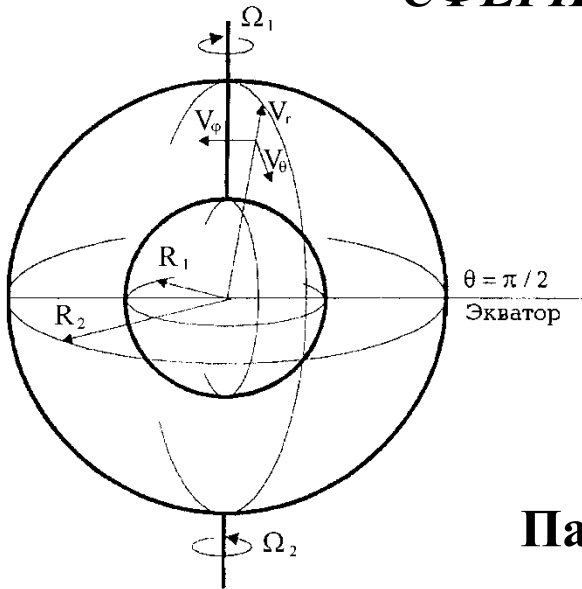


***ПЕРЕХОД К ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ
ПЕРИОДИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ СКОРОСТИ
ВРАЩЕНИЯ***

Жиленко Д.Ю., Кривоносова О.Э.

Институт механики МГУ

СФЕРИЧЕСКОЕ ТЕЧЕНИЕ КУЭТТА

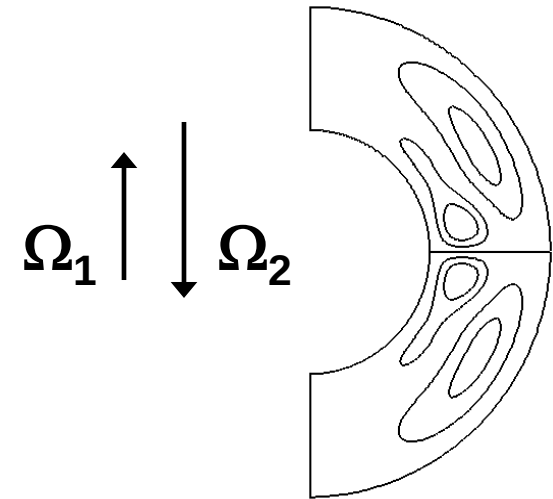


Стационарные
границные условия:

$$Re_1 = \Omega_1 R_1^2 / \nu$$

$$Re_2 = \Omega_2 R_2^2 / \nu$$

$$\sigma = (R_2 - R_1) / R_1$$



Параметры подобия:

Нестационарные граничные условия:

$$\Omega_2(t) = \Omega_{20} (1 + A \sin(2\pi f t + \Phi)), \quad \Omega_1 = \text{const}$$

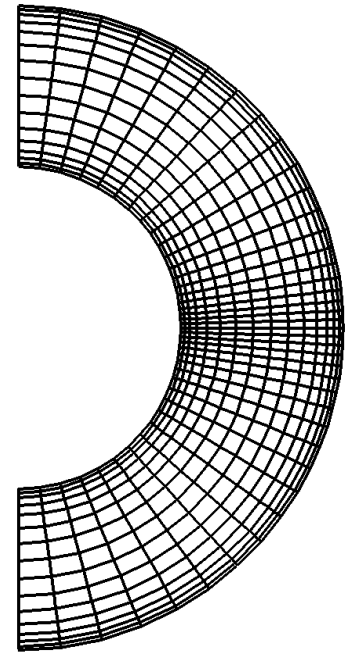
δ/R – относительная толщина пограничного
слоя, $\delta = (2\nu / 2\pi f)^{1/2}$

$Re_m = (A Re_2) (\delta/R_2)$ – модифицированное
число Re

Hollerbach et al, 2002

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ

- Консервативная конечно-разностная схема дискретизации уравнения Навье-Стокса по пространству в сферической системе координат (r, θ, ϕ) .
- Полунеявная схема 3-его порядка точности интегрирования по времени.
- Для сгущения сетки в областях наибольших градиентов скорости используются неравномерные сетки по r и θ . По r вблизи границ, по θ вблизи экватора.
- Полная нелинейная задача
- Задача о линейной устойчивости



Сетка в плоскости $r - \theta$

- **Н.В. Никитин.** Прямой расчет турбулентных течений в эксцентрических трубах. *ЖВМ и МФ*, 2006, №3, с. 509-525
- **N.V.Nikitin.** Third-order-accurate semi-implicit Runge-Kutta scheme for incompressible Navier-Stokes equations. *Int. J. Num. Meth. Fluids*, 2006, 51, 221-233

ПРЯМОЙ РАСЧЕТ

Уравнение Навье-Стокса:

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

Уравнение неразрывности: $\text{div}\vec{U} = 0.$

Граничные условия: $u_{\varphi} \Big|_{r=R_i} = \Omega_i R_i \sin \theta, \quad u_r \Big|_{r=R_i} = 0, \quad u_{\theta} \Big|_{r=R_i} = 0$

Нестационарные граничные условия - модуляция скорости вращения внешней сферы:

$$\Omega_2(t) = \Omega_{20}(1 + A \sin(2\pi ft + \psi_0)), \quad \Omega_{20} = \text{const},$$

$$\Omega_1 = \text{const}$$

ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА ЛИНЕЙНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

ДВУМЕРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ

Буря А.Г., Шкадов В.Я. Устойчивость пленки жидкости, стекающей по колеблющейся наклонной поверхности. МЖГ, 2001

ТРЕХМЕРНЫЕ ТЕЧЕНИЯ

Schmid P.J. Nonmodal stability theory. Annu. Rev. Fluid Mech. 2007, v.39,
129-162

Трехмерные течения в прямолинейных каналах с параллельными стенками

АНАЛИЗ ЛИНЕЙНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

$\vec{U}_\Psi(r, \theta, \Psi)$ - двумерное решение УНС в фазе Ψ модуляции: $\Psi = 2\pi ft + \psi_0$

$\vec{u}'(\varphi, r, \vartheta, t) = \vec{u}''(r, \theta, t) \exp(im\varphi)$ m волновое число.

$$\frac{\partial \vec{u}'}{\partial t} = \vec{U}_t \times \text{rot} \vec{u}' + \vec{u}' \times \text{rot} \vec{U}_t - \nu \text{rot rot} \vec{u}' - \nabla p'$$

$$\text{div} \vec{u}' = 0$$

$$u'_r \Big|_{r=R_i} = 0, \quad u'_\theta \Big|_{r=R_i} = 0, \quad u'_\varphi \Big|_{r=R_i} = 0.$$

$$u'_r(r, \theta, \varphi, 0) = u'_\varphi(r, \theta, \varphi, 0) = (r - R_1)(R_2 - r) \sin \theta, \quad u'_\theta(r, \theta, \varphi, 0) = 0$$

$$\vec{u}''(r, \theta, t) \sim \exp(\lambda t + i\omega t) \quad t \rightarrow \infty$$

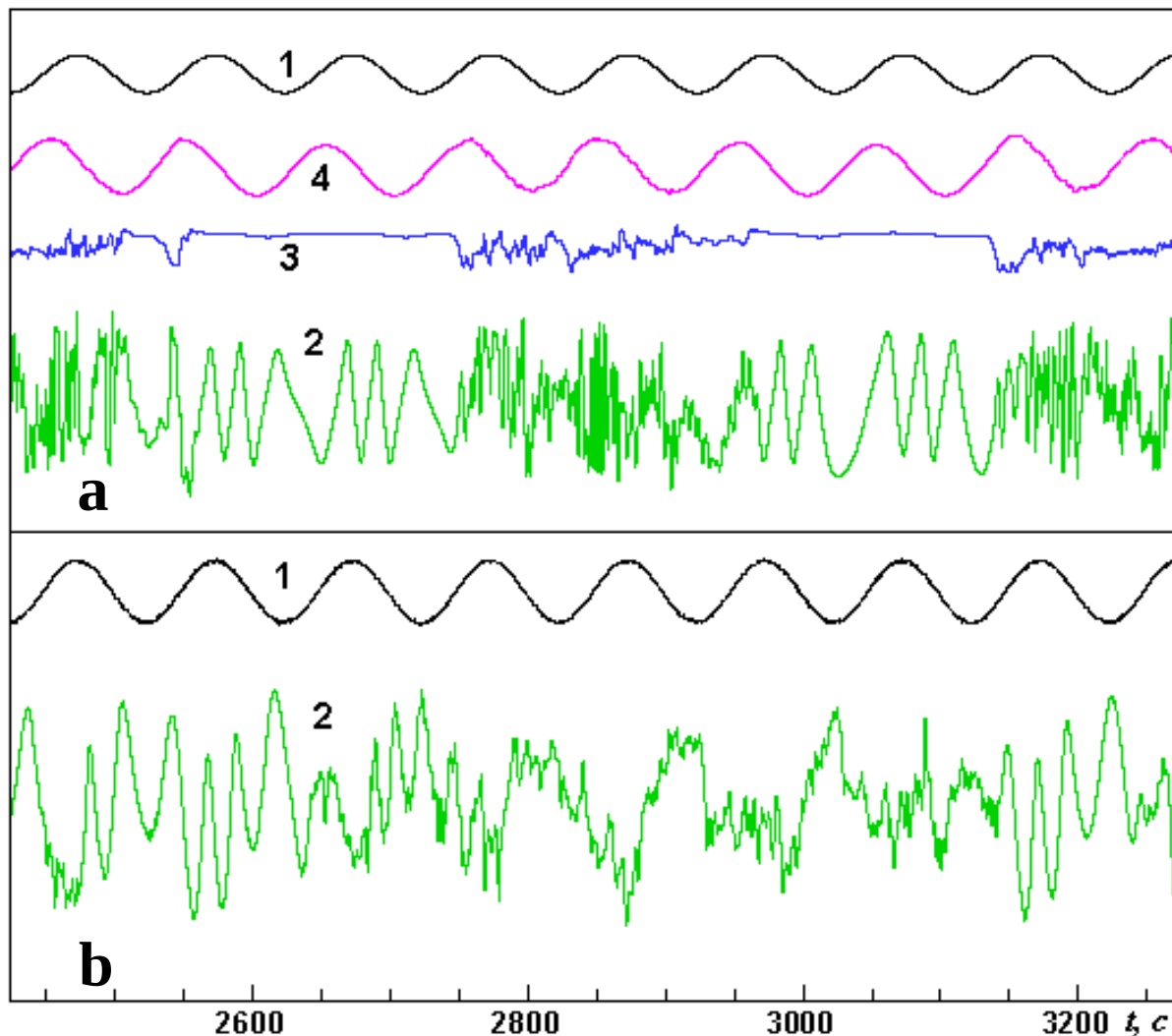
Если $\lambda > 0$, то течение неустойчиво относительно данного возмущения

МОДУЛЯЦИЯ СКОРОСТИ ВНЕШНЕЙ ГРАНИЦЫ. ЭКСПЕРИМЕНТ

- 1. С увеличением амплитуды и уменьшением частоты модуляции происходит переход к хаосу при меньших, чем в случае стационарной скорости вращения, числах Рейнольдса.**
- 2. При переходе к хаосу наблюдается чередование во времени турбулентных и ламинарных участков. При увеличении надкритичности (амплитуды) относительная доля ламинарных участков снижается, что является характерным признаком пространственно-временной перемежаемости типа «цикл-хаос».**
- 3. Уровень стохастичности турбулентных течений снижается с увеличением амплитуды колебаний скорости внешней сферы.**

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТА

ПЕРЕМЕЖАЕМОСТЬ «ЦИКЛ-ХАОС»

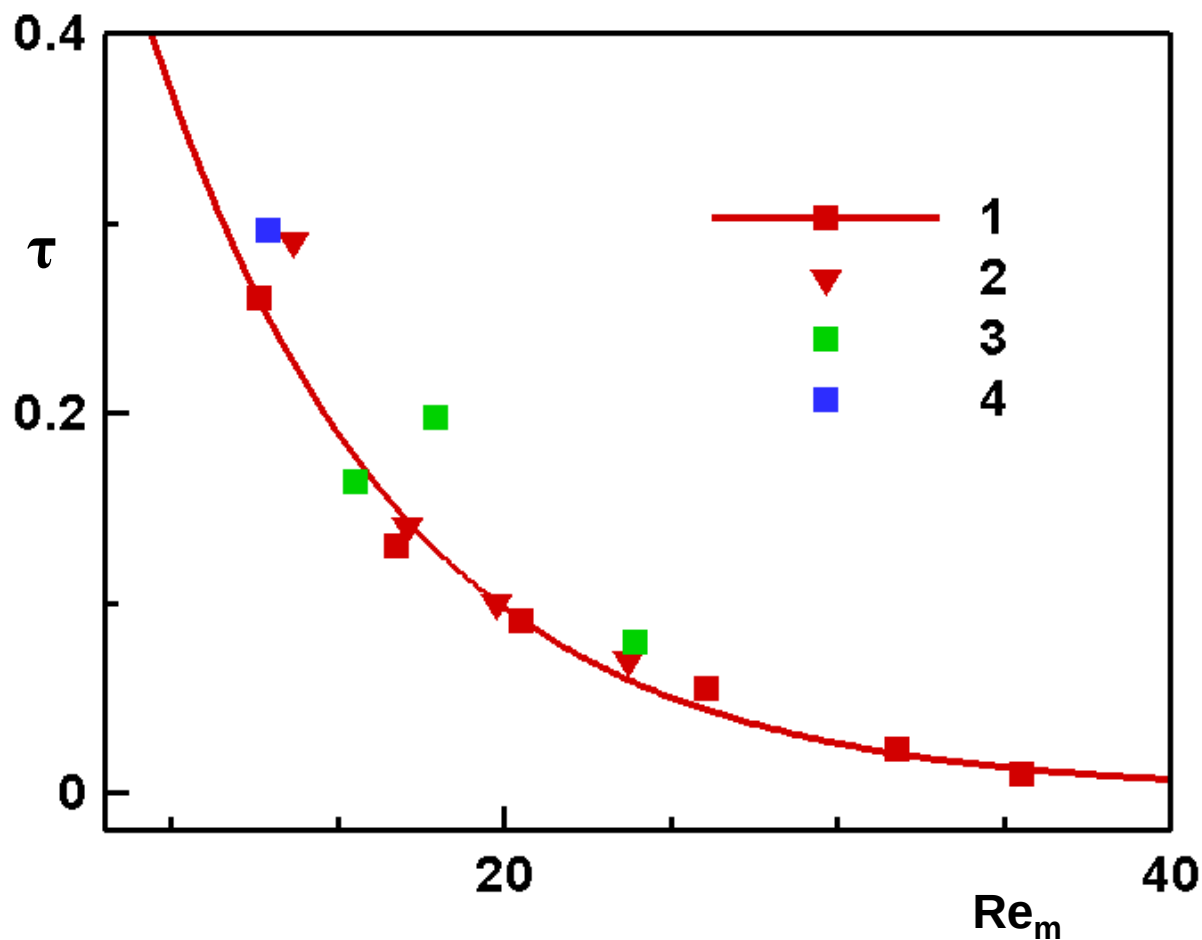


а - РАСЧЕТ
 $Re_m = 15.6$

1 – Ω_2
2 – u_ϕ *скорость течения*
3 – момент сил трения на внутренней сфере
4 – момент сил трения на внешней сфере

б -ЭКСПЕРИМЕНТ
 $Re_m = 12.7$

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ τ ЛАМИНАРНЫХ УЧАСТКОВ



эксперимент

1- $\delta/r_2 = 0.27$, 2- $\delta/r_2 = 0.19$

Расчет. $\delta/r_2 = 0.27$

3 – увеличение A ,

4 – уменьшение A .

ФАЗОВЫЕ СКОРОСТИ ЛИНЕЙНЫХ МОД В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФАЗЫ МОДУЛЯЦИИ Ψ

