3 дәріс

# Турбулентті қозғалыстар туралы негізгі деректер. Орташаланған және лүпілдік қозғалыстар. Қосымша (болжамалы) турбуленттік кернеулер. Кернеулер тензоры. Турбулентті қозғалыстар үшін Рейнольдс теңдеулері

**Дәрістің мақсаты**

Турбуленттік ағысты орташа және лүпілдік шамалар арқылы сипаттау, Рейнольдс кернеулерінің мағынасын ашу және орташаланған қозғалыс теңдеулеріндегі тұйықтау мәселесін түсіндіру.

**Дәрістің мазмұны**

1. Турбуленттік ағыстың негізгі ерекшеліктері.
2. Жылдамдық пен қысымды Рейнольдс бойынша жіктеу.
3. Лүпілдер арқылы импульстің тасымалдануы.
4. Рейнольдс кернеулері және тензор компоненттері.
5. Орташаланған қозғалыс теңдеулері және тұйықтау.

## 1. Кіріспе

Сұйықтар мен газдардың қозғалысын зерттегенде олардың екі негізгі режимі айқындалады: **ламинарлық** және **турбуленттік** қозғалыс.

- Ламинарлық қозғалыс – ағын сызықтарының реттелген, бір-бірімен араласпай, қабат бойынша қозғалуы.
- Турбуленттік қозғалыс – ағын ішінде әртүрлі масштабтағы құйындардың, лүпілдердің (пульсациялардың) пайда болуы, ағынның ретсіздігі және энергияның араласуы.

Турбуленттік қозғалыстар табиғатта да, техникада да өте жиі кездеседі: атмосфералық ауа ағындары, өзендердегі су ағыны, құбыр ішіндегі сұйықтың қозғалысы, авиациялық және энергетикалық құрылғылардағы газ динамикасы.

## 2. Турбулентті қозғалыстардың негізгі ерекшеліктері

### 2.1 Турбулентті қозғалыстың сипаттары

- Ағын жылдамдығы уақыт бойынша үнемі өзгеріп отырады.
- Лүпілдік (пульсациялық) қозғалыстар негізгі орташа қозғалысқа қосылады.
- Қозғалыстың масштабы үлкен құйындардан өте ұсақ құйындарға дейін тарайды.
- Энергия ірі құйындардан ұсақ құйындарға беріліп, ақырында тұтқырлық әсерінен жылуға айналады.

### 2.2 Рейнольдс санының рөлі

Турбуленттік қозғалыс **Рейнольдс саны** үлкен болғанда пайда болады:

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

мұндағы ρ – тығыздық, v – жылдамдық, L – сипаттамалық өлшем, μ– динамикалық тұтқырлық.

- **Re < 2300** → ламинарлық қозғалыс (құбыр ағыны үшін).
- **2300 < Re < 4000** → өтпелі аймақ.
- **Re > 4000** → турбуленттік қозғалыс.

**3. Орташаланған және лүпілдік қозғалыстар**

Турбулентті қозғалысты зерттеу үшін Рейнольдс орташа шамалар әдісі қолданылады.

Жылдамдық векторы мына түрде жазылады:

$$u_i = \overline{u_i} + u_i'$$

мұндағы:

- $\overline{u_i}$ – уақыт бойынша орташаланған жылдамдық,
- $u_i'$ – лүпілдік (ауытқу) жылдамдық.

Орташаланған жылдамдық ағынның негізгі бағытталған қозғалысын сипаттаса, лүпілдік бөлік турбуленттік құйындар мен ретсіздікке жауап береді.

**Мысал:**

Құбыр ішіндегі ауа қозғалысында орташа жылдамдық $\bar{u}$=5 м/с, бірақ нақты сәттік жылдамдық 4.7–5.3 м/с арасында өзгеріп отырады. Мұндағы айырмашылық – лүпілдік бөлік.

**4. Турбуленттік кернеулер және олардың болжамалы табиғаты**

Турбуленттік қозғалыста жылдамдықтың лүпілдік компоненттері қосымша **кернеулерді** тудырады.

**4.1 Турбуленттік кернеулер**

Тұтқырлық кернеулеріне қосымша мынадай шамалар пайда болады:

$$\tau_{ij} = -\rho\overline{u_i'u_j'}$$

Мұны **Рейнольдс кернеулері** немесе **қосымша турбуленттік кернеулер** деп атайды. Олар турбуленттік құйындардың әсерінен туындайды.

**4.2 Болжамалылық (гипотезалық сипат)**

Турбуленттік кернеулер – тікелей өлшеуге қиын шамалар. Сондықтан оларды модельдеу үшін **эмпирикалық гипотезалар** (мысалы, Буссинеск гипотезасы) қолданылады. Бұл гипотеза бойынша турбуленттік кернеулер тұтқырлық кернеулеріне ұқсас түрде беріледі, бірақ қосымша «турбуленттік тұтқырлық коэффициенті» енгізіледі.

**5. Кернеулер тензоры**

Қозғалысты толық сипаттау үшін турбуленттік кернеулерді **тензор түрінде** қарастыру қажет:

$$\tau_{ij} = -\rho\overline{u_i' u_j'}$$ ,

Бұл тензордың 6 тәуелсіз компоненті бар (симметрияға байланысты).

- Диагональ элементтері $(\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz})$ – қалыпты кернеулер.
- Қиылысқан элементтері $(\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz})$ – жанама кернеулер.

Тензор турбулентті қозғалыстағы энергия алмасу процесін сипаттайды.

**6. Рейнольдс теңдеулері**

**6.1 Негізгі түрі**

Навье–Стокс теңдеуін орташалағаннан кейін **Рейнольдс теңдеулері** алынады:

$$\rho\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \mu\frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\overline{u_i' u_j'}\right)$$

Мұнда соңғы мүше – **Рейнольдс кернеулерінің дивергенциясы**.

**6.2 Физикалық мәні**

- Бірінші үш мүше ламинарлық қозғалыс теңдеулеріне ұқсас.
- Соңғы мүше турбуленттік құйындардың қосымша әсерін ескертеді.

**6.3 Турбуленттік жабу проблемасы**

Рейнольдс теңдеулері орташаланған жылдамдықты есептеу үшін қосымша 6 теңдеуді қажет етеді, бірақ олар табиғи түрде берілмейді. Бұл мәселе **«жабу проблемасы»** деп аталады.
Оны шешу үшін турбуленттілік модельдері қолданылады:

- **k–ε моделі**
- **k–ω моделі**
- **SST (Shear Stress Transport)**
- RANS, LES, DNS әдістері.

**7. Қолданбалы мысалдар**

1. **Құбырдағы ағын:**
   - Турбуленттік режимде үйкеліс коэффициенті жоғары болады.
   - Энергия шығынын есептеу үшін Рейнольдс теңдеулеріндегі турбуленттік кернеулер ескеріледі.
2. **Авиация:**
   - Қанаттың үстіндегі турбуленттік қабат көтергіш күш пен кедергіні өзгертеді.
   - Турбуленттік модельдер аэродинамикалық сипаттамаларды дұрыс есептеуге көмектеседі.
3. **Жылу алмасу:**
   - Турбуленттік ағын жылуды тиімдірек тасымалдайды.
   - Қосымша турбуленттік кернеулер энергия араласуын арттырады.

**8. Қорытынды**

Турбуленттік қозғалыстар – гидроаэродинамиканың ең күрделі әрі маңызды бөлімдерінің бірі.

- Турбуленттік қозғалыста жылдамдық екі бөлікке бөлінеді: орташа және лүпілдік.
- Лүпілдер қосымша турбуленттік кернеулерді тудырады.
- Бұл кернеулерді сипаттау үшін кернеулер тензоры енгізіледі.
- Орташаланған Навье–Стокс теңдеулерінен Рейнольдс теңдеулері шығады.
- Турбуленттік қозғалысты шешу үшін әртүрлі эмпирикалық және сандық модельдер қолданылады.

Осы білімдер инженерлік есептерде – құбыр жүйелерін жобалауда, авиацияда, энергетикалық қондырғыларда және жылуалмасу процестерінде кеңінен қолданылады.

**Өзін өзі тексеруге арналған сұрақтар**

1. Турбуленттік қозғалыстың көпмасштабты сипаты нені білдіреді?
2. Лездік жылдамдық орташа және лүпілдік бөліктерге қалай жіктеледі?
3. Лүпілдің орташа мәні нөл болса да, оның квадратының орташа мәні неге нөл емес?
4. Рейнольдс кернеулерінің физикалық пайда болуын түсіндіріңіз.
5. Кернеулер тензорының диагональ және диагональдан тыс компоненттері нені сипаттайды?
6. Турбуленттік кернеулерді жазғанда таңба келісімін не үшін көрсету қажет?
7. Рейнольдс теңдеулері Навье–Стокс теңдеулерінен қалай алынады?
8. Орташаланған теңдеулер неге қосымша модельдерді қажет етеді?