ТУРБУЛЕНТТІЛІК ФИЗИКАСЫ

Үлкен Рейнольдс санындағы құбыр ағысының әмбебап заңы

Қабырғалық масштабтар · Логарифмдік профиль
Кедір-бұдырлық және гидравликалық кедергі

Исатаев М.С.



8

ДӘРІС
Жоғары Re ағысы

Дәрістің мақсаты мен құрылымы

Мақсат

Үлкен Re кезінде ішкі және сыртқы масштабтардың айырмасын түсіндіру.

Логарифмдік заңның қолданылу шарттарын талдау.

Негізгі мазмұн

Қабырғалық координаталар

Ағыс аймақтары

Логарифмдік профиль

Кедір-бұдырлық және үйкеліс

Оқу нәтижесі

u^+, y^+ және Re_τ шамаларын анықтау.

Профиль мен үйкелісті байланыстыру.

Үлкен Re: ішкі және сыртқы масштабтар

$$Re = vD/v \gg 10^5$$

Ішкі масштабтар

$u_т = \sqrt{(\tau_w/\rho)}$

$\ell_v = v/u_т$ — тұтқыр ұзындық.

$y^+ = y/\ell_v$; $u^+ = u/u_т$.

Сыртқы масштабтар

$R = D/2$ — құбыр радиусы.

$Re_т = u_т R/v = R/\ell_v$.

$Re_т$ өскенде масштабтар ажырайды.

Қабырға маңындағы ағыс аймақтары

Тұтқыр қабатша

$y^+ \lesssim 5$

Молекулалық тұтқырлық басым.

$u^+ \approx y^+$.

Буферлік аймақ

$5 \lesssim y^+ \lesssim 30$

Тұтқырлық пен турбуленттік тасымал қатар маңызды.

Логарифмдік аймақ

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

Жоғары Re кезінде қабаттар қабаттасады.

Төмендегі профильдер — теориялық үлгілер; нақты ағыс Re мен кедір-бұдырлыққа тәуелді.

Әмбебап логарифмдік жылдамдық заңы

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

Белгілеулер

κ ≈ 0,41 — Карман тұрақтысы.

B ≈ 5,0 — тегіс қабырғаға жуық мән.

y — қабырғадан қашықтық.

Қолданылу шарттары

Толық дамыған, тегіс қабырғалы ағыс.

Логарифмдік қабатта жарамды.

Бүкіл қимаға таратылмайды.

Құбыр қимасындағы жылдамдық

Радиалдық координата

$y = R - r$

$u(r)/u_т \approx (1/к) \ln[(R-r)u_т/v] + B$

Тек логарифмдік аймақта.

Орташа жылдамдық

$v = (2/R^2)\int_0^R u(r) r\, dr$

$Q = \pi R^2 v$

Ось маңында сыртқы түзету қажет.

Профильдің шектеуі

Логарифмдік формуланы $r = 0$ нүктесіне дейін созу — жуықтау ғана.

Толық жанама кернеудің таралуы

$$\tau_{тол}(r) = \tau_w \, (r/R)$$

Импульс теңгерімі

Толық дамыған құбыр ағысы үшін:

$\tau_w = (R/2)\left|dp/dx\right|$

$\tau_{тол}$ осьте нөлге тең.

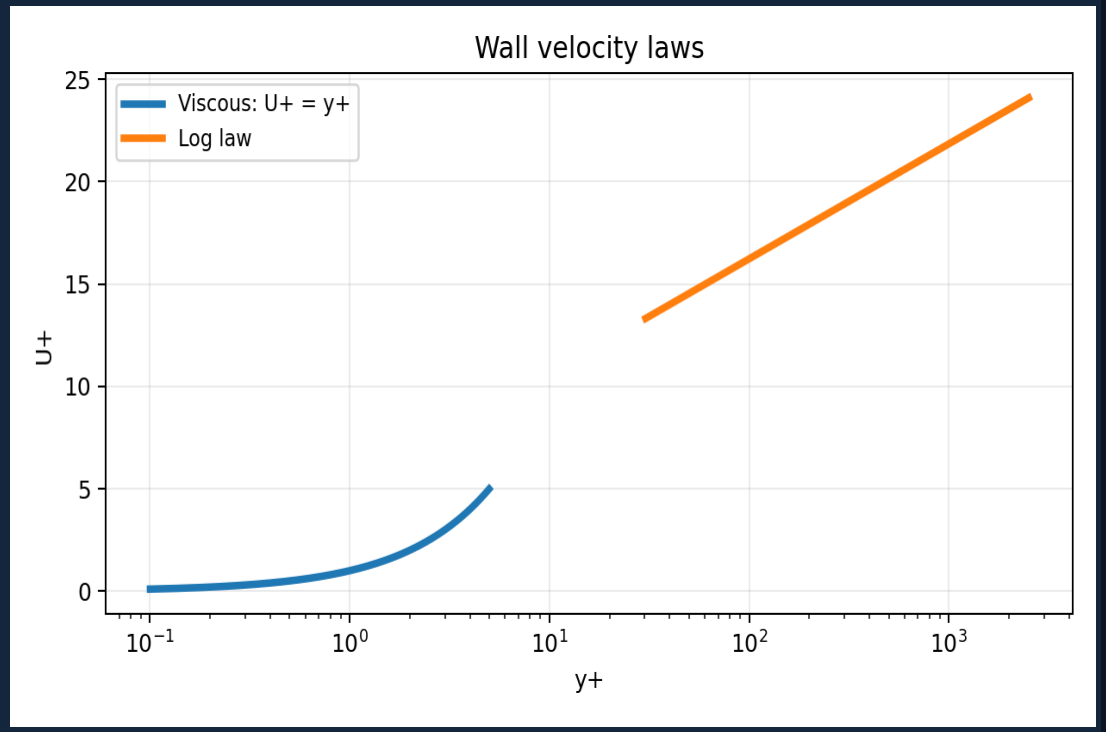
Тұтқыр және турбуленттік үлес

$\tau_{тол} = \mu \, du/dr - \rho\langle u'v'\rangle$

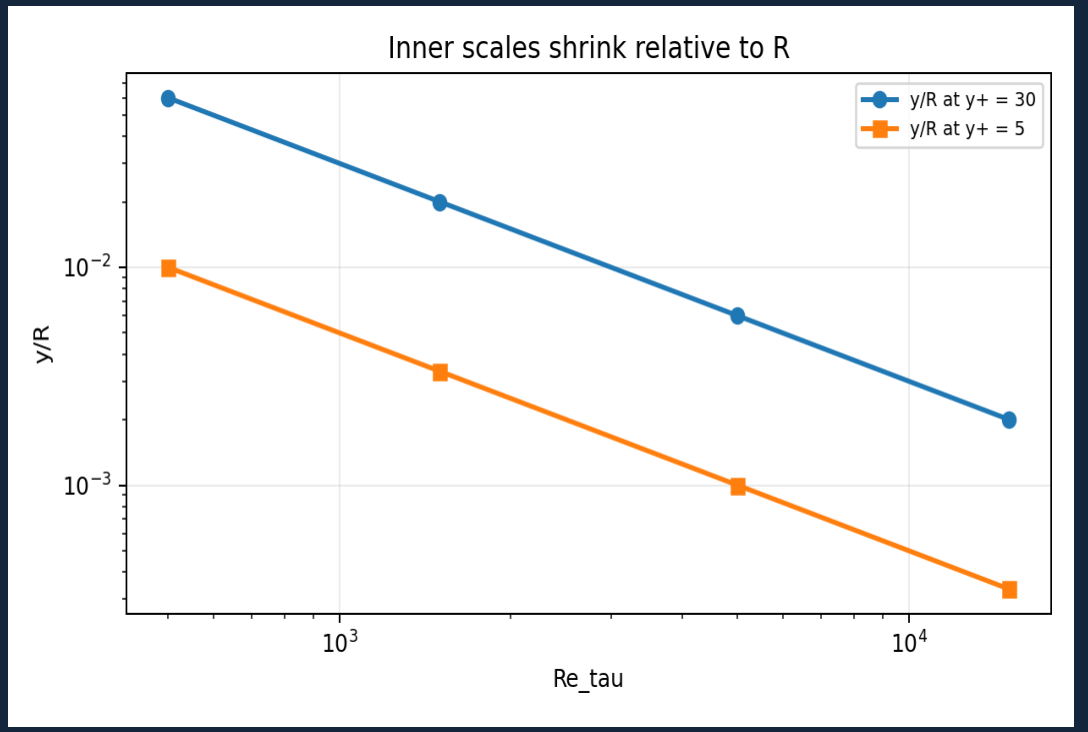
Таңба координата бағытына тәуелді.

Қабырғада тұтқыр үлес басым.

Графиктер: қабырғалық жылдамдық заңы



Сол жақ: $u^+(y^+)$ — тұтқыр және логарифмдік заң.



Оң жақ: Reτ өскенде қабаттардың масштабтық бөлінуі.

Кедір-бұдырлық және логарифмдік ығысу

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

Тегіс қабырға

$k_s^+ = k_s u_\tau / \nu$

k_s^+ аз болса, кедір-бұдырлықтың әсері әлсіз.

Кедір-бұдыр қабырға

ΔU^+ — жылдамдық профилінің төмен ығысуы.

Үйкеліс өседі.

Кедір-бұдырлық режимі k_s^+-ке тәуелді.

Ескерту

Кедір-бұдырлық артқанда λ өседі.

Өтпелі режимде формулаларды сақтықпен қолдану қажет.

Үйкеліс коэффициенті және қысым шығыны

Дарси коэффициенті

$\lambda = 8\tau w/(\rho v^2)$

$\Delta p = \lambda(L/D)\rho v^2/2$

Құбыр ұзындығы мен диаметрі маңызды.

Колбрук–Уайт

$1/\sqrt{\lambda} = -2\log_{10}[\varepsilon/(3{,}7D) + 2{,}51/(Re\sqrt{\lambda})]$

Re және ε/D әсерін ескереді.

Маңызды айырмашылық

Тегіс қабырғаға арналған заң кедір-бұдыр құбырда дәл болмайды.

Есептеу мысалы: қабырғалық масштабтар

Берілген шамалар

Су: $\rho = 1000$ кг/м³

$\nu = 10^{-6}$ м²/с

$D = 0{,}10$ м; $v = 2{,}0$ м/с

$\lambda \approx 0{,}016$ (шартты)

Рейнольдс және үйкеліс

$Re = vD/\nu = 2 \cdot 10^5$

$\tau_w = \lambda \rho v^2/8 = 8$ Па

$u_\tau = \sqrt{(\tau_w/\rho)} \approx 0{,}089$ м/с

Қабырғалық координата

$y = 1$ мм болса: $y^+ \approx 89$

$u^+ \approx \ln(89)/0{,}41 + 5 \approx 15{,}95$

$u \approx 1{,}43$ м/с (оқу үлгісі)

Қорытынды және өзін-өзі тексеру

Негізгі қорытынды

Үлкен Re кезінде ішкі және сыртқы масштабтар бөлінеді.

Логарифмдік заң тек белгілі аймақта жарамды.

Кедір-бұдырлық үйкеліс пен профильге әсер етеді.

01 Ret саны қандай физикалық мағына береді?

02 Тұтқыр қабатша жоғары Re кезінде жойыла ма?

03 Логарифмдік заң қай жерде орындалады?

04 Толық кернеу құбыр радиусы бойынша қалай өзгереді?

05 Кедір-бұдырлық қысым шығынына қалай әсер етеді?