

4-bob. SUYUQLIK HARAKATINING TURLARI

4.1. Gidrodinamika. Asosiy tushuncha va ta'riflar

Gidrodinamika harakatdagi siqilmaydigan tomchi-suyuqlik qonunlarini o'rganadi. Gidrodinamikaning asosiy vazifasi suyuqlik harakatini tavsiflovchi turlarini va uning parametrlarini (ya'ni tezligi, bosimi, egallagan fazoning istalgan nuqtasidagi urinma kuchlanishlarini, suyuqlik oqimi ichidagi jismga harakatlanayotgan suyuqlikni hamda uning qo'zg'aladigan va qo'zg'alamaydigan to'siqlarga ta'sir etuvchi kuchini) o'rganadi.

Gidrodinamika masalalar yechimini topishda suyuqlikni uzluksiz muhit deb qabul qiladi. «**Fazo nuqtasi va suyuqlik zarrasi**» tushunchalarini aniq tasavvur qilish va farqlash uchun avvalo, «fazo nuqtasi» tasavvurdagi o'lchamsiz geometrik shakl va uning fazodagi o'rni XYZ koordinatalari bilan aniqlanishini bilish kerak. Suyuqlik zarrasi tasavvurdagi fizikaviy shakl bo'lib, u juda ham cheksiz kichik massa va hajmga ega. Suyuqlik zarrasi harakatining ϑ tezligi va uning har bir soniyadagi P bosimi, zarraning oqimdagi holati, ya'ni koordinatalari va vaqti bilan tavsiflanadi.

Suyuqlik harakati muvozanatli va muvozanatsiz, tekis va notekis, damli va damsiz bo'lishi mumkin.

Barqaror harakat bu shunday harakatki, suyuqlik oqimining tezligi va bosim vaqt bo'yicha uning istalgan nuqtasida o'zgarmaydi va faqat oqimdagi vaziyatiga bog'liq bo'ladi, ya'ni koordinata funksiyasi hisoblanadi. Buni quyidagi tenglamalar orqali ifodalash mumkin:

$$\vartheta = f_1(x, y, z); \quad P = f_2(x, y, z).$$

Barqaror harakatga biror rezervuar tagidan o'zgarmas dam bilan oqib chiqayotgan suyuqlik misol bo'la oladi.

Nobarqaror harakat bu shunday harakatki, suyuqlik oqimining tezligi va bosimi vaqt bo'yicha uning istalgan nuqtasida

o'zgaruvchan, koordinata va vaqtga bog'liq bo'ladi. Uning analitik ifodasini quyidagicha yozish mumkin:

$$\begin{aligned}\vartheta_1 &= f_1(x_1, y_1, z_1, t_1); & P &= f_2(x_1, y_1, z_1, t_1); \\ \vartheta_2 &= f_1(x_2, y_2, z_2, t_2); & P &= f_2(x_2, y_2, z_2, t_2).\end{aligned}$$

Nobarqaror harakatga katta idish teshigidan o'zgaruvchan dam bilan oqib chiqayotgan suyuqlik misol bo'la oladi.

Tekis harakat — muvozanatlashgan suyuqlik oqimidagi o'zaro yonma-yon joylashgan ko'ndalang kesimlarda zarralarining o'xshash nuqtalardagi tezliklari o'zaro teng bo'lgan suyuqlik harakatidir, ya'ni $\vartheta = \text{const}$.

Tekis harakatga ko'ndalang kesimlari o'zgarmas bo'lgan quvur yoki kanaldagi suyuqlik oqimining harakatini misol qilib olish mumkin.

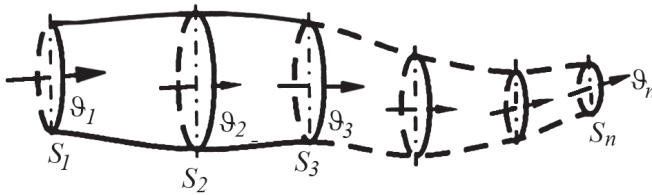
Notekis harakat — muvozanatlashmagan suyuqlik oqimining yonma-yon joylashgan ko'ndalang kesimlaridagi tezliklari va oqimning ko'ndalang kesimlari o'zgarganda tezliklari ham o'zgaradigan harakatdir. Masalan, ko'ndalang kesimi konussimon quvurdagi suyuqlik oqimining harakatini misol qilib olish mumkin. Unda $\vartheta \neq \text{const}$ va $S \neq \text{const}$ bo'ladi.

Damli harakat — bosimi atmosfera bosimidan farqli va quvur devorlari bilan chegaralangan hamda erkin sirtga ega bo'lmagan suyuqlik oqimining harakatidir. Quvurlardagi suyuqliklar harakati bunga misol bo'la oladi.

Damsiz harakat — suyuqlik oqimi erkin sirtga ega bo'lgan va uning sirtidagi bosimi atmosfera bosimiga teng bo'lgan suyuqlik harakatidir. Daryolar, kanallar, zovurlar hamda kanalizatsiya quvurlaridagi oqimlar harakati bu turdagi harakatga misol bo'ladi.

Oqim chizig'i — bu oqayotgan suyuqlik ichkarisida joylashgan nuqtalardan o'tkazilgan shunday chiziqki, suyuqlik zarralarining tezlik vektorlari, aynan shu vaqtda nuqtalarga urinma bo'lgan chiziqdir.

Demak, barqaror harakatli suyuqlikning oqim chizig'i suyuqlik zarralari harakatining trayektoriyasi bilan ustma-ust tushar ekan. Agar harakatlanayotgan suyuqlik oqimining ko'ndalang kesimidan cheksiz kichik berk doirasimon konturlarni ajratib olib, ularning hamma nuqtalaridan oqim chiziqlarini o'tkazsak, oqim quvuri hosil bo'ladi (2.1-rasm). Faraz qilaylik,



2.1-rasm. Suyuqlik oqimining quvuri.

oqim quvuridan suyuqlik oqib chiqa olmasin va unga kira olmasin. Oqim chiziqlari quvuri shaklidagi suyuqlikning elementar naychasini hosil qiladi. Suyuqlik oqimi turlicha tezliklarda harakatlanayotgan elementar naychalardan tashkil topadi.

Suyuqlik harakatini o'rganishda oqimning gidravlik va geometrik elementlarini tavsiflaydigan ayrim tushunchalar kiritiladi.

Oqim chizig'ining normal yo'nalishdagi ko'ndalang kesimi yuzasini *elementar naycha* yoki oqimning *tirik kesimi* deyiladi. Suyuqlik oqimining tirik kesimi qattiq devor bilan quvurlar (to'liq) yoki ochiq o'zarlarda (qisman) chegaralangan bo'lishi mumkin.

Oqim tegib turgan devor bilan chegaralangan tirik kesim perimetr uzunligini ho'llangan perimetr deyiladi. Ho'llangan perimetrni χ harfi bilan belgilanadi. Suyuqlikning damli harakatidagi ho'llangan perimetri geometrik perimetrga teng, damsiz oqimda esa geometrik perimetrdan kichik bo'ladi. Damsiz oqimda suyuqlik oqimining ustidagi erkin sirti qattiq muhitga tegmasdan havo bilan tutashadi. Tirik kesim yuzasining ho'llangan perimetr uzunligiga nisbatini oqimning gidravlik radiusi deyiladi:

$$R = S / \chi. \quad (2.1)$$

«Geometrik va gidravlik radius» tushunchalarining ma'nosi bir xil emas. Bunga ishonch hosil qilish uchun yumaloq diametrli quvur ichidagi suyuqlikning damli harakatini tahlil qilamiz:

- yumaloq diametrli quvur yuzasi $S = \pi d^2 / 4$, uning ho'llangan perimetri $\chi = \pi d$ bo'lgani uchun gidravlik radius $R = d/4$, aksincha, geometrik radius $r = d/2$ bo'ladi.

Quvur kesimi doirasimon bo'lmaganida gidravlik radiusni shaklga mos ravishda hisoblanadi. Masalan, kesimi ellipsimon,

teng tomonli uchburchak, kvadrat va to'g'ri burchakli quvurlar uchun quyidagi ifodalardan foydalanib, mos ravishda gidravlik radiuslari hisoblanadi:

$$a) R = \frac{3ab}{2(a+b)-3\sqrt{ab}},$$

bu yerda, a va b — ellipsning katta va kichik o'qlari;

$$b) R = \sqrt{\frac{a^2}{48}}; \quad d) R = a/4; \quad e) R = \frac{ab}{2(a+b)}.$$

4.2. Suyuqlik sarfi. Suyuqlik oqimining o'rtacha tezligi va uzluksizlik tenglamasi

Oqimning tirik kesimidan vaqt birligida o'tgan suyuqlik miqdorini suyuqlik sarfi deyiladi. Suyuqlik sarfi hajmiy, og'irlik kuchi yoki massa o'lchov birliklarida o'lchanadi: $Q(\text{m}^3/\text{s})$ — hajmiy, $Q_G(\text{N}/\text{s})$ — og'irlik kuchi va $Q_m(\text{kg}/\text{s})$ massaviy sarflarga bo'linadi.

Gidravlikada hajmiy sarf o'lchovi ko'proq ishlatiladi va uni soddaroq qilib suyuqlik sarfi deb yuritiladi. Suyuqlik sarfi elementar naychalardagi suyuqlik sarflaridan tashkil topadi. Elementar bir necha nay orqali o'tgan suyuqlik sarfining barqaror harakatini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$q_1 = \vartheta_1 S_1; \quad q_2 = \vartheta_2 S_2; \quad q_3 = \vartheta_3 S_3; \quad \dots, \quad q_n S_n. \quad (2.2)$$

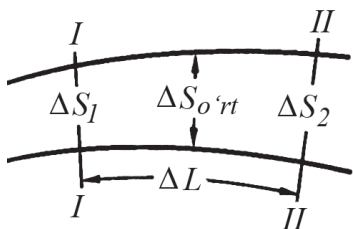
Suyuqlik oqimini ko'p sonli elementar naychalardan tashkil topganligini e'tirof etsak, unda suyuqlik oqimining sarfi elementar sarflar yig'indisiga teng bo'ladi (2.2-rasm):

$$Q = \sum_1^i q_i = \sum_1^i \vartheta_i S_i. \quad (2.3)$$

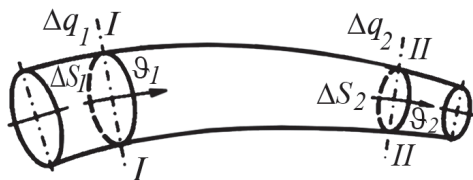
Hajmiy sarf o'lchovi m^3/s . da suyuqlik sarfl ifodalansa, unda uning kattaligi suyuqlikning o'rtacha tezlik qiymati bilan suyuqlik oqimining tirik kesimi ko'paytmasiga teng bo'ladi va molekullarning tezliklar bo'yicha real taqsimotiga mos keladi:

$$Q = S\vartheta, \quad (2.4)$$

bu yerda, S va ϑ — quvur kesimining yuzasi va suyuqlik oqimining tezligi.



2.2-rasm. Suyuqlik sarfini o'rganishga doir chizma.



2.3-rasm. Suyuqlikning uzluksizlik tenglamasini chiqarishga doir chizma.

Suyuqlik sarfini boshqa o'lchov birliklarida ifodalash zarur bo'ladi. Masalan, og'irlik kuchi sarfi, N/s ifodalaydi:

$$Q_G = \gamma Q = \rho g Q. \quad (2.5)$$

Massa sarfi, kg/s :

$$Q_m = \rho Q. \quad (2.6)$$

Hajmiy sarf suyuqlik hajmining vaqtga nisbatiga teng:

$$Q = V/t. \quad (2.7)$$

Massa va og'irlik sarflarini vaqtga bog'lab, suyuqlik og'irligining vaqtga nisbati shaklida ifodalash mumkin:

$$Q_m = m/t; \quad (2.8)$$

$$G_G = G/t. \quad (2.9)$$

Hajmiy va massaviy sarflar quyidagicha bog'langan:

$$Q = S\vartheta = m / \rho, \quad (2.10)$$

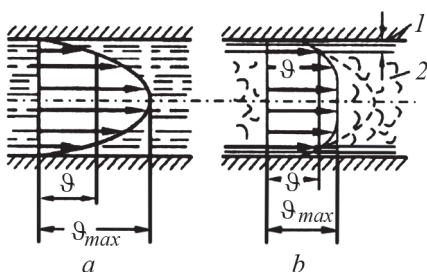
bu yerda, m va ρ — suyuqlik massasi va zichligi.

Suyuqlik uzluksiz muhit bo'lgani uchun oqimning istalgan kesimidagi sarfi o'zgarmas kattalik va shu sababli uzluksizlik tenglamasi quyidagicha yoziladi:

$$Q = S_1\vartheta_1 = S_2\vartheta_2 = \dots = S_n\vartheta_n, \quad (2.11)$$

bu yerda, $\vartheta_{1,2,3,\dots,n}$ — quvur ko'ndalang kesimining istalgan yuzalaridagi suyuqlik oqimining o'rtacha tezliklari (2.3-rasm).

Suyuqlik oqimining ko'ndalang kesimi istalgan radiuslardagi tezliklari maxsus asboblarda aniqlanganida, quvur devoriga ishqalanib harakatlanayotgan oqimning chegaraviy qismida tezlik



2.4-rasm. Suyuqlikning tirik kesimida tezliklar taqsimoti:
a — laminar va *b* — turbulent oqim;
 1—qattiq devor yonidagi laminar;
 2—turbulent oqimlar.

eng kichik bo'lsa, aksincha, oqimning markaziga yaqinlashgan sayin esa tezlik ortib boradi va oqim o'qida eng katta qiymatga erishadi (2.4-rasm).

Suyuqlik molekulalarining o'zaro va quvur devoriga ishqalanishi, qatlamlar orasida haroratlar farqining paydo bo'lishi hisobiga suyuqlik qovushqoqligining ortishi yoki kamayishi natijasida oqim tezligi

o'zgaradi. Bu hodisani yuqori aniqlik talab qilinadigan murakkab hisoblarda e'tibordan chetda qoldirib bo'lmaydi.

Demak, suyuqlik oqimining istalgan kesimidan vaqt birligida oqib o'tadigan suyuqlik miqdori o'zgarmas ekan. Shuning uchun uzluksizlik tenglamasini quyidagicha yozish mumkin:

$$Q = S_1 v_1 = S_2 v_2 = \dots = S_n v_n = const \quad (2.12)$$

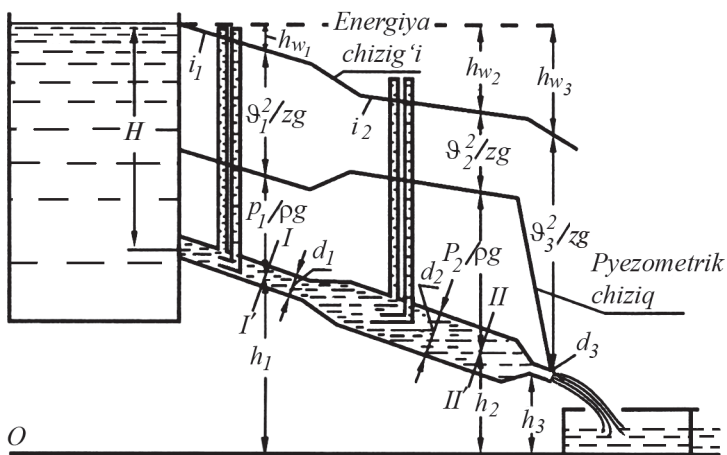
yoki

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}.$$

Demak, siqilmaydigan va uzluksiz suyuqlik harakatidagi oqimlarning ko'ndalang kesimlaridagi o'rtacha tezliklar nisbati shu kesimlar yuzalariga teskari mutanosib bo'lar ekan.

4.3. Ideal suyuqlikning elementar naychasi uchun Bernulli tenglamasi

Bernulli tenglamasi gidrodinamikaning asosiy tenglamasi hisoblanadi. Suyuqlik oqimi ko'ndalang kesimining yuzasi va suyuqlik harakati bir tekis o'zgaradigan barqaror harakatdagi ideal suyuqlik berilgan. Ideal suyuqlik oqimidan elementar naychalarining ixtiyoriy I—I va II—II kesimlarini ajratib olamiz (2.5-rasm). Bu kesimlarning yuzalari ΔS_1 va ΔS_2 bo'lsin. Birinchi kesimdan o'tayotgan suyuqlik naychasi zarralarining tezligi v va bosimi P_1 , ixtiyoriy gorizontol 0—0 tekisligiga nisbatan og'irlik markazining ko'ndalang kesimi joylashgan balandligi h bo'lsin. Bu kesimni



2.5-rasm. Bernulli tenglamasining grafik shaklidagi tasviri.

solishtirish tekisligi deb ataladi. Ikkinchi kesim ham xuddi shunday parametrlarga ega bo'ladideb olinadi.

I—I' va II—II' kesimlar oralig'idagi hajmlardagi suyuqlik miqdori juda qisqa vaqt davomida I—I' va II—II' kesimlar bilan chegaralangan hajmga siljiydi. Suyuqlikning mexanik harakati natijasida o'rganilayotgan hajmga qo'yilgan kuch bajargan ish kattaligi jismining kinetik energiyasining o'zgarishiga teng.

Shu hajmga ta'sir etayotgan kuchni qarab chiqamiz:

1. Faraz qilaylik, suyuqlik oqimining tirik kesimiga normal yo'nalishda $P_1 = p_1 \Delta S_1$ bosim kuchi ta'sir etsin. Suyuqlikning I—I' kesimiga ta'sir etayotgan P_1 bosim kuchi bajargan ish quyidagicha ifodalanadi:

$$A_1 = P_1 \Delta l_1 = p_1 \Delta S_1 \vartheta_1 \Delta t = p_1 \Delta V_1 \Delta t, \quad (2.13)$$

bu yerda, $\Delta l_1 = \vartheta_1 \Delta t$ — suyuqlik zarralari Δt vaqt davomida I—I' esimdan I'—I' kesimigacha o'tgan yo'li. Suyuqlik oqimining ikkinchi kesimi uchun bosim kuchining bajargan ishini quyidagi shaklda yozish mumkin:

$$A_2 = P_2 \Delta l_2 = -p_2 \Delta S_2 \vartheta_2 \Delta t = -p_2 \Delta V_2 \Delta t, \quad (2.14)$$

bunda «minus» ishorasi ikkinchi kesimdagi bosim kuchi birinchi kesimdagi kuchga qarama-qarshi yo'nalganligini ko'rsatadi.

Suyuqlik harakati natijasida vujudga kelgan bosim kuchlari teng ta'sir etuvchisining bajargan ishi quyidagiga teng bo'ladi:

$$A_p = p_1 \Delta V_1 \Delta t - p_2 \Delta V_2 \Delta t. \quad (2.15)$$

2. Og'irlik kuchi ΔG tik pastga yo'nalgan. Og'irlik kuchining bajargan ishi suyuqlik nayi kesimlari I—II dan I'—II' gacha bo'lgan oraliqdagi zarracha potensial energiyasining o'zgarishiga teng bo'ladi. Og'irlik kuchining bajargan ishini aniqlash uchun I—II hajmdagi suyuqlik naychasi energiyasidan I'—II' hajmdagi energiyasini ayirish kerak, xolos. Unda, elementar naychasi uchun uzluksizlik tenglamasi (2.12) muvofiq har bir hajmchalar va ulardagi og'irlik kuchlari o'zaro teng bo'ladi:

$$\Delta G = \rho g \Delta V_1 \Delta t = \rho g \Delta V_2 \Delta t. \quad (2.16)$$

Demak, og'irlik kuchining bajargan ishi suyuqlik oqimi potensial energiyasining o'zgarishiga, ya'ni og'irlik kuchi bilan suyuqlik balandliklari ayirmasining ko'paytmasiga teng bo'ladi:

$$A_G = (h_1 - h_2) \Delta G. \quad (2.17)$$

Elementar naycha kesimidagi kinetik energiyaning Δt vaqtdagi o'zgarishi $\Delta E = (m\vartheta_1^2 / 2) - (m\vartheta_2^2 / 2)$ o'rganilayotgan ΔV_1 va ΔV_2 hajmlardagi energiyalar ayirmasi bilan shu hajmlardagi suyuqlik massasi $\Delta G/g$ ko'paytmasiga tengligi asosida bajarilgan ishni yozamiz:

$$A = \frac{\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2}{2g} \Delta G. \quad (2.18)$$

Tashqi kuchlar bajargan ishlar (2.15) va (2.17)ni qo'shib, ularni kinetik energiyaning o'zgarishi hisobiga bajarilgan ish (2.18) ga tenglab hosil qilamiz:

$$p_1 \Delta V_1 \Delta t - p_2 \Delta V_2 \Delta t + (h_1 - h_2) \Delta G = \frac{\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2}{2g} \Delta G. \quad (2.19)$$

(2.19) tenglamani soddalashtirish uchun uni ΔG ga bo'lamiz va (2.16) tenglamani e'tirof etgan holda qayta yozamiz:

$$\frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} + h_1 - h_2 = \frac{\vartheta_2^2}{2g} - \frac{\vartheta_1^2}{2g} \quad (2.20)$$

yoki

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{2g} + \frac{v_2^2}{2g}.$$

(2.20) ifodani *siqilmaydigan ideal suyuqlik naychasi uchun* Bernulli tenglamasi deyiladi. Suyuqlik oqimidagi ΔV_1 va ΔV_2 hajmlari ixtiyoriy kesimlari uchun (2.20)ni umumiy shaklda yozish mumkin:

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{const.} \quad (2.21)$$

(2.21)dagi o'zgarmas kattalik suyuqlikning gidrostatik dami ekanligini hisobga olsak, unda Bernulli tenglamasini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = H. \quad (2.22)$$

Demak, tenglamaning uchala hadlarining yig'indisi h — geometrik, $p/\rho g$ — pyezometrik, $v^2/2g$ — tezlik damlarining yig'indisi H — gidrodinamik damga teng bo'lar ekan. Unda, Bernulli tenglamasini quyidagicha ta'riflash mumkin: ideal suyuqlikning elementar naychasi uchun geometrik, pyezometrik va tezlik damlarining yig'indisi naychanning hamma kesimlarida o'zgarmas kattalikdir.

(2.22) tenglamaga kirgan kattaliklarning o'lchov birliklarini qo'yib, damning o'lchov birligi topiladi. Tenglamaga kirgan balandlik *metrda* o'lchanadi. Shuning uchun ham h ni geometrik va nivelir balandligi, $p/\rho g$ — pyezometrik, $v^2/2g$ — tezlik balandliklari deb ataladi.

Grafikka uchala balandliklarni joylashtirib, Bernulli tenglamasining grafik shaklidagi tasviri hosil qilinadi (2.5-rasm).

Bernulli tenglamasini energetik shaklda ifodalash uchun (2.19) hadlarini Δm ga bo'lamiz va $\Delta m = \Delta \vartheta / g = \rho \Delta V_1 \Delta t - \rho \Delta V_2 \Delta t$ ni hisobga olsak, unda (2.16) ga asoslanib, Bernulli tenglamasini qayta yozamiz:

$$gh_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = gh_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} = \text{const.} \quad (2.23)$$

(2.23) tenglamaning har bir hadi energetik mazmunga ega. Tenglama solishtirma energiyalar yig'indisidan tashkil topgan va o'zgarmas kattalik ekanligini ifodalaydi. Suyuqlikning solishtirma energiyasi deyilganda, massa, kuch yoki hajm birligidagi energiya tushuniladi. Haqiqatan ham, agar elementar massali suyuqlik molekulasini olsak, u biror h balandligida energiya zaxirasiga ega bo'lsa-da, massa birligiga to'g'ri keladigan energiya miqdori esa $\Delta mgh/\Delta m = gh$ teng bo'ladi. Suyuqlikning Δm massali zarrachasi p bosim ta'sirida potensial energiyasi $\Delta mgp/\rho g$ teng bo'lgan $p/\rho g$ balandlikka ko'tariladi. Potensial energiyani Δm ga bo'lib, bosimning solishtirma zaxirasi p/ρ topiladi.

Suyuqlikning massa birligiga to'g'ri keladigan energiya va solishtirma bosim zaxirasi yig'indisini suyuqlikning solishtirma potensial energiyasi deyiladi.

(2.23) tenglamaning uchinchi hadidagi $v^2/2$ suyuqlikning massa birligiga mos keluvchi solishtirma kinetik energiyadir.

Bernulli tenglamasining energetik mazmuni suyuqlikning elementar naychasining solishtirma to'la energiyasi naychanning istalgan kesimida o'zgarmasligini bildiradi.

Demak, Bernulli tenglamasi mexanik energiyaning saqlanish qonuni harakatlanayotgan ideal suyuqlikka tatbiqidan iborat ekan.

4.4. Suyuqlikning elementar nayi va real suyuqlik oqimi uchun Bernulli tenglamasi

Real suyuqlikning elementar nayi harakatini o'rganishda, harakatga qarshilik ko'rsatuvchi, qovushqoqlik bilan bog'liq bo'lgan ichki ishqalanish kuchining paydo bo'lishini va uni yengishga sarf bo'lgan energiya hisobiga oqimning kinetik energiyasi yoki tezlik dami tushishini e'tiborga olish kerak. Shuning uchun ham, elementar nayning umumiy energiyasi, suyuqlik oqimi bo'ylab, uning kesimlarida kamayib boradi.

Faraz qilaylik, real suyuqlikning elementar nayini ikkita kesimiga mos keluvchi holatlar uchun Bernulli tenglamasi quyidagi ko'rinishda bo'lsin:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_w, \quad (2.24)$$

bu yerda, h_w — tezlik damining isrofi.

Ideal suyuqlikning elementar nayini istalgan nuqtalariga mos keluvchi hamma kesimlaridagi tezliklari bir xil bo'lsa-da, real suyuqlik oqimining kesimlaridagi tezliklar taqsimoti esa, oqim harakati tartibiga bog'liq bo'lgan muayyan qonuniyatga bo'ysunadi. Shuning uchun oqimning tirik kesimlaridagi tezliklari bir xil bo'la olmaydi. Uning tezligi ichki ishqalanish va suyuqlik bilan kontaktlashuvchi ho'llangan devor ta'sirida kamayib boradi. Natijada harakatlanayotgan suyuqlik kinetik energiyasi kamayadi. O'rta tezlik qiymatidan foydalanib hisoblangan kinetik energiya qiymati haqiqiyga mos kelmaydi.

Shuning uchun (2.24) tenglamaga suyuqlik oqimidagi tezliklar taqsimotining notekisligini e'tiborga oluvchi tuzatma koeffitsiyent kiritish yo'li bilan real suyuqlik oqimi tenglamasi topiladi:

$$h_1 = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w, \quad (2.25)$$

bu yerda, $\alpha_{1-2} = v^3 \Delta S / (u^3 S)$ — Koriolis koeffitsiyenti ($\alpha = 1,05 - 1,15$) bo'lib, real suyuqlik oqimining turli kesimlarida uning tezliklari turlichaligini ifodalaydi.

Bu tuzatma koeffitsiyentni 1836-yilda fransuz olimi Koriolis kiritganligi sababli uning nomi bilan Koriolis yoki tezlik koeffitsiyenti deb yuritiladi. Bu koeffitsiyent suyuqlik oqimining tirik kesimidagi tezliklar taqsimotiga bog'liq va suyuqlik harakatining turidan aniqlanadi. Suyuqlik oqimining tirik kesimidagi tezliklar bo'yicha taqsimoti bir tekis bo'lgandagina bu koeffitsiyent birdan katta bo'ladi, ammo bunday holat amalda juda ham kam uchraydi, lekin u birga ham teng bo'lishi mumkin. Tirik kesimdagi tezliklarning notekis taqsimoti qancha katta bo'lsa, bu koeffitsiyenti shuncha katta bo'ladi.

Suyuqlikning silindrik quvurdagi laminar oqimi uchun tajribada aniqlangan Koriolis koeffitsiyenti $d = 2$, turbulent oqimi uchun esa $\alpha = 1,04 - 1,1$ atrofida bo'ladi.

Amaliy hisoblashlarda, suyuqlik nayining hammasi bir xil tezlik bilan harakatlanadi, deb qabul qilinadi va bu koeffitsiyentni birga tenglashtirib olinadi. Bu taxmin ayrim shartli holatlarni e'tiborga olmaganda, har qanday turbulent oqim uchun to'g'ri. Shunga ko'ra, yozuvda o'rta tezlik belgisi tushirib qoldirilsa-da,

hamma joyda o'rtta tezlik deb tushuniladi. Shu sababdan ham siqilmaydigan tomchi-suyuqlik uchun Bernulli tenglamasining yozilishi elementar naycha uchun yozilgan tenglama (2.24) bilan bir xil bo'ladi.

(2.24) tenglamadagi h_w suyuqlik harakati yo'lidagi turli xil mahalliy to'siqlarda hosil bo'ladigan qarshiliklarni yengishda damning tushishini ifodalaydi. Gidravlik qarshiliklar ikki xil bo'ladi:

1. Oqimni chegaralovchi devorga suyuqlik zarrachalarining ishqalanishi va uning tezliklarini oqim bo'yicha notekis taqsimoti va qo'shni qatlamlar orasidagi ishqalanish ta'sirida *suyuqlik damining tushishini chiziqli qarshilik* deyiladi va uni h_f bilan belgilanadi.

2. Suyuqlik harakati yo'lida uchraydigan turli xil to'siqlar (ventillar, surilma klapan va zadviykalar, egrilangan suyuqlik yo'li, burum, uchlama klapan va sh.k.) ta'sirida oqimning tezligi uning qiymati va yo'nalishi o'zgarishi hisobiga damning pasayishini *mahalliy isrof* deyiladi va uni h_m deb belgilanadi.

Demak, oqimning ikkita kesimlari oralig'ida damning isrof bo'lishiga ikki turdagi yo'qotishlar (h_f va h_m) sabab bo'lar ekan.

Chiziqli qarshilik va mahalliy isroflarni hisobga olib, suyuqlik oqimi uchun Bernulli tenglamasi quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f + h_m. \quad (2.26)$$

Real suyuqlik oqimi harakatidagi dam isrofini aniqlash ancha murakkab masala va ko'p sonli izlanishlarni talab etadi.

Suyuqlik oqimidagi bosimni **pyezometr** asbobi bilan o'lchanadi. Pyezometr yupqa devorli ingichka nay bo'lib, unda suyuqlik $p/\rho g$ balandlikka ko'tariladi. Suyuqlik oqimining to'la energiyasini o'lchashda Pitoning gidrodinamik nayi qo'llaniladi. Pito nayi bir uchi 90° burchakka bukilgan ingichka nay bo'lib, uning bukilgan ochiq uchi oqim yo'nalishiga qarshi qilib, uzun tomonini esa tik o'rnatiladi (2.5-rasmga qarang).

Qiya o'rnatilgan suyuqlik nayining I—I kesimi (ingichka joyi)dagi oqim tezligi katta bo'lgani uchun pyezometr kamroq, aksincha, gidrodinamik (Pito) nayi ko'proq bosimni ko'rsatadi. II—II kesimda esa pyezometr I—I kesimga nisbatan kattaroq. Pito nayi, o'z navbatida, avvalgisiga nisbatan kamroq bosimni

ko'rsatadi. Bunga asosiy sabab, suyuqlik oqimining kesimi kichik bo'lganida oqim tezligi ortishi hisobiga gidrostatik bosim kamayadi va aksincha.

Suyuqlikning real energiyasi oqim kesimi bo'ylab kamayib borishiga asosiy sabab bosim isrofi hisobiga, kinetik va potensial energiyalari kamayishini tasavvur qilish Bernulli tenglamasi-ning grafigini tushunishga yordam beradi (2.5-rasmga qarang). Boshlang'ich energiya chizig'i bilan energiya chizig'i orasida yo'qotilgan energiyalar kesmalari hosil bo'ladi.

Bernulli va suyuqlik sarfi tenglamalaridan ko'rinadiki, oqimning ko'ndalang kesimi yuzasi kamaysa, suyuqlik oqimi tezligi va kinetik energiyasi ortadi, uning bosimi va potensial energiyasi esa kamayadi. Aksincha, oqimning kesim yuzasi ortsa, uning tezligi va kinetik energiyasi kamayadi, bosimi va potensial energiyasi ortadi.

Demak, Bernulli tenglamasi ideal suyuqlik nayi uchun mexanik energiyaning saqlanish qonunini ifodalasa, real suyuqlik oqimi uchun esa oqimdagi turli xil isroflarni hisobga oluvchi energiyaning balans tenglamasi ekan.

Nazorat savollari

1. Hidrodinamika nimani o'rganadi? Suyuqlikning laminar va turbulent tartibli oqishiga nimalar sabab bo'ladi?
2. Suyuqlikning barqaror va nobarqaror harakati deb nimaga aytiladi?
3. Suyuqlikning tekis va notekis harakati deganda nimani tushunasiz?
4. Suyuqlikning quvurdagi damli va damsiz harakati nima?
5. Sarf turlarini ayting va ularning formulalarini yozing.
6. Ideal va real suyuqliklar uchun Bernulli tenglamalarini yozing va ularning ma'nosini tushuntiring.
7. Laminar va turbulent tartibli harakatlanayotgan suyuqlik oqimi zarralarining tezliklar bo'yicha taqsimotini ayting.
8. Hidrodinamik, pyezometrik, geometrik dam va tezlikni tushuntiring hamda formulalarini yozing.
9. Suyuqlikning elementar naychasi nima va undagi suyuqlik harakatining turi?
10. Dam isrofi nima va uning formulasini yozing.
11. Hidrodinamik nay nima? Koriolis koeffitsiyenti nima?
12. Mahalliy gidravlik qarshiliklar deb nimaga aytiladi?