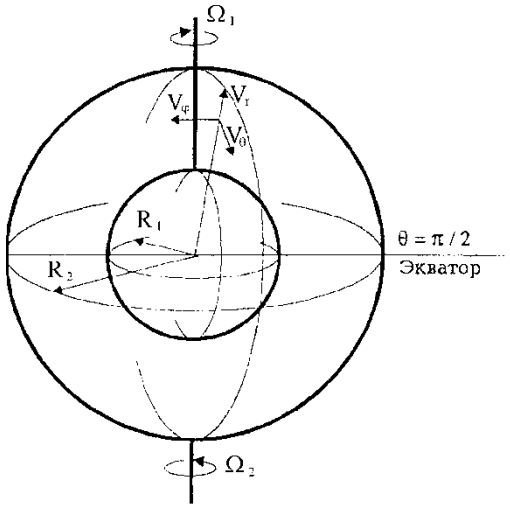
СВОЙСТВА ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э.

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД



$\Delta=(R_2-R_1)/R_1=1$

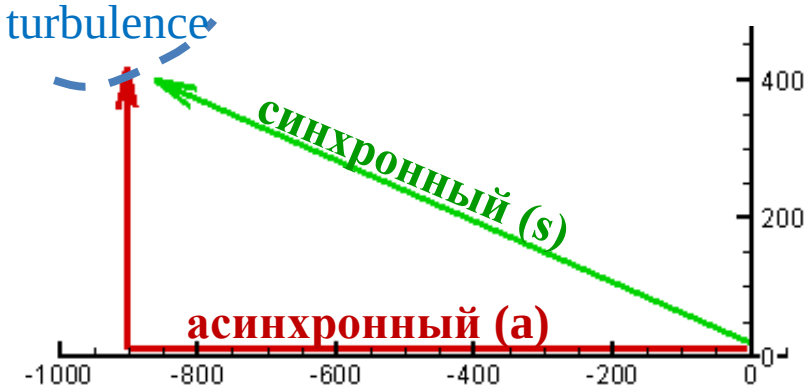
$$\frac{d\vec{U}}{dt}=\vec{U}\times\vec{\omega}-grad\mathrm{P}-\nu\cdot rot\vec{\omega},\quad \mathrm{P}=\frac{1}{\rho}\cdot p+\frac{\left|\vec{U}\right|^2}{2},\quad \vec{\omega}=rot\vec{U},$$

$$div\vec{U}=0.$$

$$u_\varphi\Big|_{r=R_i}=\Omega_i R_i\sin\theta,\quad u_r\Big|_{r=R_i}=0,\quad u_\theta\Big|_{r=R_i}=0,\quad i=1,2$$

i = 1 – внутренняя сфера, i = 2 – внешняя сфера

$$\mathrm{Re}_2=\Omega_2R_2^2/\nu,\quad \mathrm{Re}_1=\Omega_1R_1^2/\nu$$



Значения Re_{1end} выбирались вблизи порога перехода к турбулентности Re_{1tur} = 450

$\mathrm{Re}_{1\ start}$ = $\mathrm{Re}_{2\ start}$ = 0

$\mathrm{Re}_{1\ end}$ = 460, 470, 490

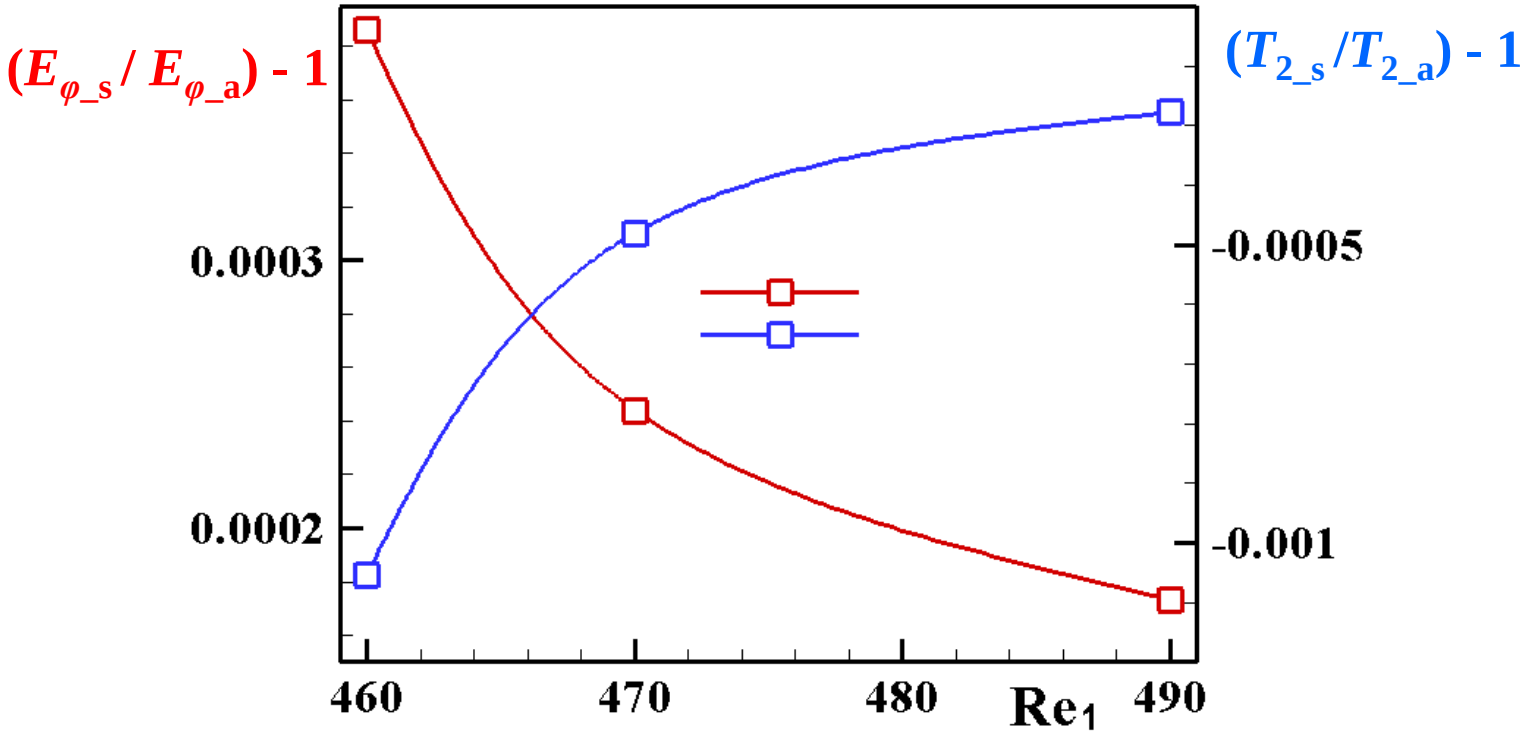
$\mathrm{Re}_{2\ end}$ = -900

АЛГОРИТМ

N.V. Nikitin. Finite-difference method for incompressible Navier–Stokes equations in arbitrary orthogonal curvilinear coordinates // J. Comp. Phys. 2006. 217 (2). P. 759-781.

Свойства турбулентных течений

Переход к турбулентности происходит при Re_{1tur} = 450



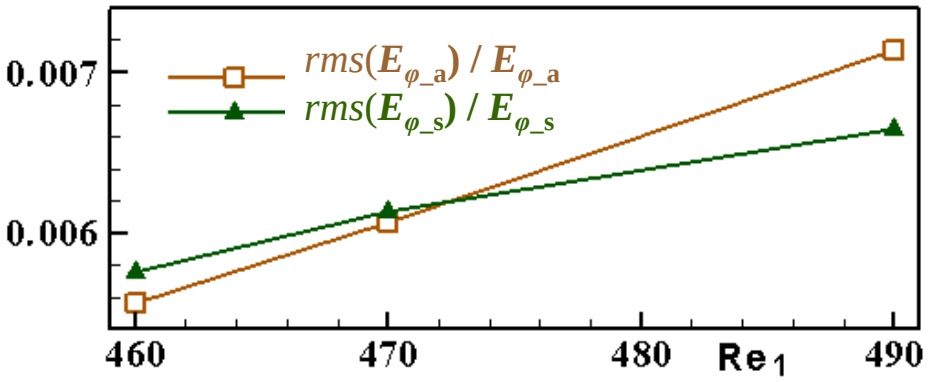
Азимутальная компонента кинетической энергии $E_\varphi = \int u_\varphi^2(r,\theta,t)$

Момент сил трения на внешней границе $T_2 = \nu r_2^3 \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\left\{\frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r}\right\}\sin^2\theta d\theta d\varphi$

Полное время расчета: 3513-3750 об./внутренней сферы.

Время осреднения: 1366-1458 об./внутренней сферы.

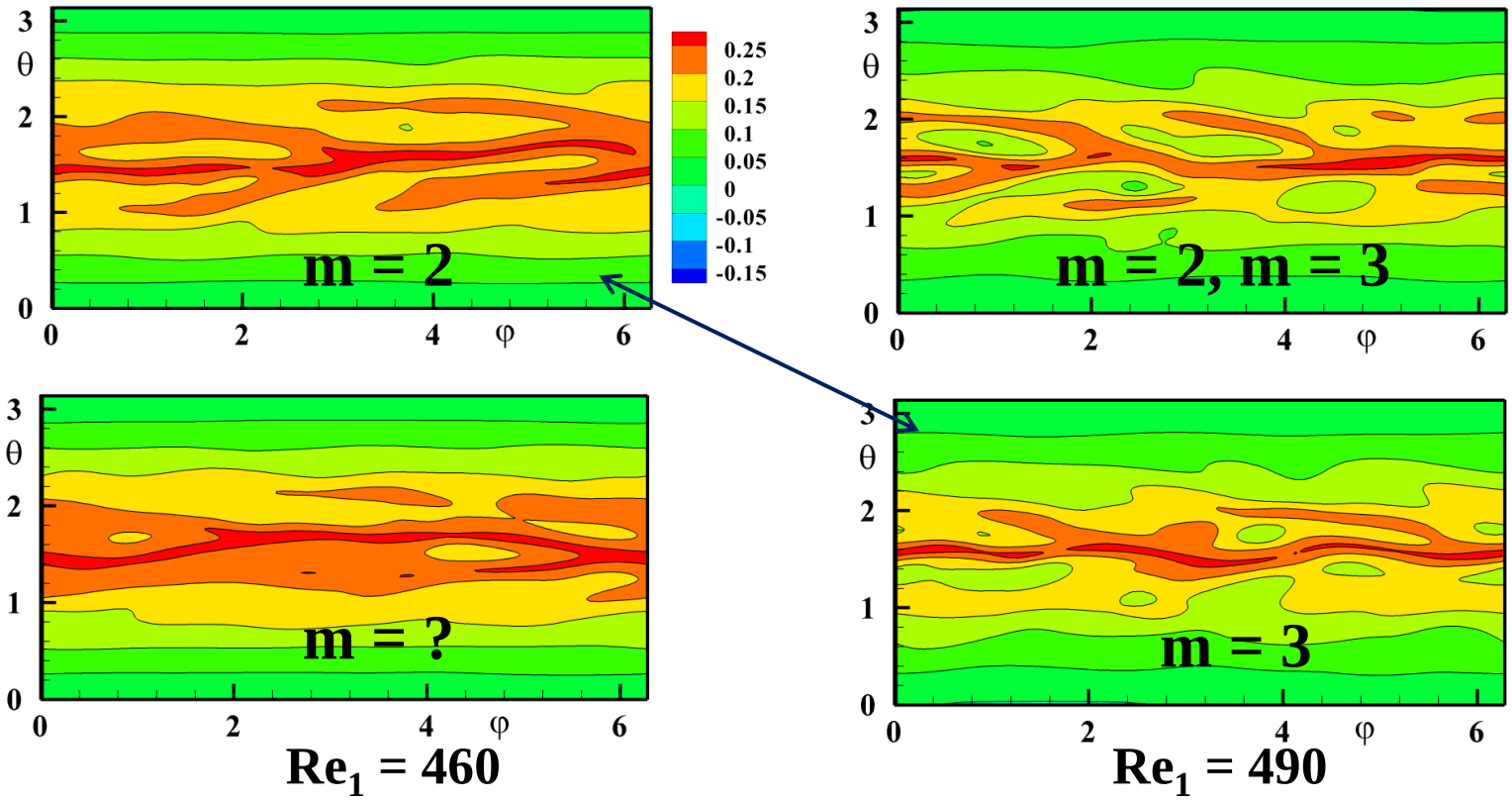
флуктуации и крупномасштабные когерентные структуры



$$rms\,E_\varphi = \sqrt{\frac{1}{I-1}\sum_{i=1}^{I}\left(E_\varphi(t_i) - E_{\varphi 0}\right)^2}$$

a

s

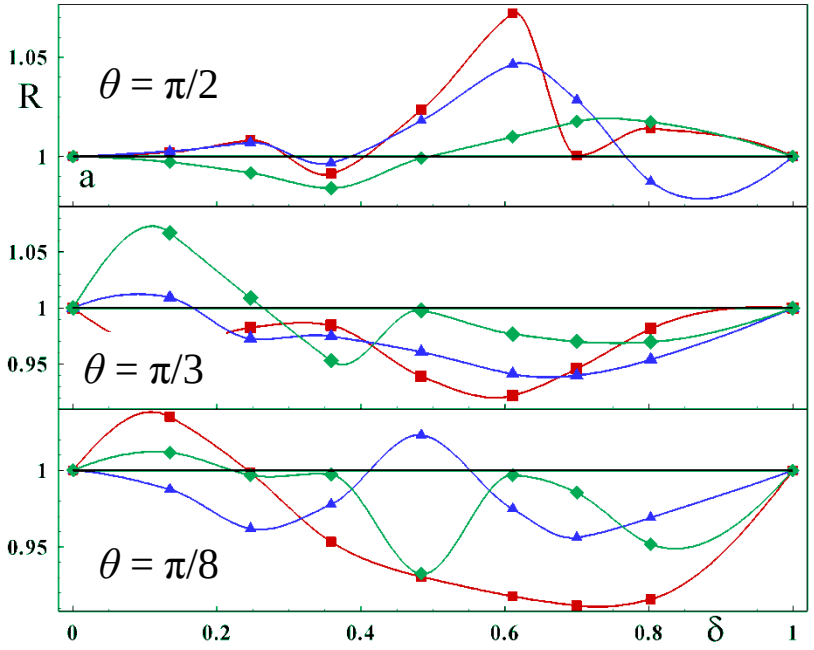


азимутальная скорость u_φ [m/s] в плоскости $\theta - \varphi$ на расстоянии 0.07Δ от внутренней сферы

Спектры и амплитуды флуктуаций скорости

$R = rms\,(u_\varphi)_s \,/\, rms(u_\varphi)_a$

$\delta = (r - r_1) / (r_2 - r_1)$



Re $_1$ = 460

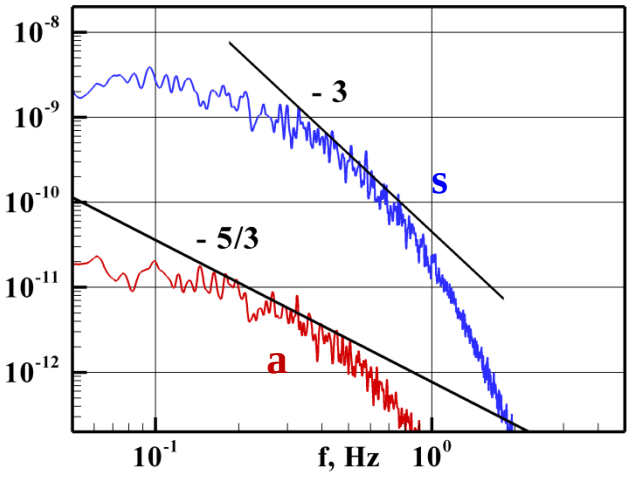
Re $_1$ = 470

Re $_1$ = 490

Re_1	θ	δ	S, вид спектра	A, вид спектра	R (из рис. 2)
460	21.3	0.135	3D	2D	>1
460	52.9	0.61, 0.7	2D	3D	<1
470	21.3	0.134, 0.25, 0.36	2D	3D	<1
470	52.9	0.7, 0.8	2D	3D	<1
470	89.8	0.8	2D	3D	<1
470	89.8	0.25	3D	2D	>1
490	21.3	0.8	2D	3D	<1
490	89.8	0.25	2D	3D	<1

Спектры пульсаций u_φ

$Re_1 = 490$, $\theta = 21.3^\circ$, $\delta = 0.8$



В турбулентных течениях в сферических слоях при одних и тех же числах Рейнольдса, но формирующихся двумя различными способами, наблюдается следующее:

1. **Чем выше степень когерентности крупномасштабных пространственных структур (возможно выделение доминирующего волнового числа в азимутальном направлении), тем ниже интенсивность пульсаций кинетической энергии.**

2. **Максимальное снижение интенсивности пульсаций скорости в локальных областях течений приводит к двумерной турбулентности с передачей энергии от меньших масштабов к большим.**

3. **Наоборот, максимальное увеличение интенсивности пульсаций скорости в локальных областях течения приводит к трехмерной турбулентности с передачей энергии от больших масштабов к меньшим.**