7 дәріс

Құбырдағы турбулентті ағыс. Жылдамдық пен гидродинамикалық кедергі арасындағы байланыс. 1/7 дәрежесіндегі жылдамдықтың үлестірілу заңы

Дәрістің мақсаты

Құбырдағы турбуленттік жылдамдық профилін гидравликалық кедергімен байланыстыру, 1/7 дәрежелік заңның мағынасын түсіндіру және қысым шығынын есептеу тәртібін меңгеру.

Дәрістің мазмұны

1. Құбырдағы турбуленттік ағыс сипаттамалары.
2. Қабырғалық әсер және жылдамдықтың таралуы.
3. 1/7 дәрежелік заң және оның шектеулері.
4. Орташа және ең үлкен жылдамдықтар.
5. Дарси–Вейсбах теңдеуі және Блазиус тәуелділігі.

1. Кіріспе

Сұйықтар мен газдардың құбыр арқылы қозғалысы инженерлік практикада кеңінен қолданылады. Құбыр ішіндегі ағын екі режимде жүруі мүмкін: **ламинарлық** және **турбуленттік**.

- **Ламинарлық ағыс** кезінде сұйықтың бөлшектері параллель қабаттар түрінде қозғалып, бір-бірімен араласпайды.
- **Турбуленттік ағыс** кезінде ағын ретсіз, құйындар мен лүпілдер арқылы қозғалады, ал энергия ірі құйындардан ұсақтарына дейін беріледі.

Құбырлардағы турбуленттік ағын — энергия тасымалдаудың ең жиі кездесетін түрі. Сондықтан оның гидродинамикалық қасиеттерін, жылдамдықтың таралуын және үйкеліс кедергісін зерттеу жылу энергетикасы, гидравлика және технологиялық жүйелер үшін аса маңызды.

2. Турбуленттік ағыстың сипаттамалары

Турбуленттік қозғалыс кезінде жылдамдықтың нақты мәні уақыт бойынша үнемі өзгеріп отырады:

$$u(t) = \overline{u} + u'(t)$$

мұндағы:

- $\overline{u}$ – уақыт бойынша орташа жылдамдық,
- u′(t) – лүпілдік (пульсациялық) жылдамдық компоненті.

Орташаланған шамаларды пайдалану арқылы турбуленттік ағынның негізгі заңдылықтарын сипаттауға болады.

Рейнольдс саны турбуленттік режимнің басталу шартын анықтайды:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Құбырдағы турбуленттік ағыс үшін Re>4000 болғанда, қозғалыс толық турбулентті болып саналады.

3. Жылдамдықтың таралуы және қабырғалық әсер

Құбырдың осі бойында ағын жылдамдығы ең жоғары, ал қабырғаға жақын аймақта тұтқырлық әсерінен жылдамдық төмендейді.

Турбуленттік араласу нәтижесінде импульс қабырғадан орталыққа қарай және керісінше беріледі.

Тәжірибелік түрде анықталғандай, жылдамдық профилі **логарифмдік** немесе **дәрежелік (степенной)** заңға бағынады.

Логарифмдік заңды Прандтль мен Карман ұсынған болса, дәрежелік (1/7 дәрежелі) заңды алғаш рет тәжірибелік түрде **Никурдзе** және **Блазиус** анықтаған.

4. 1/7 дәрежесіндегі жылдамдықтың үлестірілу заңы

Турбуленттік құбыр ағынында жылдамдықтың таралуы келесі эмпирикалық өрнекпен сипатталады:

$$\frac{u}{u_{max}} = \left(\frac{r}{R}\right)^{1/n}$$

мұндағы:

- u – радиус бойынша жергілікті жылдамдық,
- u_{max} – құбыр осіндегі ең үлкен жылдамдық,
- r – құбыр осінен зерттеліп отырған нүктеге дейінгі қашықтық,
- R – құбыр радиусы,
- n – көрсеткіш (эксперимент бойынша турбуленттік ағын үшін n=7).

Сондықтан бұл тәуелділік **1/7 дәрежелі жылдамдық заңы** деп аталады:

$$\frac{u}{u_{max}} = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/7}$$

Бұл заң құбырдағы турбуленттік ағын үшін жылдамдықтың нақты үлестірілуін жеткілікті дәл сипаттайды.

5. Орташа жылдамдық пен максималды жылдамдықтың қатынасы

Орташа жылдамдық uavgu_{avg}uavg келесі өрнекпен табылады:

$$u_{avg} = \frac{2}{R^2}\int_0^R u(r)\, r\, dr$$

Осыны 1/7 дәрежелі заңға қойып, интегралдағанда:

$$\frac{u_{avg}}{u_{max}} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} = 0.817 \quad (\text{егер } n = 7 \text{ болса})$$

Яғни орташа жылдамдық шамамен максималдың **82%** шамасында болады:

$$u_{avg} \approx 0.82\, u_{max}$$

6. Гидродинамикалық кедергі және үйкеліс коэффициенті

Құбырдағы сұйықтың қозғалысы үйкеліс күштеріне қарсы жүзеге асады. Бұл күштерді сипаттайтын негізгі параметр — **үйкеліс коэффициенті (λ)**.

Энергия теңдеуі (Бернулли теңдеуі) бойынша үйкеліс шығыны былай өрнектеледі:

$$h_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

мұндағы:

- h_f – үйкеліс шығынындағы напор жоғалуы,
- L – құбыр ұзындығы,
- D – құбыр диаметрі,
- υ – орташа жылдамдық,
- g – еркін түсу үдеуі.

7. Үйкеліс коэффициентінің Рейнольдс санына тәуелділігі

Турбуленттік режимде үйкеліс коэффициенті Рейнольдс санына тәуелді болады.

Көптеген тәжірибелер нәтижесінде **Блазиус теңдеуі** алынған:

$$\lambda = 0.3164\, Re^{-0.25}$$

Бұл өрнек 4000<Re<10^5 диапазонында жақсы сәйкес келеді.

Кейінірек Никурдзе мен Колбрук құбырдың кедір-бұдырлығын ескеретін жалпылама өрнек ұсынған:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right)$$

мұндағы ε\varepsilonε – қабырға кедір-бұдырлығы.

8. Жылдамдық пен гидродинамикалық кедергінің байланысы

Құбырдағы үйкеліс шығыны мен жылдамдық арасындағы тәуелділік келесідей:

$$h_f \sim v^m$$

мұндағы:

- m=1 – ламинарлық режим үшін,
- m≈1.75−2.0 – турбуленттік режим үшін.

Бұл қатынас көрсетеді, турбуленттік қозғалыста жылдамдықты арттырғанда үйкеліс кедергісі күрт өседі, өйткені турбуленттік құйындардың энергия шығыны көбейеді.

9. 1/7 дәрежелі заңның физикалық мәні

1/7 дәрежелі заң — бұл турбуленттік араласудың нәтижесінде импульс алмасудың қабырға мен орталық аймақ арасында бірқалыпты жүретінін көрсететін **эмпирикалық** заң.

Бұл заң шынайы турбуленттік ағынның орташа жылдамдық профилін сипаттайды және инженерлік есептерде кеңінен қолданылады:

- құбырдағы үйкеліс коэффициентін табу,
- ағын шығынын анықтау,
- турбуленттік шекаралық қабаттың қалыңдығын бағалау,
- ағынның жылуалмасу қасиеттерін есептеу.

10. Салыстырмалы талдау

Режим түрі	Жылдамдық профилі	Орташа жылдамдық қатынасы u_{avg}/u_{max}	Үйкеліс коэффициенті
Ламинарлық	Параболалық ($u/u_{max} = 1 - (r/R)^2$)	0.5	$\lambda = 64/Re$
Турбуленттік	1/7 дәрежелі заң	0.82	$\lambda = 0.3164 Re^{-0.25}$

Кестеден көрініп тұрғандай, турбуленттік режимде жылдамдық профилі бірқалыпты, ал үйкеліс коэффициенті азаяды, бірақ энергия шығыны жалпы жоғары болады.

11. Қолданбалы мысал

Мысалы, су υ=2.5 м/с жылдамдықпен D=0.1 м диаметрлі құбырдан ағады, тұтқырлық $\mu=1.0\times10^{-3}$ Па·с, тығыздық ρ=1000 кг/м³.

1. **Рейнольдс саны:**

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{1000 \times 2.5 \times 0.1}{1.0 \times 10^{-3}} = 2.5 \times 10^5$$

→ Ағыс турбулентті.

2. **Блазиус теңдеуі бойынша:**

$$\lambda = 0.3164 Re^{-0.25} = 0.3164 (2.5 \times 10^5)^{-0.25} \approx 0.017$$

3. **Жоғалту биіктігі:**

Құбыр ұзындығы L=20 м болса:

$$h_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = 0.017 \cdot \frac{20}{0.1} \cdot \frac{2.5^2}{2 \cdot 9.81} \approx 1.08 \text{ м}$$

Яғни үйкеліс салдарынан 1 метр шамасында энергия жоғалады.

12. Қорытынды

Құбырдағы турбуленттік ағынның негізгі ерекшеліктері:

- Жылдамдық профилі орталықта бірқалыпты, қабырға маңында күрт төмендейді;
- Импульс пен энергия алмасуы турбуленттік араласудың әсерінен жүреді;
- Үйкеліс коэффициенті Рейнольдс санына тәуелді;
- 1/7 дәрежелі жылдамдық заңы құбыр ағынын сипаттайтын әмбебап эмпирикалық қатынас болып табылады.

Бұл заң мен Блазиус өрнегі гидравликалық есептерде, жылу және масса алмасу процестерін талдауда кеңінен қолданылады.

Олар Прандтльдің турбуленттік тұтқырлық теориясының тәжірибелік растамасы ретінде қарастырылады.

Өзін өзі тексеруге арналған сұрақтар

1. Құбырдағы турбуленттік жылдамдық профилі ламинарлық профильден қалай ерекшеленеді?
2. 1/7 дәрежелік заңдағы координаталар мен параметрлер нені білдіреді?
3. Орташа жылдамдықты профиль бойынша интегралдау арқылы қалай табады?
4. Орташа жылдамдық пен ең үлкен жылдамдықтың қатынасы неге бірден кіші?
5. Дарси–Вейсбах теңдеуіндегі үйкеліс коэффициенті нені сипаттайды?
6. Блазиус тәуелділігін қолданғанда қандай шарттарды тексеру қажет?
7. Құбыр ұзындығы, диаметрі және жылдамдығы қысым шығынына қалай әсер етеді?
8. Дарси және Фаннинг үйкеліс коэффициенттерін неге ажырату қажет?