



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

ИБРАЭ

Nuclear Safety Institute



Прямое численное моделирование турбулентного течения вязкой несжимаемой жидкости по схеме Кабаре в плоском канале при $Re = 5600$

Докладчик:

аспирант 3-го года Асфандияров Д.Г.

Научный руководитель:

д.ф.-м.н., проф. В.М. Головизнин

Уравнения неразрывности и движения сплошной среды.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial u_k}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) = \rho J_k - \frac{\partial P}{\partial x_k} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_k} - \frac{2}{3} \delta_{jk} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right)$$

Для случая несжимаемой жидкости без учета объемных сил

$$\operatorname{div} \vec{u} = 0$$

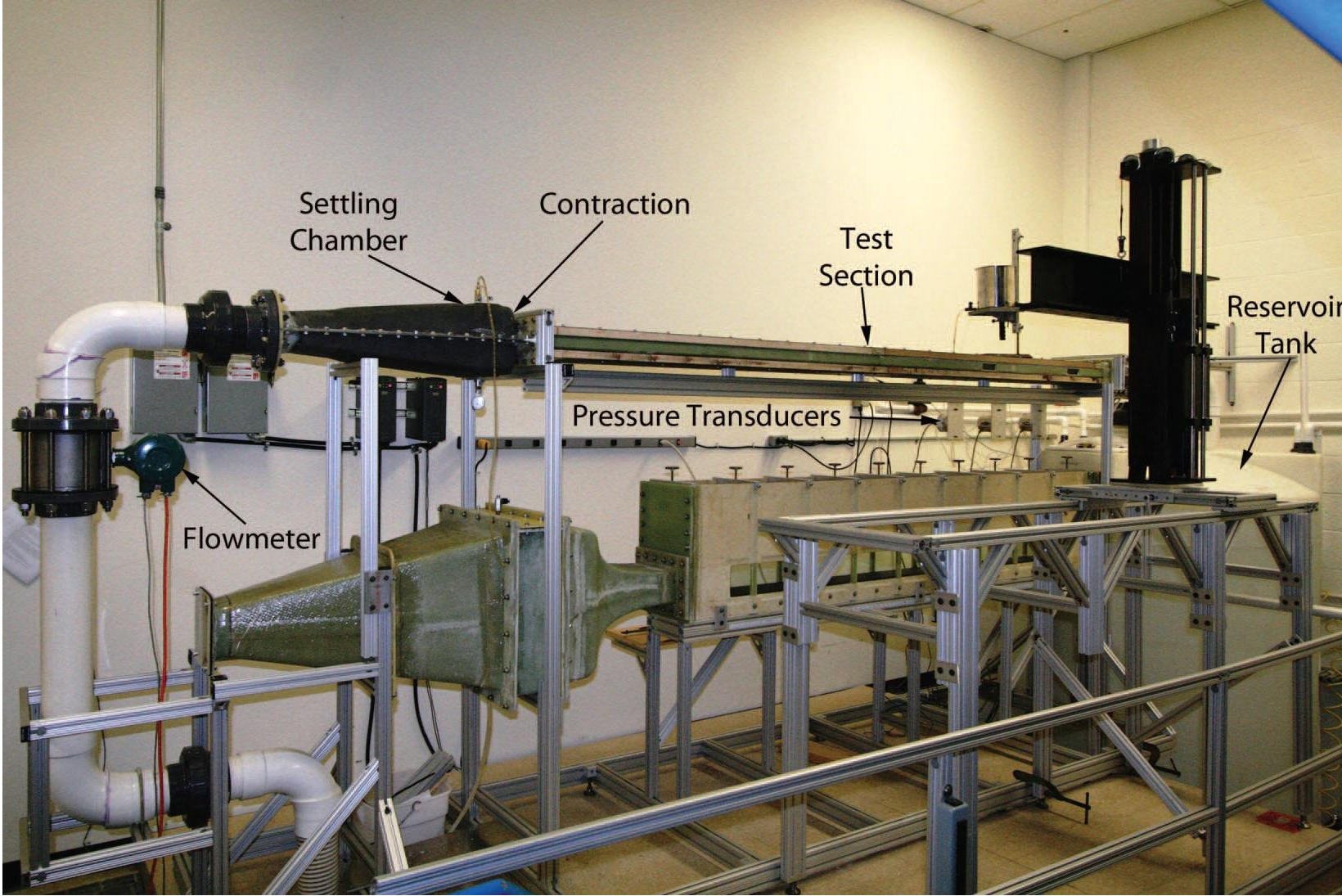
$$\rho \left(\frac{\partial u_k}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_k} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right)$$

С математической точки зрения появление турбулентности обусловлено доминированием дестабилизирующих конвективных членов над стабилизирующими вязкими членами

Методы расчета турбулентных течений

- Применение уравнений Рейнольдса, замкнутых при помощи моделей турбулентности Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS)
- Прямое численное моделирование - Direct Numerical Simulation (DNS). Численное решение уравнений Навье-Стокса без применения моделей турбулентности
- Метод моделирования крупных вихрей – Large Eddy Simulation (LES). Проводится фильтрация коротковолновых турбулентных неоднородностей
- Гибридные методы

High Reynolds number turbulent channel flow facility at the United States Naval Academy



Изучение турбулентных течений в плоском канале

Эксперименты по турбулентному течению в канале проводятся с 1951 года (Laufer)

- *Patel and Head* (1969): Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса, профиль скорости, $Re = 1000-10000$
- *Eckelmann* (1974): изучение турбулентных структур вблизи стенки, $Re = 2800-4100$
- *Hussain & Reynolds* (1975): детальная статистика в очень длинном канале, $Re = 13800-33300$
- *Johansson & Alfredsson* (1982) детальная статистика турбулентного течения, $Re = 6900-24450$
- *Zanoun, Durst & Nagib* (2003): $Re_{\tau} \approx 5000$ ($Re \approx 1.2 \times 10^5$)
- *M. P. Schultz and K. A. Flack* (2013): до $Re = 300000$, коэффициент сопротивления, профили скорости, компоненты рейнольдсовкого тензора, сравнение с DNS расчетами.

Изучение турбулентных течений в плоском канале

Расчеты турбулентных течений в плоском канале

$$\text{Re} = \frac{u_m 2\delta}{\nu} \quad \text{Re}_c = \frac{u_c \delta}{\nu} \quad \text{Re}_\tau = \frac{u_\tau \delta}{\nu} \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad \tau_w = \rho \nu \left(\frac{d\langle u \rangle}{dy} \right)_{y=0}$$

- *Deardorff* (1970): расчет методом моделирования крупных вихрей (LES), 6720 узлов сетки
- *Schumann* (1973, 1975) LES, 65536 узлов сетки
- *Deardorff* и *Schumann* - в своих расчетах методом моделирования крупных вихрей моделируют пограничный слой
- *Moin & Kim* (1982): LES без изменения граничных условий, 516096 узлов сетки для $\text{Re}=13800$ ($\text{Re}_\tau=640$)
- *Kim, Moin & Moser* (1987): Прямое численное моделирование (DNS), 3962880 узлов сетки, $\text{Re}_\tau=180$ ($\text{Re} = 5600$)
- *Moser, Kim & Mansour* (1999): Прямое численное моделирование $\text{Re}_\tau = 180, 395, 590$
- Kawamura et al., 1998, Abe et al., 2004, $\text{Re}_\tau = 180-1020$
- Iwamoto et al. (2002), $\text{Re}_\tau = 110-650$
- *del Alamo & Jimenez* (2004): DNS, $\text{Re}_\tau=934$
- *Hoyas & Jimenez* (2006): DNS, $\text{Re}_\tau=2003$ ($\text{Re} \approx 85000$), $\approx 1.8 \times 10^{10}$ узлов сетки (6144 x 633 x 4608). Расчет занял 6×10^6 процессоро-часов на 2048 процессорах

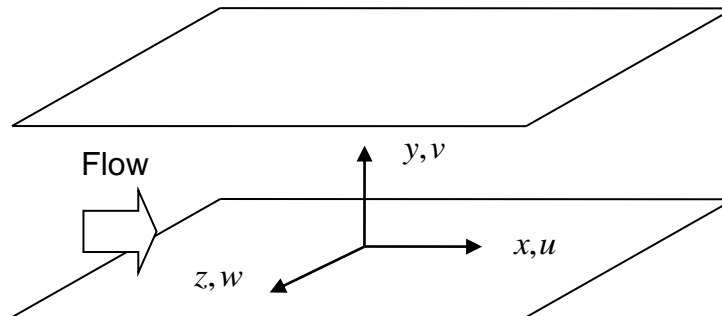
Постановка задачи

На верхней и нижней горизонтальной плоскости задаются условия прилипания. Направление течения вдоль оси X , вдоль этого направления каждый шаг по времени проводится корректировка расхода. По направлениям X, Z заданы периодические условия на скорость и давление.

Сетка ортогональная – 256 x 128 x 128 ячеек, используется сгущение сетки вблизи стенок.

Размеры области - $2\pi \times 1 \times \pi$. Расчет проводится при числе Рейнольдса 5600.

Размеры области и сгущение сетки подобраны так, чтобы сравниться с DNS расчетами Moser/Kim/Moin (1987 - 1999)



Исследуемые статистические характеристики турбулентного потока в плоском канале

- Средний профиль скорости. Осреднение производится по времени (и, для удобства представления, по двум периодическим направлениям). Графики принято изображать в пристенных координатах.

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad y^+ = \frac{y}{\delta_\nu} \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad \delta_\nu = \frac{\nu}{u_\tau}$$

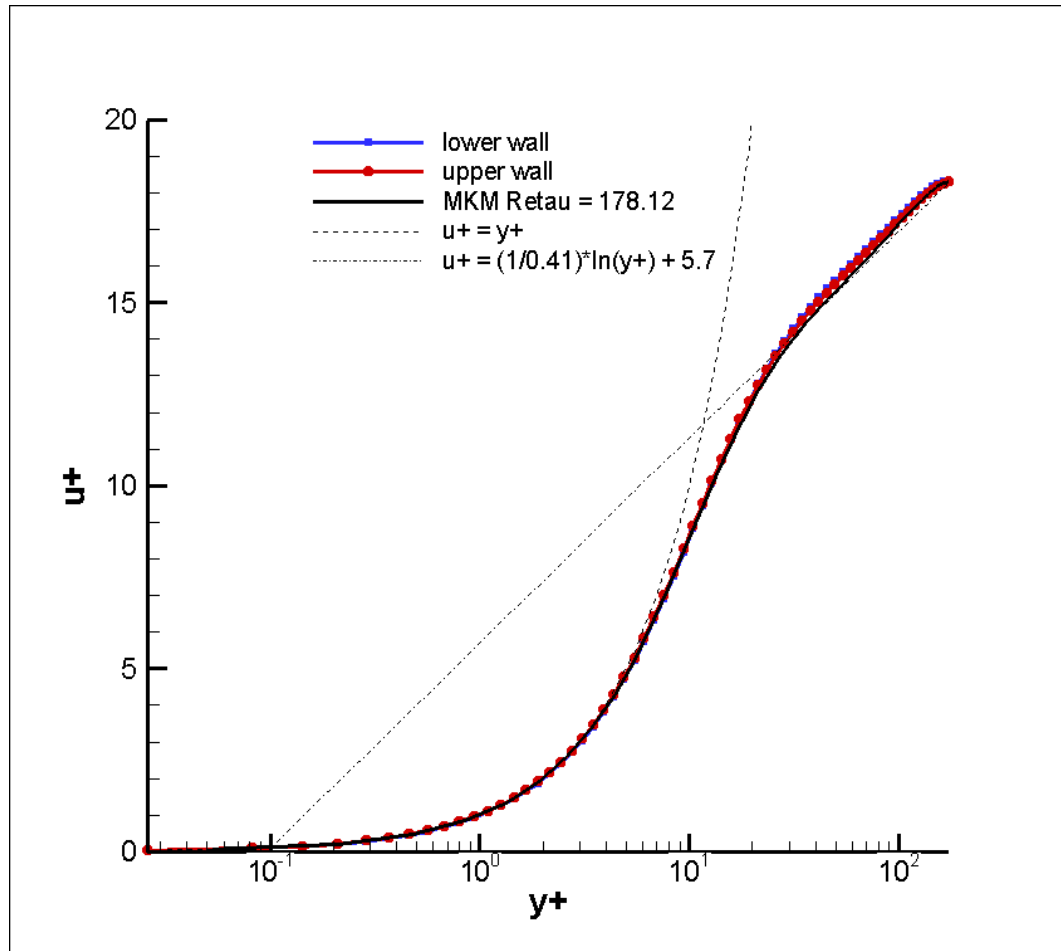
- Изменение вязкого (the viscous shear stress) и турбулентного (Reynolds shear stress) напряжения трения в нормальном направлении от стенки. Изучается вклад этих напряжений в зависимости от расстояния от стенки

$$\tau_{visc} = \rho \nu \frac{du}{dy} \quad \tau_{turb} = -\rho \langle u'v' \rangle$$

- Среднеквадратичные осредненные флуктуации в зависимости от расстояния от стенки

$$u_{rms} = \sqrt{\langle u'_i u'_i \rangle}$$

Распределение средней скорости в канале

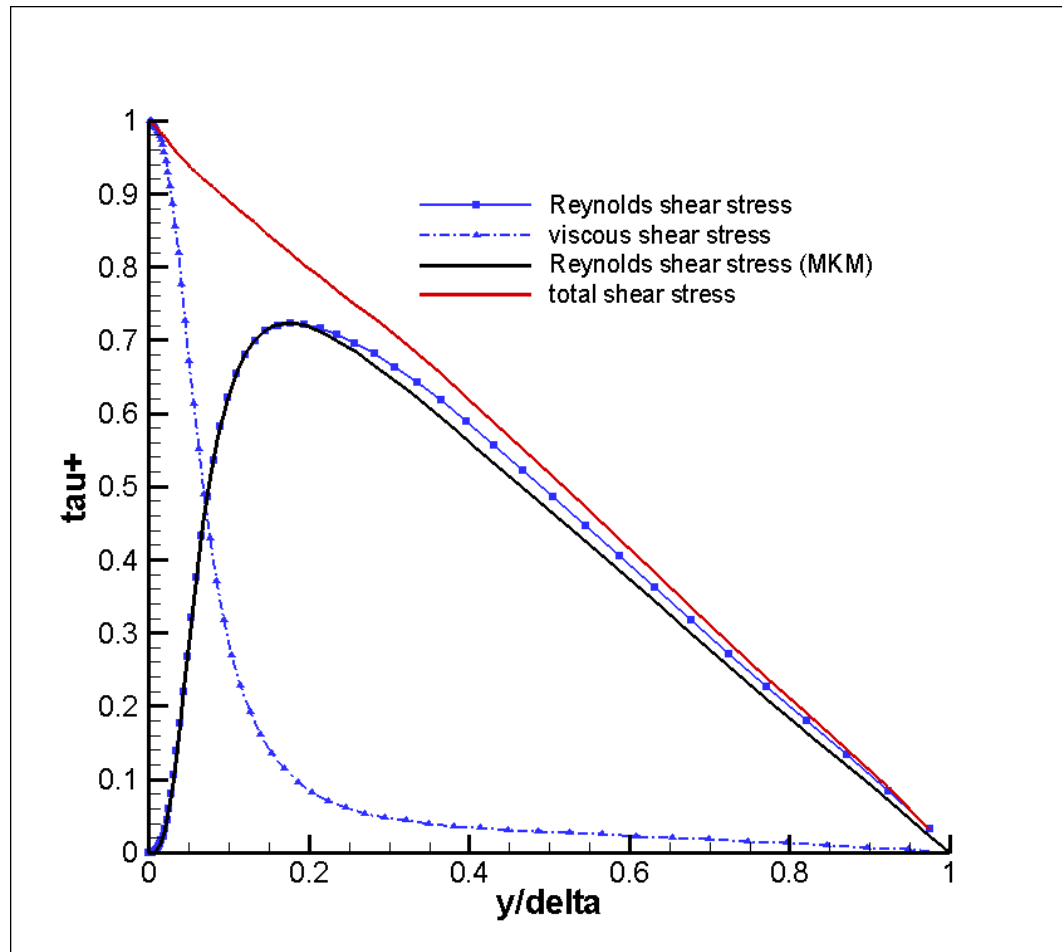


Коэффициент сопротивления в канале

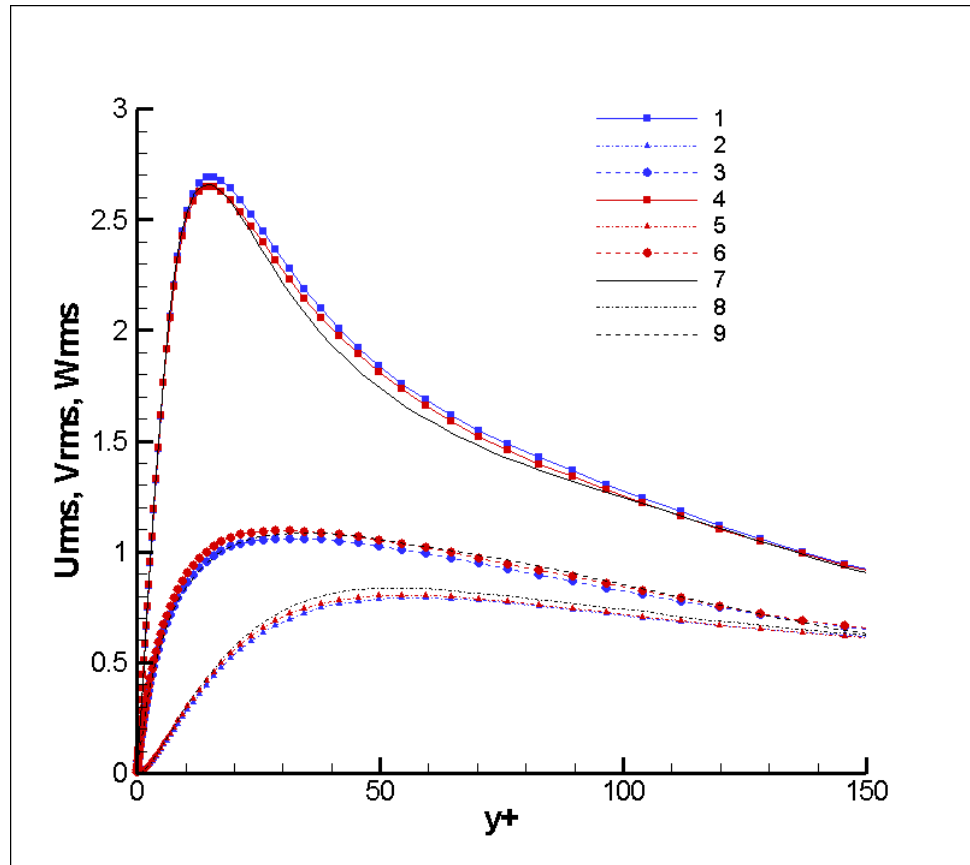
$$C_f = 0.073 \text{Re}_m^{-0.25} = 8.44 \times 10^{-3}$$

$$C_f = \tau_w / \left(\frac{1}{2} \rho U_m^2 \right) \quad 8.015 \pm 0.112 \times 10^{-3} \quad (\text{MKM} - 8.18 \times 10^{-3})$$

Распределение вязкого и турбулентного напряжения трения в канале



Среднеквадратичные осредненные флуктуации



Профили среднеквадратичных флуктуаций скорости: 1), 2), 3) U_{rms} , V_{rms} , W_{rms} на нижней стенке соответственно; 4), 5), 6) U_{rms} , V_{rms} , W_{rms} на верхней стенке соответственно; 7), 8), 9) U_{rms} , V_{rms} , W_{rms} в работе МКМ

Заключение

- Приведен результат прямого численного моделирования течения вязкой несжимаемой жидкости по схеме Кабаре в плоском канале.
- Уравнение Пуассона для давления решается с помощью параллельной реализации алгоритма быстрого прямого метода, и параллельной прогонки.
- Расчеты проводились на суперкомпьютере «Ломоносов» на 256 процессорах. Расчетное время составило 2 дня.
- Осреднение характеристик течения проводилось в течении 50 пролетов области, после достижения статистически устойчивого состояния.
- Результаты показали хорошее совпадение с расчетными данными Moser, Kim, Moin (1999г.) и экспериментальным законом Dean 1978.
- Схема Кабаре явная и поэтому шаг интегрирования по времени сильно зависит от разрешения сетки. В данном расчете сетка была взята таким образом, что дальнейшее ее измельчение возле границы не приводит к изменению коэффициента сопротивления более чем на 0,4%. На пристенную область ($y^+ < 10$) приходилось 30 ячеек.