ТУРБУЛЕНТТІЛІК ФИЗИКАСЫ

Қабырға маңындағы жылдамдықтың әмбебап заңдары

Прандтль–Карман заңдары
Ішкі және сыртқы масштабтар

Исатаев М.С.



6

ДӘРІС
Қабырғалық ағыс

Дәрістің мақсаты мен құрылымы

Мақсат

Қабырға маңындағы ағыс аймақтарын ажырату.

Өлшемсіз жылдамдық заңдарының физикалық мағынасын түсіндіру.

Негізгі мазмұн

Үйкеліс жылдамдығы

Тұтқыр қабатша

Логарифмдік аймақ

Өлшеу және қолдану

Оқу нәтижесі

U^+ және y^+ есептеу.

Екі заңды орынды қолдану.

Қабырғалық кернеу мен шектеулерді бағалау.

Үйкеліс жылдамдығы және өлшемсіз шамалар

$$u_\tau = \sqrt{(\tau_w/\rho)}$$

Қабырғалық координаталар

$y^+ = yu_\tau/\nu$
$U^+ = U/u_\tau$

y қабырғадан қашықтық.
ν кинематикалық тұтқырлық.

Физикалық мағынасы

u_τ қабырғалық үйкелістің жылдамдық масштабы.

τ_w қабырғадағы жанама кернеудің модулі.

U орташа бойлық жылдамдық.

Қабырға маңындағы ағыс аймақтары

Тұтқыр қабатша

$y^+ \lesssim 5$

Молекулалық тұтқырлық басым.

$U^+ \approx y^+$

Буферлік қабат

$5 \lesssim y^+ \lesssim 30$

Молекулалық және турбуленттік әсерлер қатар маңызды.

Логарифмдік аймақ

$y^+ \gtrsim 30$, $y/\delta \ll 1$

Турбуленттік тасымал басым.

Жеткілікті жоғары Re қажет.

Шектер жуық түрде берілген. Сыртқы аймақта δ, қысым градиенті және геометрия әсер етеді. $y^+ = 300$ барлық ағыс үшін ортақ шекара емес.

Тұтқыр қабатшадағы сызықтық заң

$$\tau_w \approx \mu \frac{dU}{dy}$$

Интегралдау

$U(0) = 0$

$U \approx (\tau_w/\mu)y$

$\tau_w = \rho u_\tau^2$, $\mu = \rho\nu$

Өлшемсіз нәтиже

$U/u_\tau \approx yu_\tau/\nu$

$U^+ \approx y^+$

Тегіс қабырғаға өте жақын аймақта қолданылады.

Логарифмдік заңның физикалық негізі

Кернеу

$\tau_t \approx \tau_w = \rho u_\tau^2$

Турбуленттік кернеу басым және шамамен тұрақты.

Араласу жолы

$\ell_m \approx \kappa y$

$dU/dy \approx u_\tau/(\kappa y)$

Жылдамдық градиенті 1/y шамасына пропорционал.

Интегралдау

$U^+ = (1/\kappa) \ln y^+ + B$

Оқу есептерінде:
$\kappa = 0{,}41$
$B = 5{,}0$

Тегіс қабырға алынды.

Молекулалық және турбуленттік кернеулер

$$\tau_{\text{тол}} = \mu \, dU/dy - \rho \langle u'v' \rangle$$

Қабырғаға жақын

Турбуленттік лүпілдер қабырғада нөлге ұмтылады.

Кернеудің негізгі үлесін молекулалық тұтқырлық береді.

Қабырғадан алыстау

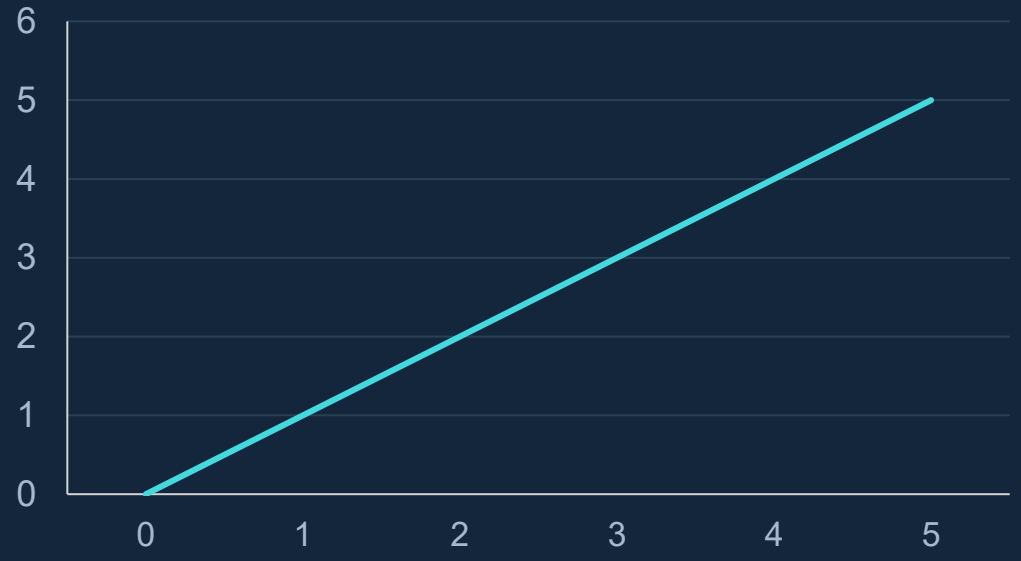
Рейнольдс кернеуінің үлесі артады.

Буферлік қабатта екі үлес те маңызды.

Бұл бүкіл ағыстың ламинардан турбуленттікке өтуі емес.

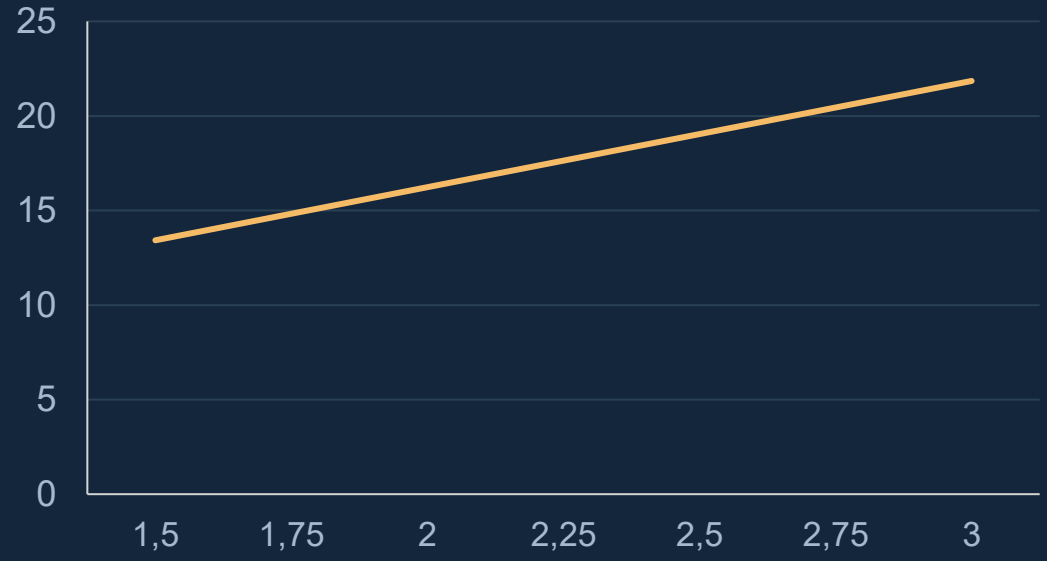
Екі заңның графикалық көрінісі

Сызықтық заң: $U^+ = y^+$



Көлденең ось: y^+, тік ось: U^+.
Тек тұтқыр қабатшаға арналған.

Логарифмдік заң: $U^+(y^+)$



Көлденең ось: $\log_{10}(y^+)$, тік ось: U^+.
Логарифмдік аймақтың оқу үлгісі.

Мысал: қабырғалық кернеу және жылдамдық

$\rho = 1{,}2$ кг/м³, $\nu = 1{,}5 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $u_т = 0{,}5$ м/с

Қабырғалық кернеу

$\tau_w = \rho u_т^2$

$\tau_w = 1{,}2 \cdot 0{,}5^2$

$\tau_w = 0{,}30$ Па

Тұтқыр қабатша

$y = 0{,}00012$ м

$y^+ = 4$

$U^+ \approx 4$

$U \approx 2{,}0$ м/с

Логарифмдік аймақ

$y = 0{,}003$ м

$y^+ = 100$

$U^+ \approx 16{,}23$

$U \approx 8{,}12$ м/с

Әмбебап профильді тәжірибеде тексеру

Өлшеу

U(y) профилі алынады.

Қабырғаның орны анықталады.

ρ және ν температураға сай есептеледі.

Масштабтау

uτ тәуелсіз бағаланады немесе профильге сәйкестендіріледі.

Нүктелер U^+ және y^+ түріне келтіріледі.

Салыстыру

Сызықтық және логарифмдік аймақтар бөлек талданады.

Қабырға орнының қатесі мен калибрлеу ескеріледі.

Графиктер оқу үлгілері.

Инженерлік қолдану және шектеулер

Қолдану

Үйкеліс кедергісі.

Құбырдағы қысым шығыны.

CFD қабырғалық функциялары.

Шекаралық қабатты талдау.

Шектеулер

Күшті қысым градиенті.

Ағынның үзілуі.

Қабырға кедір-бұдырлығы.

Төмен Re және тепе-тең емес ағыс.

Әмбебаптық мағынасы

Ұқсас шарттарда өлшемсіз профильдер жақындайды.

Бір заң бүкіл қимаға қолданылмайды.

к мен B шарттарға тәуелді нақтыланады.

Қорытынды және өзін өзі тексеру

Негізгі қорытынды

Ішкі масштабтарды u_τ мен ν анықтайды.

Сызықтық және логарифмдік заңдардың аймақтары бөлек.

Сыртқы ағыс әсері ескеріледі.

01 u_τ нені сипаттайды және қалай есептеледі?

02 $U^+ = y^+$ заңы қалай алынады?

03 Буферлік қабатта қандай әсерлер маңызды?

04 Логарифмдік заңды бүкіл қимаға қолдануға бола ма?

05 Кедір-бұдырлық профильді қалай өзгертеді?