

- политропты процесте

$$gz + \left(\frac{n}{n} - 1\right) \frac{P}{\rho} + \frac{u^2}{2} = const; \quad (9.15)$$

- изотермиялық процесте

$$gz + R_0 T \ln P + \frac{u^2}{2} = const. \quad (9.16)$$

Газдың сығылуын қысымының шағын айырмасы кезінде елемеуге болады, сонда газдың қарапайым ақырын ағысы үшін Бернулли теңдеуі:

$$\gamma z + P + \frac{\rho u^2}{2} = const, \quad (9.17)$$

мұндағы

$\gamma z$  - салмақтық қысым;

$P$  - статикалық қысым;

$\frac{\rho u^2}{2}$  - жылдамдық (динамикалық) қысымы.

Салмақтық қысыммен  $\gamma$  тәжірибеде жиі елемейді, онда газдың қарапайым ақырын ағысы үшін Бернулли теңдеуі

$$P + \frac{\rho u^2}{2} = const. \quad (9.18)$$

Толық қысым  $P_0$  - статикалық және динамикалық қысымның суммасы.

Бернулли теңдеуі шағын қысым айырмасы кезінде газдың қарапайым ақырын ағысының бойында толық қысым тұрақты екендігін көрсетеді.

Нақты газдың ағыны үшін Бернулли теңдеуі

$$gz_1 + \left(\frac{k}{k-1}\right)R_0T_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2} = gz_2 + \left(\frac{k}{k-1}\right)R_0T_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2} + gh_\omega, \quad (9.19)$$

мұндағы

$\alpha$  - кинетикалық энергия коэффициенті;

$h_\omega$  - гидравликалық қарсыласуды болдырмауда салыстырмалы энергияны жоғалту.

Ағынның екі қимасындағы температура айырмашылығы, формуламен анықталады:

$$T_1 - T_2 = \frac{1-k}{kR_0(\alpha_2 \frac{v_2^2}{2} - \alpha_1 \frac{v_1^2}{2})}. \quad (9.20)$$

Дыбыс жылдамдығына жақын жоғары жылдамдықты газ қозғалысы кезінде, нақты газдың ағыны үшін Бернулли теңдеуі

$$\frac{a^2}{k-1} + \alpha \frac{v^2}{2} = const, \quad (9.21)$$

мұнда

$a$  - дыбыстың таралу жылдамдығы.

Дыбыстың таралу жылдамдығы келесі формула бойынша анықталады:

$$a = \sqrt{\frac{kP}{\rho}} = \sqrt{kR_0T} = 20,1\sqrt{T}. \quad (9.22)$$

## Бақылау сұрақтары мен тапсырмалар

1. Аэродинамика мен аэростатиканы қандай сұрақтар оқытады?
2. Тамшы сұйықтардың газтәріздестен қандай айырмашылығыбар?
3. Газдың термодинамикалық күйін қандай параметрлер сипаттайды?
4. Идеал газ күйі теңдеуінде не орнатылады?
5. Эсер етудің қандай түрлері кезінде газдың өзгерісі болады?
6. Жылулық және механикалық эсер ненің есебінен шығады?
7. Термодинамиканың бірінші заңында не туралы айтылады?
8. Негізгі термодинамикалық процестерді ата?
9. Сұйық және газ механикасында қандай газ стандартты деп қабылданады?
10. Қандай жағдайларда біртекті атмосфера бақыланады?
11. Изотермиялық атмосфера қандай кезде бақыланады?
12. Политропикалық атмосфера өзімен бірге нені көрсетеді?
13. Біртекті атмосфераның биіктігі неге тең?
14. Біртекті атмосфера жағдайында негізгі гидростатиканың теңдеуі қандай түрге ие?
15. Изотермиялық атмосфера үшін газдың тепе-теңдігі кезінде қысымды тарату қалай анықталады?
16. Политропикалық атмосфера үшін адиабаталық процес кезінде газдың тепе-теңдігін анықтайтын шарттарының теңдеуі қандай түрде болады?
17. Политропикалық атмосфера жағдайында политропты және адиабаталық процес кезінде температураны тарату заңы қалай жазылады?
18. Адиабаталық процесте атмосфера биіктігі неге тең?
19. Жаппай және салмақтық шығындар туралы түсінік бер?
20. М.В. Ломоносовпен 1748 жылы қандай заң тұжырымдалды?
21. Газдың қарапайым ақырын ағысы үшін жаппай шығынды сақтау теңдеуі?
22. Газдың қарапайым ақырын ағысы үшін салмақтық шығынды сақтау теңдеуі қалай жазылады?
23. Сығылатын газдың қарапайым ақырын ағысы үшін шығынды сақтау теңдеуі не туралы айтылады?
24. Газдың салыстырмалы шығыны дегеніміз не?
25. Сығылатын газдың ағыны үшін шығынды сақтау теңдеуі?
26. Изотермиялық, адиабаталық және политропты процес кезінде газдың қарапайым ақырын ағысы үшін Бернулли теңдеуі?
27. Газдың қарапайым ақырын ағысы үшін Бернулли теңдеуі қандай түрге ие?
28. Газдың қарапайым ақырын ағысының бойындағы толық қысым қалай анықталады?
29. Нақты газ ағыны үшін Бернулли теңдеуі?
30. Дыбыс жылдамдығына жақын, нақты газдың жылдамдық қозғалысы кезіндегі нақты газдың ағыны үшін Бернулли теңдеуі қалай жазылады?

## Қолданылған әдебиеттер тізімі

1. Нүрекен Е. Сұйық және газ механикасы. Сорғылар. Оқу құралы. - Алматы: АЭЖБИ, 2005. - 193 б.
2. Дейли Дж, Харлеман Д. Механика жидкости. Пер. с англ.-М.: Энергия, 1971. - 480 с.
3. Альбом течений жидкости и газа. Пер. с англ./Сост.М.Ван-Дайк,-М.: Мир, 1986. - 181 с.
4. Сергель О.С. Прикладная гидрогазодинамика.-М.: Машиностроение, 1981.-374 с.
5. Механика жидкости и газа/Аверин С.И. и др. -М.: Металургия, 1987. - 304
6. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. -М.: Наука, 1969. - 824 с.
7. Павлов К.Ф. и др. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. -Л.: Химия, 1987. -576 с.
8. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. -М.: Машиностроение, 1976. - 502 с.
9. Альтшуль А.Д. и др. Гидравлика и аэродинамика.-М.: Стройиздат, 1987. - 410 с.
10. Валужева Е.П., Свиридов В.Г. Введение в механику жидкости. -М.: Издательство МЭИ, 2001. - 212 с.
11. Нүрекен Е. Сұйық және газ механикасы пәндік жұмысқа әдістемелік нұсқаулар мен тапсырмалар. -Алматы: АЭЖБИ, 2003.-176.
12. Нүрекен Е. Сұйық және газ механикасы. Зерттеулік жұмыстардың сипаттамасы. - Алматы: АЭЖБИ, 2003. - 326.
13. Примеры расчетов по гидравлике /под. Ред. А.Д. Альтшуля.-М.: Стройиздат, 1977. - 255 с.
14. Тян. А.Д. Гидравлика в примерах и задачах. Алматы: Рауан, 1990, - 208.
15. Нүрекен Е. Сұйық және газ механикасы. Сорғылар. Мысалдар мен есептер. - Алматы: АЭЖБИ, 2006. - 866.

## МАЗМҰНЫ

Кіріспе.....	3
1 Сұйық пен газдың негізгі физикалық қасиеттері.....	4
1.1 Сұйық түсінігі анықтамасы, оның классификациясы.....	4
1.2 Тығыздық.....	4
1.3 Меншікті салмақ.....	5
1.4 Сығылғыштық.....	5
1.5 Температуралық ұлғаю.....	6
1.6 Тұтқырлық.....	6
1.7 Беттік керілу.....	7
1.8 Қысым.....	7
2 Гидростатика негіздері.....	8
2.1 Сұйықтың тыныштық күйі және әсер етуші күштер.....	8
2.2 Гидростатикалық қысым.....	9
2.3 Гидростатикалық қысымның қасиеттері.....	10
2.4 Гидростатиканың негізгі теңдеулері.....	11
2.5 Деңгейдің беті, оның сипаты мен теңдеуі.....	12
2.6 Пьезометриялық және гидростатикалық тегеурін (напор).....	13
2.7 Паскаль заңы.....	16
2.8 Сұйықтыққа енгізілген дененің қысымы мен осы дененің күші. Архимед заңы.....	18
2.9 Тегіс беттердегі сұйықтықтың қысымдар қосындысының күші.....	20
2.10 Цилиндрлі беттердегі сұйықтықтың қысымдар қосындысының күші.....	21
3 Гидродинамика негіздері.....	23
3.1 Гидродинамиканың негізгі түсініктері.....	23
3.2 Сұйықтық қозғалысының режимдері мен түрлерінің классификациясы.....	23
3.3 Ағынның гидравликалық элементтері.....	25
3.4 Құйынды қозғалыс.....	27
3.5 Қозғалысты құрайтын сұйық бөлшектердің сараптамасы.....	28
3.6 Құйынды және құйынсыз қозғалыстар. Гельмгольц теоремасы.....	30
3.7 Жылдамдық айналымы. Стокс және Томсон теоремалары.....	32
4 Сұйықтық және газ қозғалысының негізгі теңдеулері.....	35
4.1 Ағынның үзіліссіздік теңдеуі. Шығынның тұрақтылығы теңдеуі.....	35
4.2 Энергия теңдеулері.....	36
4.3 Бернулли теңдеуі және оны практикалық түрде қолдану.....	39
4.4 Идеал жән тұтқыр сұйық қозғалысының дифференциал теңдеуі.....	43
4.5 Турбулентті қозғалыстың негізгі сипаттамасы.....	45
4.6 Гидромеханикалық процесстерді модельдеу және ұқсастықтар.....	47
5 Құбырлардағы сұйық қозғалысы.....	50
5.1 Құбырлардың гидравликалық кедергісі.....	50
5.2 Ағыстың кенеттен ұлғаю мен тарылу кезіндегі ағын шығыны.....	52
5.3 Ағыстың біртіндеп ұлғаюы мен тарылу кезіндегі ағын шығыны.....	54

5.4 Дөңгелек құбырдағы сұйықтың ламинарлы қозғалысы.....	56
5.5 Дөңгелек құбырда сұйықтың турбулентті қозғалысы.....	59
5.6 Құбырдағы гидравликалық соққы.....	62
6 Сұғындырмадағы (насадок) және саңылаудығы сұйық ағыны.....	66
6.1 Тұрақты ағыс кезіндегі саңылаудағы сұйықтың ағыны.....	66
6.2 Өзгермелі (ауытқымалы) ағыс кезінде саңылаудан сұйықтың шығуы..	68
6.3 Сұғындырма(насадок) арқылы сұйықтың ағуы.....	70
7 Қатты дене мен ағыстың әрекеттесуі.....	74
7.1 Жалпы мәліметтер.....	74
7.2 Қысым қарсыласуы.....	76
7.3 Үйкелістің қарсыласуы. Шекаралық қабат.....	79
8 Ағыстар теориясының негізі.....	81
8.1 Ағыстардың жіктелуі.....	81
8.2 Ағыс құрамы.....	82
8.3 Шектелген кеңістікте ағынның таралуы.....	85
9 Аэростатика мен аэродинамиканың негіздері.....	88
9.1 Газдардың термодинамикалық қасиеті.....	88
9.2 Ауырлық күші өрісіндегі газдардың тепе - теңдігі.....	89
9.3 Газ ағындары үшін шығынды сақтау теңдеуі мен Бернулли теңдеуі.....	91
Қолданылған әдебиеттер тізімі.....	95

Букеетов University