

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ ОБТЕКАНИЯ ГИДРОПРОФИЛЯ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ

## Состав коллектива:

- Дауэнгауэр Елизавета Ильинична (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 фонда фундаментальных исследований (грант №18-38-00907).*

## 1 Мотивация

Задача обтекания потоком жидкости или газа твердого затопленного тела встречается во многих отраслях техники и промышленности: гидравлических газовых машинах, транспортировке жидкостей и газов, гидротехнике, судостроении, ракетной и авиационной технике и т.д. Особый интерес представляет задача обтекания крылового профиля.

В данной работе совместно с экспериментами, проводимыми так же в ИТ СО РАН, мы численно исследуем трехмерную нестационарную задачу обтекания модельной лопатки, помещенной в прямоугольный канал, при нулевом угле атаки.

## 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, а так же метод моделирования крупных вихрей (англ. Large Eddy Simulation (LES)).

## 3 Постановка задачи

Расчетная область представляет собой гидропрофиль, который является уменьшенной копией направляющей лопатки в гидротурбине Фрэнсиса (профиль близок к NASA 0022-34), в прямоугольном канале. Геометрические размеры канала и профиля взяты согласно экспериментальным работам [2, 3], проводимым в Институте теплофизики СО РАН. Пространственные размеры прямоугольного канала составляют  $L_x \times L_y \times L_z = 7.6c \times 2.5c \times 0.8c$ , где  $x$ ,  $y$  и  $z$  обозначают продольное, вертикальное и поперечное направление, соответственно, см. Рис. 1,  $c = 10$  см обозначает длину хорды крыла (расстояние между передней и задней точками гидропрофиля). Мы исследуем различные режимы течения при числе Рейнольдса  $Re_c = U_0 c / \nu$  равном 500,  $5.0 \times 10^3$ ,  $5.0 \times 10^4$  и  $1.2 \times 10^6$ , где  $U_0$  обозначает среднерасходную скорость натекающего потока. Профиль скорости натекающей жидкости представляет собой однородный стационарный поток с относительно тонкими пограничными слоями около

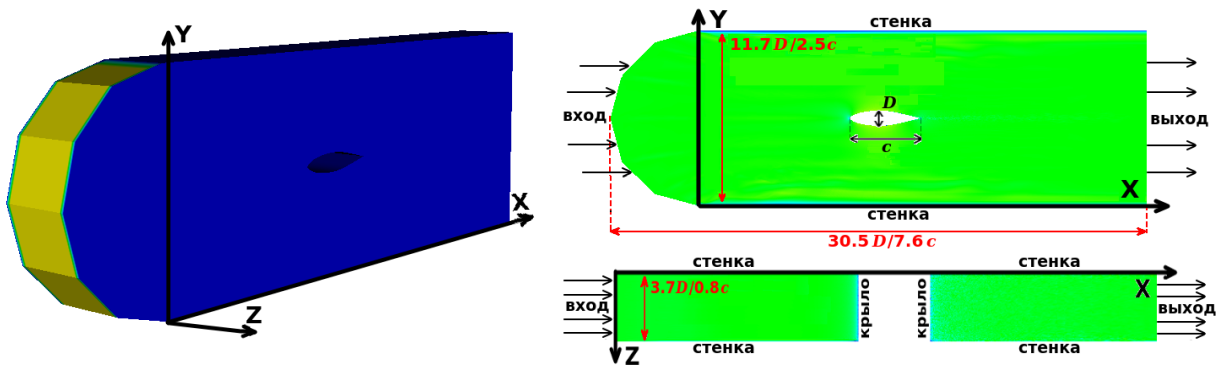


Рис. 1: Слева: визуализация трехмерной расчетной области. Справа: двумерные сечения расчетной области в плоскости  $x-y$  и  $z-x$ , где выделены входные и выходные границы, а так же показаны все размеры вычислительной области в терминах хорды ( $c$ ) и диаметра ( $D$ ) крыла.

стенок, данные о которых имеются также из предварительных экспериментов наших коллег.

Для относительно низких чисел Рейнольдса  $Re_c = 500, 5.0 \times 10^3, 5.0 \times 10^4$  использовалась одна сетка с числом спектральных элементов  $N_{se} = 3.83 \times 10^4$  и порядком полиномов  $N = 6$ . Для числа Рейнольдса  $Re_c = 1.2 \times 10^6$  количество спектральных элементов составило примерно  $14 \times 10^4$  с порядком полиномов  $N = 8$ .

## 4 Полученные результаты

На Рис. 2 представлены осредненные по времени профили продольной компоненты скорости в четырех вертикальных сечениях около гидропрофиля в середине канала относительно направления  $z$ . Для числа Рейнольдса  $Re_c = 1.2 \times 10^6$  сравнение расчетных результатов с экспериментальными [2] показало отличное совпадение. Видно также, что амплитуда вектора скорости уменьшается с увеличением числа Рейнольдса, что связано с вязкими эффектами, которые влияют на входной профиль скорости. Поскольку точным решением уравнений Навье-Стокса является параболический профиль продольной скорости, то при низких числах Рейнольдса входной профиль скорости, который довольно далек по форме от параболического, начинает меняться. Это продемонстрировано на Рис. 3, где показано поле продольной скорости в первой половине расчетной области до гидропрофиля при двух числах Рейнольдса.

На Рис. 4 показано мгновенное поле продольной компоненты скорости, а также поле давления в плоскости  $x-y$  в среднем сечении канала вдоль  $z$ . Видно, что для небольших чисел Рейнольдса  $Re_c = 500$  и  $5.0 \times 10^3$  течение остается ламинарным около гидропрофиля. С увеличением  $Re_c$  происходит турбулизация в слое смешения. В случае  $Re_c = 5.0 \times 10^4$  уже на расстоянии примерно  $19D$  (или около  $3D$  от передней кромки) наблюдается рост гидродинамических возмущений в пограничном слое, после чего происходит турбулизация потока. Для  $Re_c = 1.2 \times 10^6$  вихревая динамика реализуется примерно на том же расстоянии, однако, пограничный слой имеет гораздо меньшую толщину. Анализ поля давления показывает, что максимальное значение достигается у передней кромки. Двигаясь вдоль поверхности крыла в направлении оси  $x$ , давление существенно падает, а затем в хвостовой части начинает снова расти.

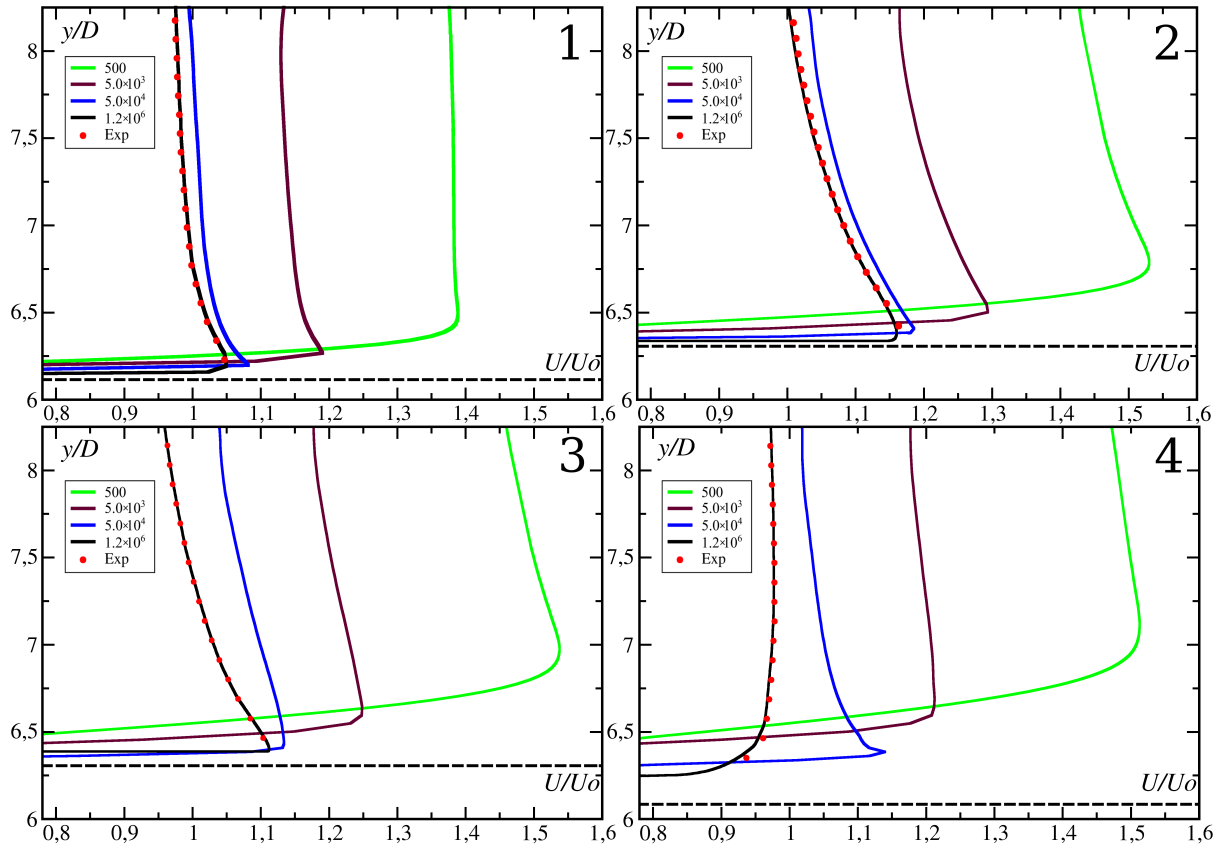
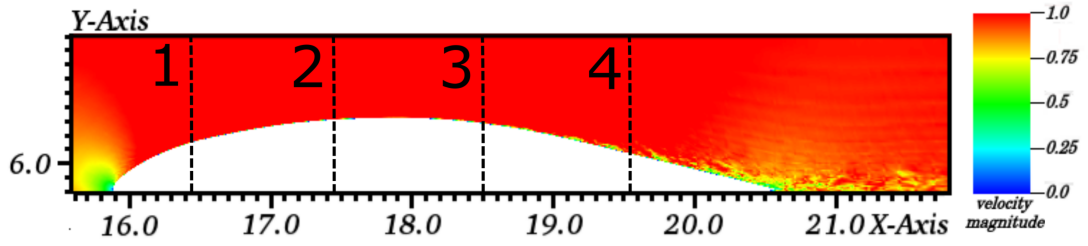


Рис. 2: Профили осредненной по времени продольной компоненты скорости для всех рассматриваемых случаев (линии) в сечениях 1-4. Точками показаны экспериментальные данные [2] для  $Re_c = 1.2 \times 10^6$ .

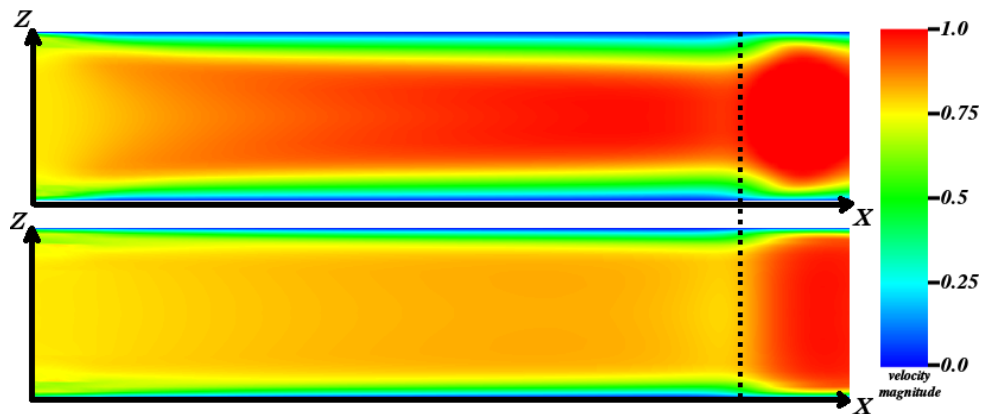


Рис. 3: Поле продольной компоненты скорости в плоскости  $x - z$  для  $Re_c = 500$  (сверху) и  $Re_c = 5.0 \times 10^3$  (снизу). Пунктирной линией обозначена позиция передней кромки крыла.

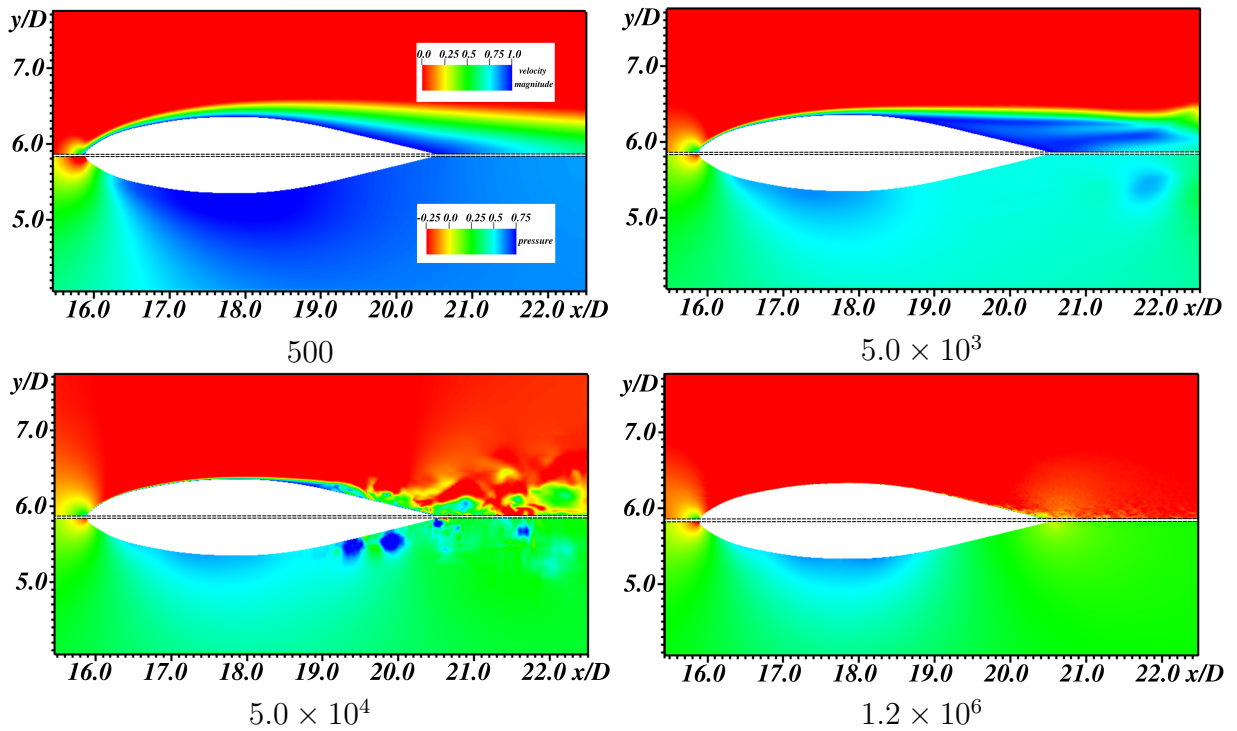


Рис. 4: Мгновенное поле продольной компоненты скорости (сверху) и поле давления (снизу) для  $Re_c = 500, 5.0 \times 10^3, 5.0 \times 10^4$  и  $1.2 \times 10^6$ .

Для объяснения данного явления можно использовать уравнение Бернулли:

$$\frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} = const, \quad (1)$$

которое справедливо для стационарного течения вдоль линии тока. Из этого уравнения следует, что при уменьшении скорости потока перед передней кромкой гидропрофиля давление должно повышаться, как и показано на Рис.4. Далее вдоль крыла поток ускоряется, потому что сечение канала уменьшается, что приводит к локальному падению давления. Аналогичным образом происходит рост давления в хвостовой части.

*Дальнейшая работа будет направлена на исследование спектральных характеристик потока и анализ влияния угла атаки.*

## 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. Kravtsova A. Yu., Markovich D. M., Pervunin K. S., Timoshevskiy M. V., and Hanjalić K. High-speed visualization and PIV measurements of cavitating flows around a semi-

circular leading-edge flat plate and NACA0015 hydrofoil. *International Journal of Multiphase Flow*, 60:119–134, 2014.

3. Pervunin K. S., Timoshevskiy M. V., Churkin S. A., Kravtsova A. Yu., Markovich D. M., and Hanjalić K. Cavitation on a scaled-down model of a francis turbine guide vane: high-speed imaging and PIV measurements. *International Journal of Multiphase Flow*, 656(1):012166, 2015.