10 дәріс

Жазық беттегі турбулентті шекаралық қабат

Дәрістің мақсаты

Жазық пластинадағы турбуленттік шекаралық қабаттың қалыптасуын түсіндіру, жылдамдық профилін, қабат қалыңдығын және үйкеліс кедергісін бағалау, жергілікті және орташа коэффициенттерді ажырату.

Дәрістің мазмұны

1. Жазық бетте шекаралық қабаттың қалыптасуы.
2. Жергілікті Рейнольдс саны және режим ауысуы.
3. Турбуленттік араласу және жылдамдық профилі.
4. Қабырға маңындағы аймақтардың құрылымы.
5. Шекаралық қабат қалыңдығы мен үйкеліс коэффициенті.
6. Инженерлік қолданылу және есептеу шарттары.

Кіріспе

Сұйықтар мен газдардың қозғалысын зерттейтін гидродинамика мен аэродинамика ғылымдарында шекаралық қабат ұғымы маңызды орын алады. Шекаралық қабат – ағын қозғалысы кезінде қатты дене бетіне жақын орналасқан және тұтқырлық әсерінен ағын жылдамдығы нөлден бастап негізгі ағын жылдамдығына дейін өзгеретін аймақ. Бұл құбылысты алғаш рет неміс ғалымы **Людвиг Прандтль** 1904 жылы ұсынған.

Жазық беттегі шекаралық қабатты зерттеу жылу алмасу, аэродинамика, турбомашиналар, жел энергетикасы, жылуэнергетикалық қондырғылар және түрлі инженерлік жүйелер үшін өте маңызды. Шекаралық қабаттың екі негізгі режимі бар: **ламинарлы** және **турбулентті**. Ламинарлы режимде ағын қабаттары бір-біріне параллель қозғалады, ал турбулентті режимде ағын күрделі, ретсіз құйындармен сипатталады.

Турбулентті шекаралық қабат – жоғары жылдамдықтарда немесе үлкен Рейнольдс саны кезінде пайда болатын, қарқынды араласуымен және құйындық құрылымдарымен ерекшеленетін ағын режимі.

1. Шекаралық қабаттың пайда болуы

Егер тұтқыр сұйық немесе газ жазық пластина бойымен қозғалған жағдайда, пластинаның бетінде ағын жылдамдығы **нөлге тең болады**. Бұл құбылыс **жабысу шарты (no-slip condition)** деп аталады. Ал беттен алыстаған сайын жылдамдық біртіндеп өсіп, негізгі ағын жылдамдығына жетеді.

Осылайша пластина бойымен қозғалған ағын ішінде жылдамдық градиенті пайда болады. Жылдамдық нөлден негізгі ағын жылдамдығына дейін өзгеретін аймақ **шекаралық қабат** деп аталады.

Шекаралық қабаттың қалыңдығы ағын бағыты бойынша біртіндеп өседі. Егер пластинаның басынан бастап қарастырсақ: Алғашында ламинарлы шекаралық қабат пайда болады; Белгілі бір қашықтықтан кейін ағын тұрақсыз болып; Турбулентті режимге өтеді. Бұл ауысу **өтпелі аймақ** деп аталады.

2. Рейнольдс саны және ағын режимі

Шекаралық қабаттың режимін анықтайтын негізгі параметр – **Рейнольдс саны**.

$$Re_x = \frac{U_\infty x}{\nu},$$

мұндағы:

- U_∞ – негізгі ағын жылдамдығы
- x – пластинаның басынан бастап өлшенген қашықтық
- ν – кинематикалық тұтқырлық

Егер

$$Re_x < 5 \times 10^5$$

болса, ағын әдетте **ламинарлы** болады.

Ал

$$Re_x > 5 \times 10^5$$

болғанда ағын **турбулентті** режимге өтеді.

Бұл мән тәжірибелік түрде алынған және нақты жағдайда бет кедір-бұдырлығы, сыртқы турбуленттілік және қысым градиенті сияқты факторларға тәуелді.

3. Турбулентті шекаралық қабаттың ерекшеліктері

Турбулентті шекаралық қабат ламинарлы қабаттан бірнеше маңызды қасиеттерімен ерекшеленеді.

3.1. Қарқынды араласу

Турбулентті ағын кезінде сұйық бөлшектері ретсіз қозғалып, әртүрлі масштабтағы құйындар пайда болады. Осы құйындар ағынның ішкі қабаттарын араластырып, импульс пен энергия алмасуын күшейтеді.

3.2. Жылдамдық профилі

Турбулентті шекаралық қабаттағы жылдамдық профилі ламинарлы ағынға қарағанда анағұрлым «толық» болады.

Жылдамдық профилі жуық түрде келесі **дәрежелік заңмен** сипатталады:

$$\frac{u}{U_\infty} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7}$$

мұндағы:

- u – шекаралық қабат ішіндегі жергілікті жылдамдық
- U_∞ – негізгі ағын жылдамдығы
- y – беттен қашықтық
- δ – шекаралық қабат қалыңдығы

Бұл формула **1/7 дәрежелік заң** деп аталады.

4. Турбулентті шекаралық қабаттың құрылымы

Турбулентті шекаралық қабат бірнеше аймақтан тұрады.

4.1. Тұтқырлық асты қабаты

Бұл қабат бетке өте жақын орналасады. Мұнда турбуленттілік әлсіз, ағын негізінен тұтқыр күштердің әсерімен сипатталады.

Жылдамдық профилі шамамен сызықты болады:

$$u \sim y.$$

4.2. Буферлік аймақ

Бұл аймақта тұтқыр және турбулентті әсерлер бірдей маңызды рөл атқарады.

4.3. Логарифмдік аймақ

Бұл турбулентті шекаралық қабаттың негізгі бөлігі болып табылады. Мұнда жылдамдық **логарифмдік заңмен** өзгереді:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} ln y^+ + B$$

мұндағы:

- u_* – үйкеліс жылдамдығы
- k – Карман тұрақтысы (≈0.41)
- B – тұрақты коэффициент

Бұл заң турбулентті шекаралық қабат теориясында маңызды рөл атқарады.

5. Шекаралық қабаттың қалыңдығы

Турбулентті шекаралық қабаттың қалыңдығы пластина бойымен өседі. Тәжірибелік формула:

$$\delta = 0{,}37 x Re_x^{-1/5}$$

Бұл формуладан көрінгендей, шекаралық қабат қалыңдығы:

- пластина бойымен артқан сайын өседі
- Рейнольдс санына тәуелді болады.

6. Үйкеліс коэффициенті

Жазық пластина үшін турбулентті режимдегі үйкеліс коэффициенті келесі формуламен анықталады:

$$C_f = \frac{0{,}059}{Re_x^{-1/5}}.$$

Бұл коэффициент пластина бетінде пайда болатын **үйкеліс кедергісін** сипаттайды.

Үйкеліс күші мына формуламен анықталады:

$$\tau_w = \mu \left(\frac{du}{dy}\right)_{y=0},$$

мұндағы

τ_w – қабырғадағы үйкеліс кернеуі.

7. Турбулентті шекаралық қабаттың инженерлік маңызы

Турбулентті шекаралық қабатты зерттеу көптеген инженерлік салалар үшін маңызды.

7.1. Аэродинамика

Ұшақ қанаттары, жел турбиналары және автомобильдер айналасындағы ағынды талдау кезінде турбулентті шекаралық қабат маңызды рөл атқарады.

7.2. Жел энергетикасы

Вертикаль осьті жел турбиналары (мысалы, **Дарье роторы**) үшін лопасть айналасындағы турбулентті шекаралық қабат аэродинамикалық күштерге және қуат коэффициентіне тікелей әсер етеді.

7.3. Жылу алмасу

Турбулентті режимде жылу алмасу қарқындылығы жоғары болады. Сондықтан жылу алмастырғыштарда турбулентті ағынды қолдану тиімді.

7.4. Энергетикалық қондырғылар

Қазандықтар, газ турбиналары және реакторларда ағынның турбуленттілігі жылу және масса алмасу процестеріне әсер етеді.

Өзін өзі тексеруге арналған сұрақтар

1. Жазық пластина бетінде шекаралық қабат неге пайда болады?
2. Жергілікті Rex саны қалай анықталады?
3. Ламинарлық ағыстан турбуленттікке ауысуға қандай факторлар әсер етеді?
4. Турбуленттік жылдамдық профилі неге толықтау болады?
5. 1/7 дәрежелік заңды қабырғаға тікелей жақын аймақта қолданудың шектеуі қандай?
6. Шекаралық қабаттың қалыңдығы пластина бойымен қалай өзгереді?
7. Жергілікті және орташа үйкеліс коэффициенттерінің айырмашылығы қандай?
8. Турбуленттік шекаралық қабат үйкеліс кедергісіне, ағынның ажырауына және жылуалмасуға қалай әсер етеді?