ТУРБУЛЕНТТІЛІК ФИЗИКАСЫ

Орташаланған қозғалыс және Рейнольдс теңдеулері



Жылдамдық лүпілдері
Турбуленттік кернеулер

Исатаев М.С.

3

ДӘРІС
Орташалау әдісі

Дәрістің мақсаты мен құрылымы

Мақсат

Турбуленттік ағысты орташа және лүпілдік шамалармен сипаттау.

Рейнольдс кернеулерінің мағынасын ашу.

Негізгі мазмұн

Рейнольдс жіктеуі

Жылдамдық корреляциясы

Кернеулер тензоры

Орташаланған теңдеулер

Оқу нәтижесі

Таңба келісімін қолдану.

Кернеу компоненттерін түсіндіру.

Тұйықтау қажеттілігін негіздеу.

Турбуленттік қозғалыстың негізгі белгілері

Лүпілдік қозғалыс

Лездік жылдамдық пен қысым орташа мәндерінің маңында өзгереді.

Көпмасштабтылық

Ағыста ірі құрылымдармен қатар ұсақ құйындар да болады.

Күшейген тасымал

Лүпілдер импульстің және жылудың қосымша тасымалын туғызады.

Энергияның таралуы

Классикалық үшөлшемді ағыста энергия ұсақ масштабтарға өтіп, тұтқырлық әсерінен жылуға айналады.

Рейнольдс бойынша жіктеу

$$u_i = U_i + u_i' \qquad p = P + p'$$

Орташа шама

$U_i = \langle u_i \rangle$, $P = \langle p \rangle$

U_i орташа қозғалысты сипаттайды.

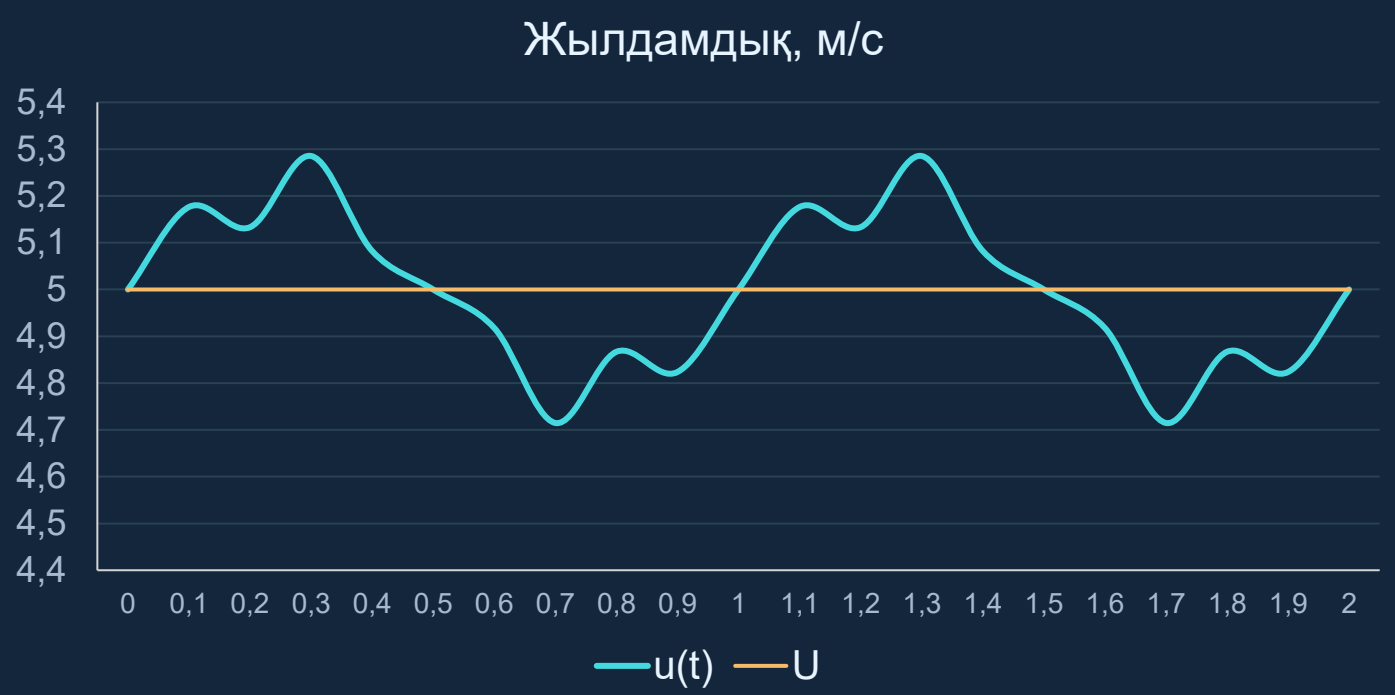
$\langle \cdot \rangle$ орташалау операторы.

Лүпілдік шама

$\langle u_i' \rangle = 0$, $\langle p' \rangle = 0$

Лүпілдің орташа мәні нөл, бірақ оның квадратының орташа мәні нөлден өзгеше болуы мүмкін.

Лездік және орташа жылдамдық



Көлденең ось: t, с. Синтетикалық оқу сигналы.
Тәжірибелік өлшеулер емес.

Графикті оқу

$U = 5{,}0$ м/с

$u'(t) = u(t) - U$

$\langle u' \rangle = 0$
$\langle u'^2 \rangle > 0$

Сигнал оқу үшін құрылған.

Лүпілдер арқылы импульстің тасымалдануы

$$R_{ij} = \langle u_i' u_j' \rangle$$

Физикалық мағынасы

R_{ij} екі бағыттағы лүпілдердің байланысын сипаттайды.

Көлденең қозғалыс бойлық импульсті тасымалдайды.

Таңба келісімі

$\tau^R_{ij} = -\rho R_{ij}$

Бұл дәрісте Рейнольдс кернеуі минус таңбасымен анықталды.
R_{ij}: м²/с², τ^R_{ij}: Па.

Рейнольдс кернеулерінің тензоры

$$\tau^R = -\rho$$

$\langle u'^2 \rangle$	$\langle u'v' \rangle$	$\langle u'w' \rangle$
$\langle v'u' \rangle$	$\langle v'^2 \rangle$	$\langle v'w' \rangle$
$\langle w'u' \rangle$	$\langle w'v' \rangle$	$\langle w'^2 \rangle$

Диагональ: қалыпты кернеулер
Диагональдан тыс: жанама кернеулер

Симметрия

$R_{ij} = R_{ji}$

Тензорда 6 тәуелсіз компонент бар.

Үшеуі диагональда, үшеуі диагональдан тыс.

Турбуленттік кинетикалық энергия

$$k = \tfrac{1}{2}\langle u'^2 + v'^2 + w'^2 \rangle$$

Тензормен байланысы

$k = \tfrac{1}{2}(R_{11} + R_{22} + R_{33})$

$\tau^R{}_{11} + \tau^R{}_{22} + \tau^R{}_{33} = -2\rho k$

k өлшем бірлігі: м²/с².

Изотроптық жағдай

$\langle u'^2 \rangle = \langle v'^2 \rangle = \langle w'^2 \rangle = 2k/3$

Әр бағыттағы энергия үлестері тең.

Жалпы ағыста бұл теңдік міндетті емес.

Рейнольдстың орташаланған теңдеулері

$$\rho\left[\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right] = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial \tau^R_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i$$

Массаның сақталуы

$\partial U_j / \partial x_j = 0$

Сығылмайтын ағыс, ρ және μ тұрақты.

Қосымша мүше

$\partial \tau^R_{ij} / \partial x_j$ лүпілдік импульс тасымалын ескереді.

Қайталанған j индексі бойынша қосынды алынады.

Орташалау және тұйықтау мәселесі

Жаңа белгісіздер

$\langle u_i u_j \rangle$
$= U_i U_j + R_{ij}$

Сызықтық емес мүшелерді орташалағанда корреляциялар пайда болады.

Өлшеу мүмкіндігі

R_{ij} компоненттерін жылдамдық лүпілдері бойынша өлшеуге болады.

Олар ойдан енгізілген күштер емес.

Модель қажеттілігі

Орташа теңдеулерде R_{ij} алдын ала белгісіз.

Қосымша модельдер немесе кернеулердің тасымал теңдеулері қажет.

Буссинеск гипотезасы және есептеу тәсілдері

$$\tau^{R}_{ij} = 2\mu_t S_{ij} - \tfrac{2}{3}\rho k \delta_{ij}$$

Гипотеза

$S_{ij} = \frac{1}{2}(\partial U_i/\partial x_j + \partial U_j/\partial x_i)$

μ_t турбуленттік тұтқырлық.
δ_{ij} Кронекер символы.

RANS модельдері

k–ε, k–ω, SST

Турбуленттік әсерді модельдейді.

Анизотропияны сипаттауы шектеулі.

LES және DNS

LES ірі құйындарды шешіп, ұсақ масштабтарды модельдейді.

DNS масштабтарды тікелей шешеді.

Қорытынды және өзін өзі тексеру

Негізгі қорытынды

Лездік өріс орташа және лүпілдік бөліктерден тұрады.

Лүпілдер импульсті тасымалдайды.

RANS үшін тұйықтау қажет.

01 $\langle u' \rangle = 0$, бірақ $\langle u'^2 \rangle > 0$ болуы неліктен?

02 Рейнольдс кернеуінің таңба келісімі қандай?

03 Тензорда неге 6 тәуелсіз компонент бар?

04 Орташалау кезінде жаңа белгісіздер қалай пайда болады?

05 RANS, LES және DNS қалай ажыратылады?