9 дәріс

Рейнольдс санының өте үлкен мәндерінде құбырдың гидродинамикалық кедергісінің әмбебап заңы

Дәрістің мақсаты

Турбуленттік құбыр ағысындағы гидравликалық кедергіні бағалау, Кольбрук–Уайт теңдеуі мен Муди диаграммасын қолдану және гидравликалық тегіс, өтпелі кедір-бұдырлы, толық кедір-бұдырлы режимдерді ажырату.

Дәрістің мазмұны

1. Гидравликалық кедергі және Дарси коэффициенті.
2. Рейнольдс саны мен салыстырмалы кедір-бұдырлық.
3. Кольбрук–Уайт теңдеуі.
4. Гидравликалық тегіс және толық кедір-бұдырлы режимдер.
5. Муди диаграммасы және есептеу тәртібі.

1. Кіріспе

Гидродинамикалық кедергі – сұйықтың қозғалысына қарсы әсер ететін күштер жиынтығы, ол ағын энергиясының бір бөлігін үйкеліс пен турбуленттік толқындарға айналдырады. Құбырлардағы гидравликалық есептердің негізгі элементі болып табылатын үйкеліс коэффициенті (λ) Рейнольдс саны (Re) мен құбыр бетінің кедір-бұдырлығына (ε/d) тәуелді.

Рейнольдс санының үлкен мәндерінде (Re > 10^5) ламинарлық құрылым толық бұзылады, турбуленттік қозғалыс орнығады, ал тұтқырлықтың рөлі салыстырмалы түрде азаяды. Мұндай режимде гидродинамикалық кедергінің сипаты сұйықтың физикалық қасиеттерінен гөрі қабырғаның кедір-бұдырлығымен және инерциялық күштермен анықталады.

Осы лекцияда құбырдың үйкеліс коэффициентінің әмбебап заңы қарастырылады және оның әртүрлі ағыс режимдеріндегі тәуелділіктері талданады.

2. Гидродинамикалық кедергі және үйкеліс коэффициенті

Құбырмен ағатын сұйықтың қозғалысына кедергі тудыратын негізгі фактор – **қабырға жанындағы үйкеліс**. Бұл үйкеліс ағынның кинетикалық энергиясын ішкі энергияға айналдырып, қысымның төмендеуін тудырады.

Қысымның төмендеуі Дарси–Вейсбах теңдеуімен өрнектеледі:

$$h_f = \lambda \frac{L}{d} \frac{w^2}{2g},$$

мұндағы:

- h_f – үйкеліс шығыны (м),
- λ – үйкеліс коэффициенті,
- L – құбыр ұзындығы,
- d – диаметрі,
- w – орташа ағын жылдамдығы,

• g – еркін түсу үдеуі.

Үйкеліс коэффициенті ағынның турбуленттік құрылымына және Рейнольдс санына тәуелді. Рейнольдс саны неғұрлым жоғары болса, соғұрлым инерциялық күштердің рөлі артады, ал тұтқырлықтың әсері азаяды.

3. Рейнольдс санының үлкен мәндеріндегі ағыс ерекшелігі

Турбуленттік ағыс кезінде жылдамдық профилі қабырға маңында біркелкі емес.

Құбырдың ортасында қозғалыс инерциямен жүреді, ал қабырға маңында **жылдамдық градиенті жоғары**, сондықтан энергия шығыны көбіне осы аймақпен анықталады.

Рейнольдс саны өте үлкен болғанда ($Re > 10^6$):

• **ішкі үйкеліс** әсері азаяды;

• **қабырғаның кедір-бұдырлығы** басты рөл атқарады;

• үйкеліс коэффициенті Re-ге тәуелсіз бола бастайды.

Осы кезде ағын толық дамыған турбуленттік режимге өтеді және гидродинамикалық кедергі тұрақтанады.

4. Әмбебап заң және формулалар

Үйкеліс коэффициентінің тәуелділігі эксперименттік жолмен зерттеліп, **Никурадзе, Кольбрук және Муди** еңбектері арқылы анықталған. Бұл тәуелділік төмендегідей жалпыланады:

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

– бұл **Кольбрук–Уайт теңдеуі**.

Бұл теңдеу **әмбебап** деп аталады, себебі ол:

• тегіс және кедір-бұдырлы құбырларға да жарамды;

• Re санының барлық диапазонын қамтиды ($4000 < Re < 10^7$).

Тегіс қабырғалы құбырлар үшін ($\varepsilon = 0$):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2\log_{10}(Re\sqrt{\lambda}) - 0.8$$

Толық кедір-бұдырлы қабырғалар үшін (Re → ∞):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2\log_{10}\left(\frac{d}{\varepsilon}\right) + 1.74$$

Бұл жағдайда λ тұрақты болады және тек салыстырмалы кедір-бұдырлыққа тәуелді.

5. Муди диаграммасы және әмбебап заңның тәжірибелік қолданылуы

Инженерлік практикада есептеу үшін көбіне **Муди диаграммасы** қолданылады – онда λ мәні Re және ε/d арқылы графикалық түрде беріледі.

Бұл диаграмма турбуленттік және өтпелі аймақтарды қамтиды және барлық практикалық жағдайларға жарамды.

Негізгі ерекшеліктері:

1. Ламинарлы аймақ ($Re < 2300$) – $\lambda = 64/Re$.

2. Өтпелі аймақ ($2300 < Re < 4000$) – тұрақсыз, тәжірибелік тәсіл қажет.

3. Тегіс құбырдағы турбуленттік аймақ ($4\times10^3 < Re < 10^5$) – $\lambda \approx 0.3164/Re^{0.25}$ (Блазиус формуласы).

4. Толық кедір-бұдырлы аймақ ($Re > 10^6$) – λ Re-ге тәуелсіз, тек ε/d арқылы анықталады.

Муди диаграммасы ағын сипаттамаларын бағалау мен жобалау кезінде ең қолайлы құрал болып табылады.

6. Рейнольдс санының үлкен мәндерінде ағын режимінің физикалық мағынасы

Рейнольдс саны өскен сайын ағыста турбуленттілік күшейеді, яғни қозғалыс құрылымы хаотикалық, бірақ статистикалық тұрғыдан тұрақты күйге ауысады. Қабырғаның беті кедір-бұдыр болған сайын, айналмалы вихрьлер (вортекстер) қабырғадан ажырамай, энергия шығынын арттырады.

Физикалық тұрғыдан бұл құбылысты **Прандтльдің "араласу жолы" теориясы** және **Карманның ұқсастық гипотезасы** жақсы түсіндіреді:

- Қабырға маңындағы жылдамдық профилі логарифмдік сипатта болады;
- Турбуленттік импульс тасымалының қарқындылығы кедір-бұдырлық биіктігімен анықталады;
- Үйкеліс күші мен энергия шығыны тұрақты мәнге жақындайды.

7. Қорытынды

1. **Рейнольдс санының үлкен мәндерінде** гидродинамикалық кедергі тұрақты сипат алады және Re-ге тәуелді болмайды.

2. Әмбебап заң – бұл Кольбрук–Уайт теңдеуі мен Муди диаграммасының біріктірілген көрінісі.

3. Құбырдың гидродинамикалық кедергісі тек қабырға кедір-бұдырлығына тәуелді болып қалады.

4. Мұндай режимдер ірі гидравликалық жүйелерде, су және газ құбырларында, желдеткіш арналары мен жылуалмастырғыш аппараттарында кездеседі.

Қорытындылай келе, әмбебап заң инженерлік есептеулерде турбуленттік ағыстарды дәл сипаттауға мүмкіндік береді және энергия тиімділігін арттыруда маңызды рөл атқарады.

Өзін өзі тексеруге арналған сұрақтар

1. Гидравликалық кедергі қысым шығыны және арын шығыны арқылы қалай өрнектеледі?

2. Салыстырмалы кедір-бұдырлық қалай анықталады?

3. Кольбрук–Уайт теңдеуін шешу үшін қандай бастапқы деректер қажет?

4. Гидравликалық тегіс және толық кедір-бұдырлы режимдердің айырмашылығы қандай?

5. Үйкеліс коэффициенті қандай жағдайда Re санына әлсіз тәуелді болады?

6. Муди диаграммасынан үйкеліс коэффициентін анықтау тәртібін түсіндіріңіз.

7. Тек Re мәніне қарап толық кедір-бұдырлы режим туралы қорытынды жасауға бола ма?

8. Үйкеліс коэффициенті тұрақты болғанда жылдамдық артса, қысым шығыны өзгере ме?