

ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ПЕРЕМЕННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ

Состав коллектива:

- Ивашенко Владислав Александрович (ФФ НГУ, 4 курс)
- Мулляджанов Рустам Илхамович (ИТ СО РАН, к.ф.-м.н., с.н.с.) – научный руководитель

Представленные ниже материалы являются результатами выпускной квалификационной работы на соискание степени бакалавра физики, которая выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант №14-19-01685).

1 Мотивация

Турбулентные потоки с переменной плотностью широко встречаются как в природе, так и в технических устройствах. Особый интерес представляет влияние переменной плотности (стратификации) среды на характеристики турбулентного перемешивания.

В данной работе мы исследуем струйное течение воздуха при фиксированном числе Рейнольдса, которое истекает в пространство, затопленное воздухом, гелием или углекислым газом. Такая постановка задачи позволяет проводить прямое сравнение между тремя случаями, поскольку входные граничные условия фиксированы, и представляет собой прототип широкого класса свободных сдвиговых потоков.

2 Вычислительный код Nek5000

Для дискретизации уравнений в данной работе используется метод спектральных элементов, реализованный в вычислительном коде Nek5000 [1], первая версия которого появилась в открытом доступе еще в 1996 году. Для решения уравнений используется дискретизация по времени 3-го порядка и метод спектральных элементов для дискретизации по пространству.

3 Постановка задачи

Расчетная область представляла собой цилиндр радиуса $6D_{\text{сопла}}$ и длиной $16D_{\text{сопла}}$, где $D_{\text{сопла}}$ - диаметр круглой длинной трубы, из которой вытекает воздушный поток в затопленное пространство (см. Рис. 1). Входные граничные условия генерируются во вспомогательном расчете трубы длиной $5D_{\text{сопла}}$ с периодическими граничными условиями, которые далее копируются (поле скорости в плоскости $r - \varphi$) каждый шаг по времени в основную область. Число Рейнольдса, построенное по U и $D_{\text{сопла}}$, равно 5300. Количество узлов дискретизационной сетки составляет 655 тыс. для подводящей трубы и более 15.8 млн. для основной вычислительной области. Для их построения использовались полиномы Лагранжа степени $N = 7$. В слое смещения и около твердых границ производилось сгущение вычислительной сетки, для того, чтобы “разрешать” мелкомасштабные вихревые структуры, возникающие в этих областях.

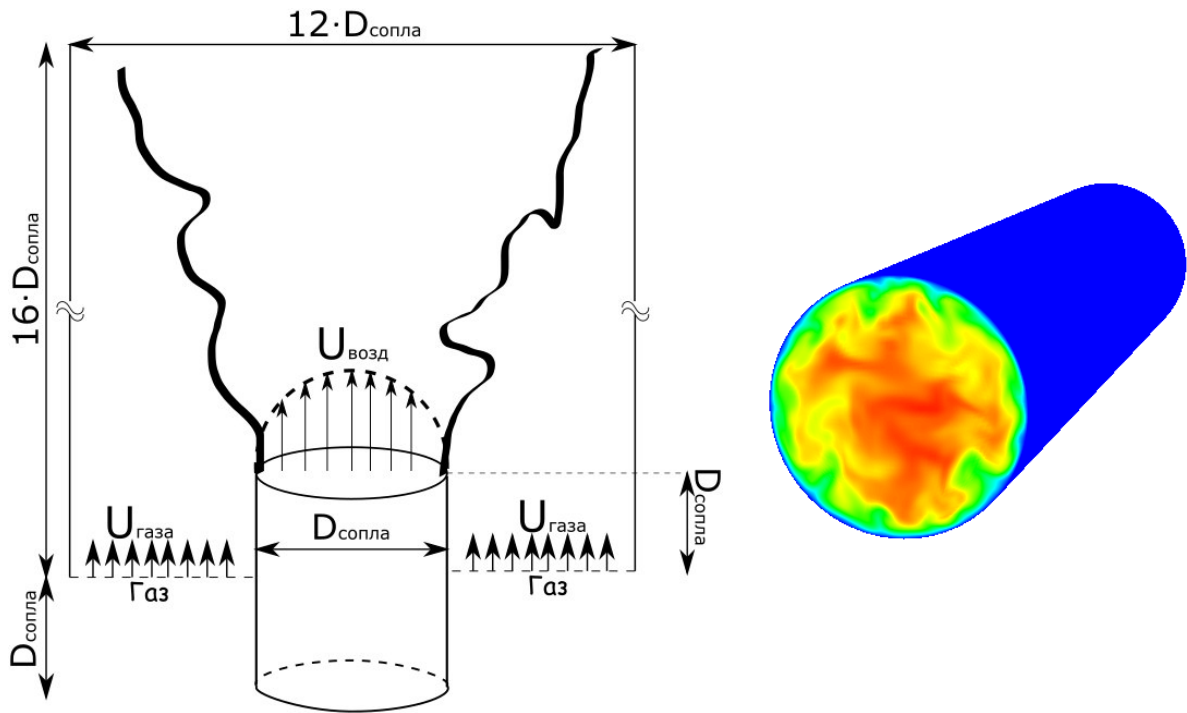


Рис. 1: Слева: геометрия основной расчетной области. Справа: периодическая область для вспомогательного расчета.

4 Полученные результаты

Интересно рассмотреть скорость распространения “фронта” концентрации вниз по течению со временем. На Рис. 2 показано мгновенное поле концентрации в различные моменты времени t .

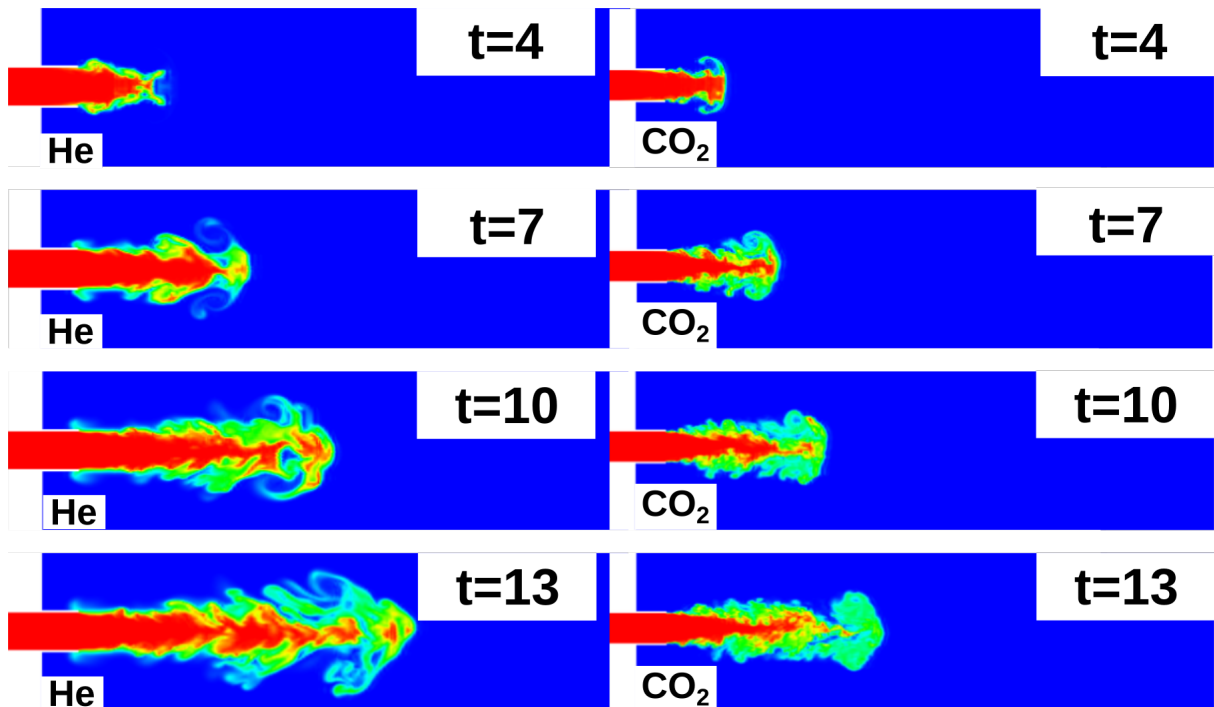


Рис. 2: Поле концентрации c для двух расчетов (He , CO_2) в различные моменты времени. Красный цвет соответствует значению $c = 1$ (воздух), синий - $c = 0$ (He или CO_2).

На Рис. 3 показано изменение координаты рассматриваемого “фронта” поля s в зависимости от $t^{1/2}$ вместе с данными недавней численной работы [2], в которой исследовалось распространение струи (воздух-воздух) с почти однородным ламинарным профилем скорости из сопла с поджатием при более высоких числах Рейнольдса ($Re = 1.9 \times 10^5$).

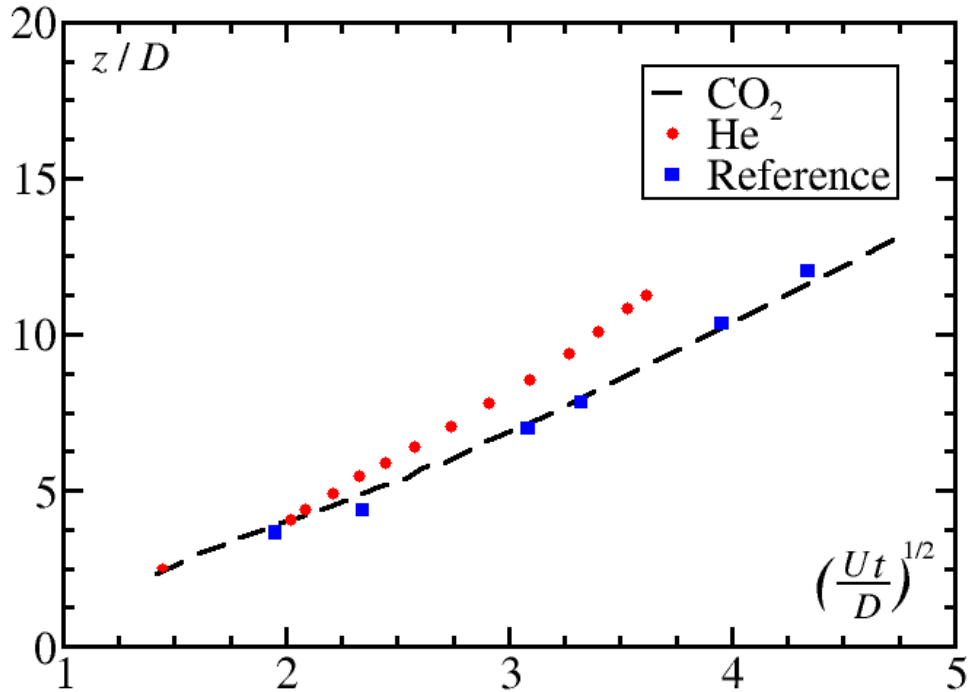


Рис. 3: Сравнение скорости распространения струи воздуха в окружающем газе для систем “воздух - CO_2 ” и “воздух - He ” с работой [2].

Несмотря на отличия во входных условиях, получено отличное согласие между результатами работы [2] и результатами расчетов пары “воздух- CO_2 ” (с отношением плотностей ≈ 1). Можно сделать предположение, что для рассматриваемого нестационарного явления влияние стратификации является более важным фактором по сравнению с величиной числа Рейнольдса и уровнем турбулентности на входе.

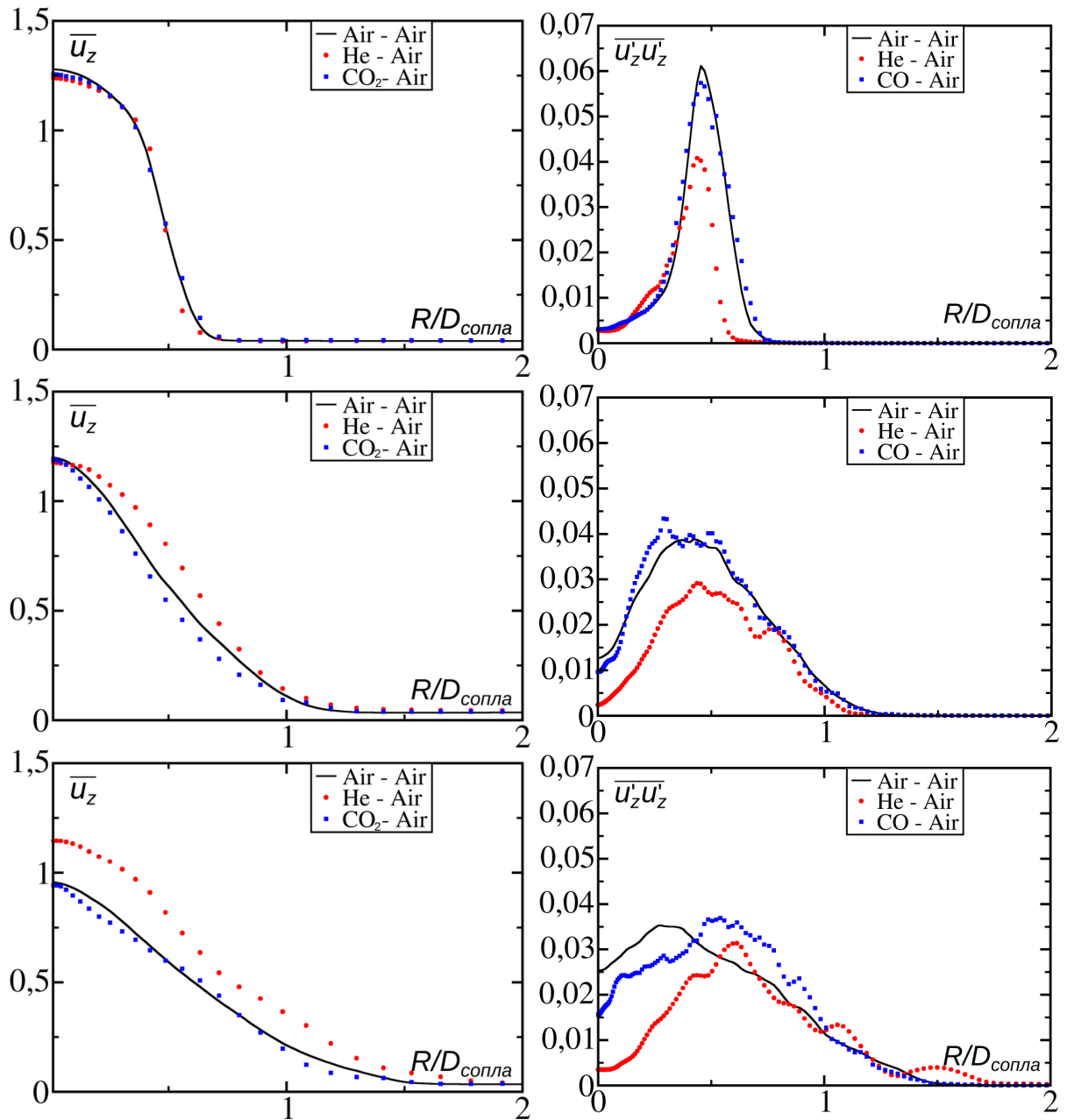


Рис. 4: Сравнение осредненных по времени радиальных профилей скорости и пульсаций для всех трех расчетов в сечениях $z/D_{\text{сопла}} = 1, 4, 7$.

На Рис. 4 показано сравнение средних профилей скорости и пульсаций в тех же сечениях, что и прежде. Результаты для пар “воздух-воздух” и “воздух- CO_2 ” достаточно похожи. В случае пары “воздух- He ” можно отметить, что продольная скорость затухает медленнее, чем в других рассмотренных случаях. Кроме того, уровень турбулентных пульсаций оказывается более низким, что по нашему мнению связано с понижением локального числа Рейнольдса в слоях смешения из-за меньшего значения плотности.

Дальнейшая работа включает в себя более подробный анализ статистических характеристик полученных решений, а также исследование влияния скорости спутного потока на процессы перемешивания стратифицированной струи. Особое внимание будет уделено анализу эволюции характерных динамически значимых вихревых структур в потоке. Полученные результаты будут являться важным звеном в теории затопленных струй с переменной плотностью.

5 Благодарность

Выражаем благодарность *Информационно-вычислительному центру Новосибирского государственного университета* за предоставление вычислительных ресурсов для проведения расчетов.

Список литературы

1. Kerkemeier S. G., Fischer P. F., and Lottes J. W. Nek5000: Open source spectral element cfd solver. available at <http://nek5000.mcs.anl.gov>, 2008.
2. Ghasemi A., Pereira A., and Li X. Large eddy simulation of compressible subsonic turbulent jet starting from a smooth contraction nozzle. *Flow, Turbulence and Combustion*, 98(1):83–108, 2017.