

# Отчёт

6 июня 2018 г.

## Прямое численное моделирование нестационарной аккумуляции частиц в пристенной турбулентности

Руководитель: Владимир Рыженьков, v.o.ryzhenkov@gmail.com

Исполнитель: Хомченко Илья, senior.bart2014@yandex.ru

### 1 Постановка задачи

Передо мной стояла задача провести прямое численное моделирование динамики инерционных частиц в вязком подслое в плоском канале.

### 2 Современное состояние проблемы

В данной работе было проведено исследование аккумуляции частиц в вязком подслое в плоском канале. В ходе данной работы был успешно освоен комплекс программ Nek5000, который являлся основным инструментом моделирования.

В проделанной работе было проведено знакомство не только с численными методами, но и с методами численного моделирования. Данные методы помогли в реализации описания эволюции частиц во времени и интерполяции поля скорости жидкости в пространстве.

В ходе работы удалось промоделировать движение частиц в вязком подслое, а также их аккумуляцию. Результаты работы были сравнены с работами [1] и [2] и показали хорошее соответствие. Была установлена схожесть в поведении графиков концентраций частиц и напряжений Рейнольдса.

### 3 Описание проблемы

В работе рассматривается поведение небольших твёрдых сферических частиц в турбулентном потоке. Плотность дисперсной фазы предполагается много большей плотности несущей фазы, а размер таких частиц не превосходит колмогоровского микромасштаба. В силу таких допущений, уравнения для движения жидкости с взвешенными частицами

могут быть представлены в приближении точечных сил, которые приложены к центрам масс отдельных частиц. Более того, в рассматриваемых условиях поведение частиц определяется лишь силой гидродинамического сопротивления. Данная сила является главным фактором, приводящим частицы в движение и определяющим ускоряющее или тормозящее обратное влияние частиц на поток. Из-за того, что плотность частицы  $\rho$  много больше плотности среды  $\rho_0$ , силы, обусловленные неоднородностью движения и нестационарностью не принимаются во внимание. В данной работе также не принимаются во внимание эффекты, связанные с вращением частиц.

В работе было проведено моделирование движения частиц в предварительно заданном поле скорости жидкости в трёхмерном канале. Моделирование проводилось с помощью программы Nek5000. Для решения поставленной задачи использовались методы Бубнова-Галёркина, спектральных элементов, Адамса-Башфорта и интерполяционные полиномы Лагранжа.

## 4 Результаты

### 4.1 Вычислительная область

В работе проводилось моделирование турбулентного течения вязкой жидкости с взвешенными частицами в прямоугольном бесконечном канале. Данная задача соответствует классической задаче о течении жидкости в канале.

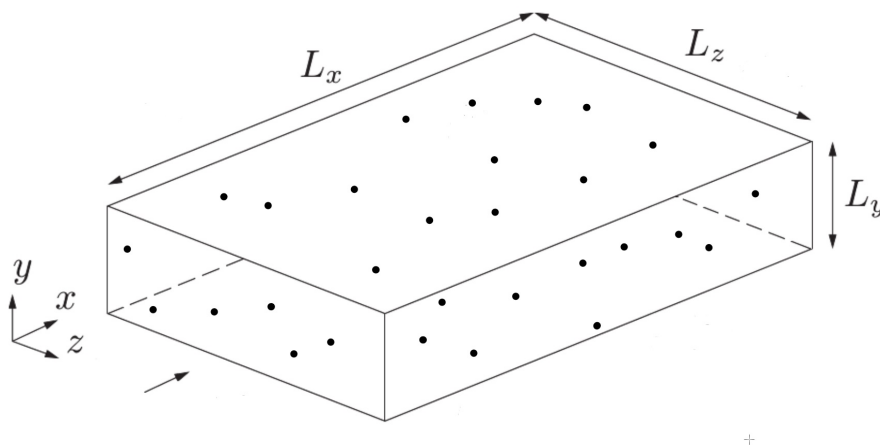


Рис. 1: Расчётная область задачи с частицами

Канал представляет собой прямоугольный параллелепипед с размерами  $L_x \times L_y \times L_z = 4\pi H \times 2H \times 2\pi H$  (рис 1.), который разделён сеткой на гексогедральные параллелепипеды в количестве 30 по оси  $Ox$ , 20 по оси

$Oy$ , 25 по оси  $Oz$ . В каждом из спектральных элементов находится по 512 точек сетки. Число Рейнольдса строилось по полуширине канала  $H$  и среднерасходной скорости  $U$  и равнялось  $Re = 2800$ . Начальное условие для продольной компоненты поля скорости среды задавалось в виде  $\propto (1 + y)^4$  и случайного шума для остальных компонент.

## 4.2 Профиль концентрации частиц

В данной работе проводилось моделирование движения частиц в плоском канале. Частицы, в количестве 50 000 штук, были случайным образом распределены в канале. Частицы двигались в предварительно заданном поле жидкости в узлах сетки, описанной выше. Скорость жидкости в произвольной точке интерполировалось с помощью полином Лагранжа, а эволюция координат и скоростей частиц определялось с помощью метода Адамса-Башфорта третьего порядка по времени. Данный метод был выбран в работе для достижения приемлемой точности. Шаг по времени  $dt = 2.2 \cdot 10^{-3}$  равнялся единицам  $U / H$ , где  $U$  – среднерасходная скорость,  $H$  – полуширина канала.

Профиль концентрации в момент времени  $t = 1000^+$  был сравнен с DNS в работе [1].

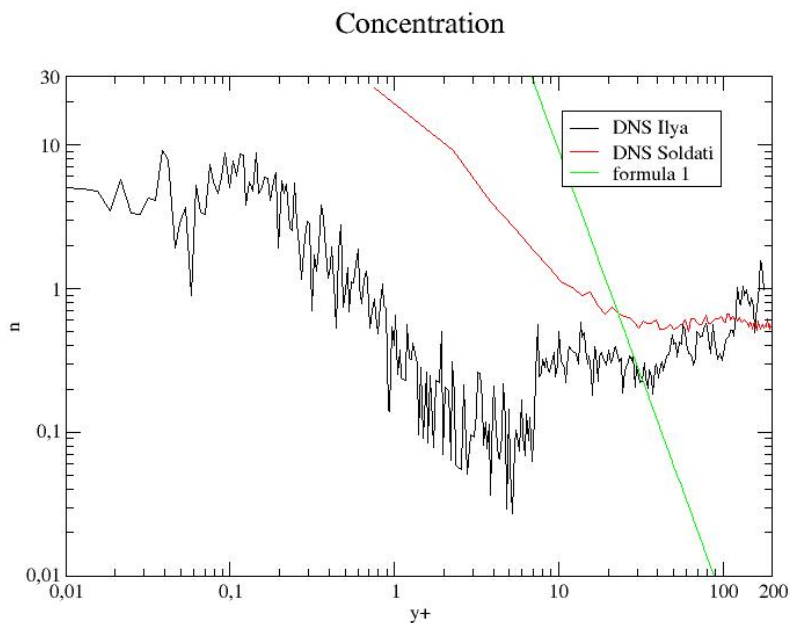


Рис. 2: Профиль концентрации частиц

### 4.3 Напряжения Рейнольдса

В настоящей работе было проведено измерения напряжений Рейнольдса. На следующем графике показано сравнение полученных в работе данных с результатами прямого численного моделирования, приведёнными в [2]. В настоящей работе проводилось осреднение по направлениям, в которых концентрация была однородна, т. е.  $x$  и  $z$ , в то время как в работе [2] осреднение проводилось по времени.

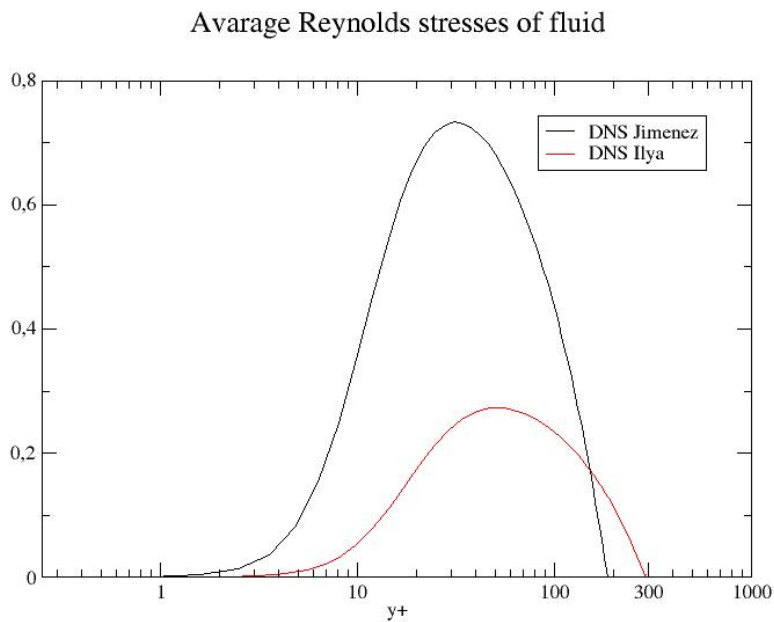


Рис. 3: Осреднённый тензор напряжений Рейнольдса несущей среды. Компонента  $xy$

Величина компоненты тензора напряжений Рейнольдса, приведена в единицах стенки т. е. обезразмерена на скорость трения на стенки. Отличие между данными можно объяснить различным значением вязкости, и соответственно, числа Рейнольдса  $Re$ , при которых проводилось моделирование.

Отдельное внимание стоит уделить мгновенным напряжениям Рейнольдса, значение которых было сравнено с работой [1]. Различие в данных можно объяснить различными начальными условиями, а также различным типом частиц, моделирование которых производилось. В работе [1] было проведено моделирование частиц с конечным радиусом, поэтому график более гладкий, напротив в данной работе изучались точечные частицы, которые могут двигаться как угодно: вплотную подходить как друг к другу, так и к стенке.

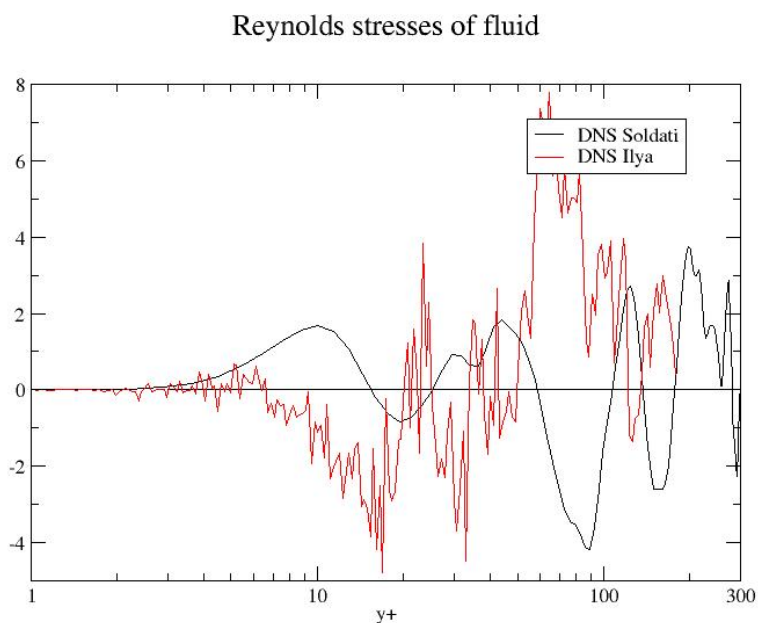


Рис. 4: Осреднённый тензор напряжений Рейнольдса несущей среды. Компонента  $xy$

## 5 Эффект от использования кластера в работе

Благодаря использованию кластера удалось запустить расчёты с большим количеством спектральных элементов, из которых состояла расчётная сетка. Благодаря этому удалось получить точное решение.

## 6 Заключение

В заключении хотелось бы отметить, чтобы кластер продолжал бесперебойно работать, и избежать аварий. Буду благодарен администрации кластера за увеличение его производительности.

## Список литературы

- [1] Picciotto M., Marchioli C., Soldati A. Database of Particles Dispersed in Turbulent Channel Flow.
- [2] Del Alamo, J. C., Jimenez, J.: Spectra of the very large anisotropic scales in turbulent channels. Phys. Fluids 15, 41-44 (2003).