



УДК 621.039.516: 519.6

Д.А. Сергеев, М.И. Вдовин, О.С. Ермакова,  
А.А. Кандауров, А.И. Коньков, А.С. Суворов, Ю.И. Троицкая

*Институт прикладной физики РАН, Россия*  
603950, Нижний Новгород, Ульянова ул. 46, E-mail: [daniil@hydro.appl.sci-nnov.ru](mailto:daniil@hydro.appl.sci-nnov.ru)

## **ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ ОБТЕКАНИЯ НА ОСНОВЕ СРАВНЕНИЯ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ**

### **АННОТАЦИЯ**

В данной работе приведены основные результаты сравнения экспериментального и численного моделирования обтекания объекта препятствия плоскопараллельным потоком. Было произведено сравнение общих полей картин течений, а также спектральных характеристик сигналов, получаемых при помощи PIV-методов и в ходе расчета в рамках метода моделирования отсоединенных вихрей.

ОБТЕКАНИЕ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПОЛЯ СКОРОСТИ, PIV

### **ВВЕДЕНИЕ**

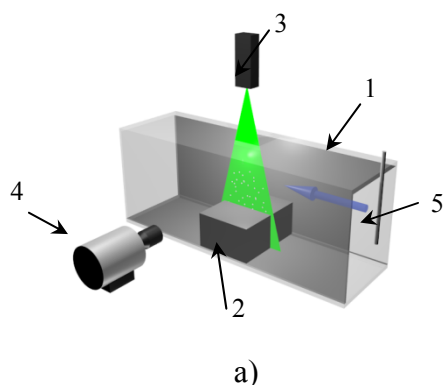
Задачи численного и лабораторного моделирования течений образующихся при обтекании различных объектов потоками жидкостей и газов представляют собой интерес с точки зрения многочисленных приложений (судо-, авиа- и автомобилестроении). При этом интерес вызывает не только измерение интегральных характеристик, таких как сила сопротивления (коэффициент лобового сопротивления) или подъемная сила, но также изучение характера обтекания, параметров флуктуаций, (в том числе турбулентных) образующихся в следе за обтекаемыми объектами. Исследованию параметров турбулентных флуктуаций при обтекании различных объектов посвящено достаточно много экспериментальных исследований и работ, где использовалось прямое численное моделирование. При этом сравнение результатов исследований двумя разными способами затруднительно, из-за различия в параметрах эксперимента или численного счета, выбора планов и размеров областей наблюдения, а также точек контрольных измерений. Это препятствует в первую очередь верификации численных моделей, оптимизации процедур и их дальнейшему успешному развитию. Настоящая работа призвана частично восполнить этот пробел. В ней предлагается методика пошаговой верификации результатов численных расчетов на основе сравнения с результатами лабораторных экспериментов, осуществленных в рамках одного исследования. Подобная поэтапная проверка, начиная со сравнения общей картины обтекания и заканчивая измерениями параметров турбулентных флуктуаций в точке, проводилась впервые. Использование методов оптической анемометрии по изображениям частиц Particle Image Velocimetry (PIV) (см. [1]), основанных на визуализации потоков, позволило измерять поля скорости с высоким пространственным и временным разрешением. Численное моделирование проводилось с помощью пакета ANSYS.

## ОБЩАЯ СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Общая схема лабораторных экспериментов представлена на рис. 1, а, общий вид установки показан на рис. 1, б. Лабораторные измерения проводились на замкнутой аэродинамической трубе ИПФ РАН, характеризующейся низким уровнем интенсивности турбулентности (~1%) на входе рабочего участка. На трубе предусмотрена плавная регулировка скорости воздушного потока на входе в диапазоне от 0 до 16 м/с. Рабочее сечение трубы 315\*315 мм.

В рабочий участок помещался объект препятствия (параллелепипед) для обтекания. Размеры объекта составляли 500×315×47 мм. Поперечный размер практически равен ширине рабочего участка, что обеспечивает двумерный характер обтекания в трубе. Тело устанавливалось на специальный столик, передняя кромка которого имела хорошо обтекаемый профиль, чтобы поток при подходе к препятствию был горизонтальный плоскопараллельный. Скорость воздушного потока в экспериментах составляла 8 м/с. Соответственно число Рейнольдса рассчитанное по высоте препятствия равнялось  $2,6 \cdot 10^4$ .

Для измерений применялась схема PIV с непрерывной лазерной подсветкой и скоростной видеосъемкой [2]. Для создания высокой плотности засева, в отсутствие мощного дымогенератора использовались твердые частицы полиамида размером 20 мкм, которые выстреливались в поток с помощью специально разработанного устройства. В качестве источника для создания светового ножа использовался лазер мощностью 2 Вт, длина волны 532 нм. Вид сбоку снимался на высокоскоростную высокочувствительную цифровую видеокамеру NAC MEMRECAM HX-3.



- а – общая схема эксперимента, б – общий вид экспериментальной установки
1. рабочая часть канала,
  2. модельный объект (препятствие),
  3. лазер LCS-DTL-413 (2 Вт, 532 нм),  
скоростная видеокамера
  4. NAC MEMRECAM HX-3,
  5. инжестирующее устройство



Рис. 1. Экспериментальная установка

Использовался кросскорреляционный алгоритм обработки кадров, с фиксированным положением ячеек поиска скорости. Размер ячеек составлял 32\*32 пикселей (5\*5 мм). Для дополнительной визуализации в области экранировки перед экспериментом на верхнюю границу тонким слоем наносился спиртовой раствор, содержащий частицы. После высыхания он образовывал тонкую пленку частиц. В результате при обдувании во время эксперимента частицы захватывались воздушным потоком, обеспечивая визуализацию в непосредственной близости от верхней границы.

## ПРОЦЕДУРА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ ПРЕПЯТСТВИЯ

В качестве модели турбулентности для численного решения задачи было предложено использовать метод отсоединенных вихрей (сокр. DES от англ. «Detached Eddy Simulation» [3]), который обеспечивает описание в пристеночной области (пограничном слое) при помощи модели напряжений Рейнольдса (или RANS от англ. «Reynolds-averaged Navier–Stokes»), а в удаленной области (в свободной турбулентной струе) – при помощи метода крупных вихрей (или LES от англ. «Large Eddy Simulation»). Для решения нашей задачи в качестве RANS была выбрана модель переноса сдвиговых напряжений Ментера, представляющая собой комбинацию стандартной  $k-\omega$  и преобразованной  $k-\varepsilon$  модели, в которой скорость диссипации энергии турбулентности  $\varepsilon$  заменяется на завихренность  $\omega$  ( $k$  – кинетическая энергия турбулентности,  $\omega$  – удельная скорость диссипации турбулентной энергии,  $\varepsilon$  – скорость диссипации турбулентной энергии).

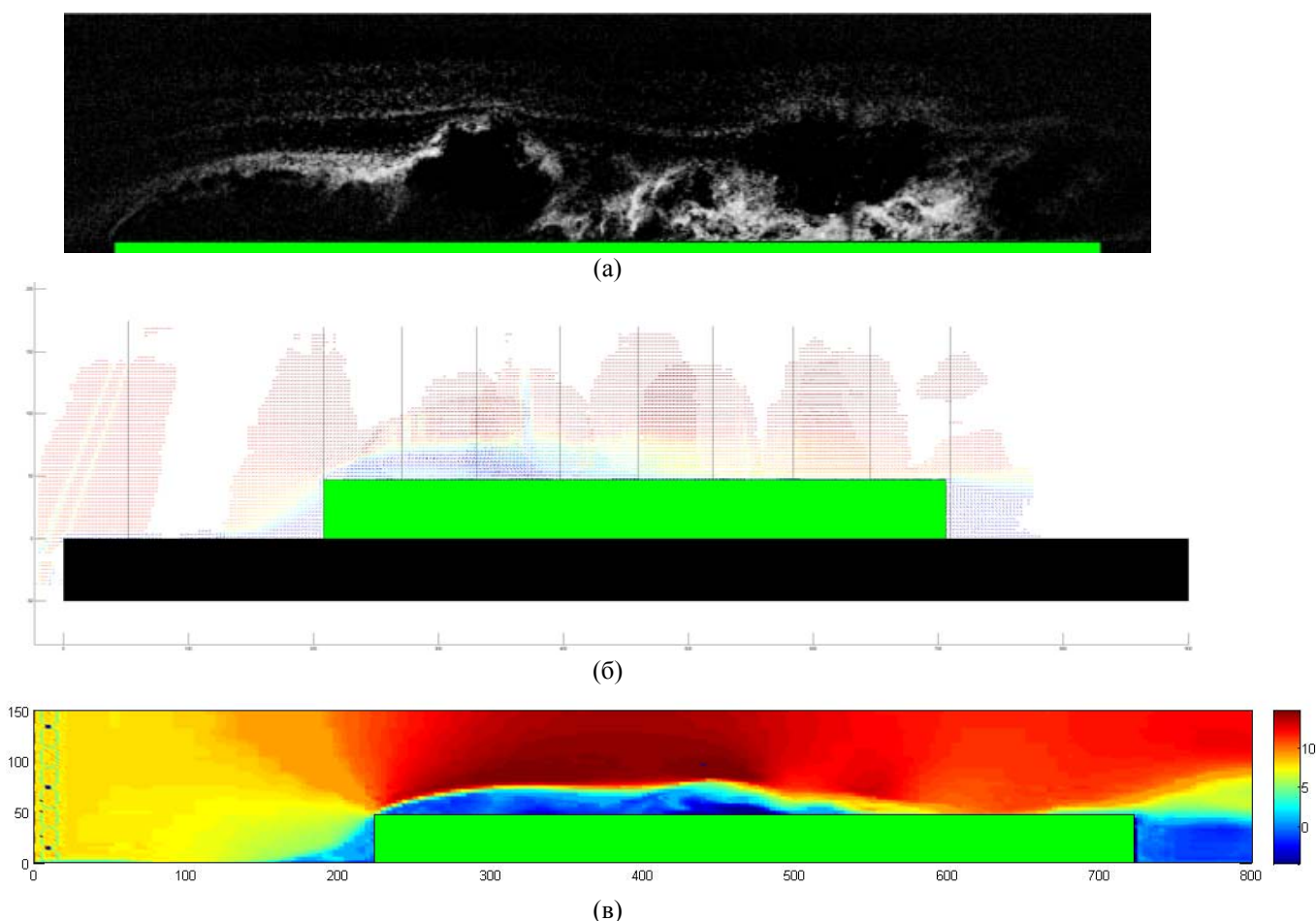


Рис. 2. Сравнение: мгновенной картины обтекания полученной с помощью визуализации (а), поля скорости полученного PIV –методом (б) поля горизонтальной компоненты скорости по результатам численных расчетов (скорость в м/с) (в)

## СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА И ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА.

Сравнение результатов расчетов с данными экспериментов осуществлялась в 2 этапа. Вначале сравнивались общие картины поля обтекания (см. рис. 2). Видно, что расчет хорошо воспроизводит общую картину включая характерные размеры застойной области. На втором этапе уже сравнивались пульсационные характеристики воздушного потока обтекания. На рис. 3 приведены результаты сравнения частотных спектров флуктуаций продольной компоненты скорости воздушного потока, полученных по данным PIV-

измерений и численного моделирования. Анализ частотных характеристик представляет наибольший интерес с точки зрения многочисленных практических приложений (например, исследование вопроса генерации звука турбулентностью).

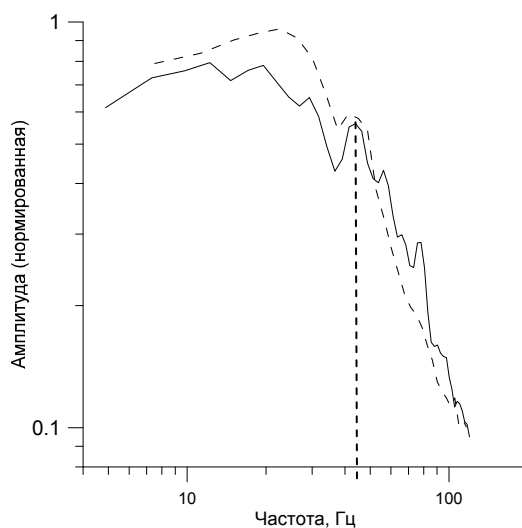


Рис. 3.

Видно что форма спектров хорошо совпадает для эксперимента и расчета хорошо совпадает. Кроме широкого низкочастотного пика проявилась частота около 45 Гц. Следует отметить, что она проявляется в том числе и на расчетных спектрах. Более низкочастотный пик, скорее всего, связан с колебаниями всей системы и определяется масштабами рабочего участка трубы и продольными масштабами препятствия. Более сильная изрезанность расчетных спектров связана, предположительно, с особенностями среды численного моделирования. Этот вопрос требует дополнительного изучения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрировано хорошее согласие картин обтекания моделей препятствия для двух значений скорости на входе потока. Сравнение частотных спектров пульсаций горизонтальной компоненты скорости и выявление общих пиков также подтвердило возможности численного моделирования турбулентного потока за препятствием.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№14-08-31740 мол\_а, 15-35-20953 мол\_а\_вед) и Гранта президента МК-3550.2014.5.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Adrian, R. J.**, 1991: Particle Imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **23**, 261–304.
2. **Сергеев Д.А** Измерительный комплекс для исследования течений жидкости методом Particle Image Velocimetry (PIV) на основе твердотельного лазера с диодной накачкой // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 3, С.138-144
3. **Spalart, P.R.** (1997). Comments on the feasibility of LES for wing and on a hybrid RANS/LES approach. 1st ASOSR CONFERENCE on DNS/LES. Arlington, TX.

D. A. Sergeev<sup>1</sup>, A.A. Kandaurov<sup>1</sup>, A.S Suvorov<sup>1</sup>,  
M.I. Vdovin<sup>1</sup>, O. S. Ermakova<sup>1</sup>, Yu. I. Troitskaya<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>*Institute of applied physics RAS, Russia,  
603950, Nizhny Novgorod, Uliyanova st, 46, E-mail: daniil@hydro.appl.sci-nnov.ru*

**NUMERICAL METHODS VERIFICATION FOR FLOW AROUND OBJECTS BASED ON  
ITS COMPARISON WITH LABORATORY EXPERIMENTS BY USING  
VISUALIZATION METHODS**

*This paper presents the main results of the comparison of experimental and numerical simulation of flow around the object plane-parallel flow obstacles. A comparison was made of common fields flow patterns, as well as the spectral characteristics of the signals obtained by means of PIV-methods and through calculation by the method of “Detached Eddy Simulation”.*

FLOWS, NUMERICAL MODELLING, PIV, VELOCITY FIELDS