



**Тринадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 29 июня— 03 июля 2015 г.**

УДК 532.57, 533.6.08, 519.6

М.В. Шестаков¹, М.П. Токарев¹, Небучинов А.С.¹, Д.М. Маркович^{1,2}

¹ *Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия
630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 1, E-mail: mvsh@itp.nsc.ru*

² *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия,
630090, Новосибирск, Пирогова ул., 2, E-mail: dmark@itp.nsc.ru*

**ПРИМЕНЕНИЕ PIV МЕТОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ
ТЕЧЕНИЯ В УПАКОВКЕ ТВЭЛОВ С ПРОВОЛОЧНОЙ НАВИВКОЙ**

АННОТАЦИЯ

В работе применен метод micro-PIV высокого пространственного и временного разрешения, позволяющий получать новые экспериментальные данные о мгновенной вихревой структуре течения в модели реальной сборки. Экспериментальные исследования были выполнены на гидродинамическом стенде ИТ СО РАН. Измерения мгновенных полей скорости выполнены в поперечных сечениях около центрального элемента. Анализ экспериментальных данных показал, что характер течения является сильно нестационарным с образованием продольных крупномасштабных вихревых структур. Показано наличие вторичных течений в области, прилегающей к проволочной навивке.

МЕТОД TIME-RESOLVED MICRO-PIV, ТЕЧЕНИЕ В ТВС, ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ

ВВЕДЕНИЕ

Разработка современного высоконапряженного оборудования в тепловой и атомной энергетике требует знания о характеристиках течения теплоносителя: полей давления, скорости, температуры и др. Это является особо актуальным для проблем интенсификации теплообмена в активных зонах ЯЭУ с ВВЭР, в том числе с помощью дистанционирующих навивок, дистанционирующих решеток и промежуточных решеток. Именно эти типы интенсификаторов рассматриваются в ближайшей перспективе как основные средства снижения максимальной температуры оболочки твэла, а также увеличения запасов до кризиса теплообмена [1, 2].

Необходимость информации о трехмерных полях скорости, температуре и давлении стимулирует развитие как экспериментальных исследований, так и разработку многомерных математических моделей неоднородных потоков, численных алгоритмов и программ расчета их гидродинамики и тепломассообмена [3, 4]. Они приходят на смену расчетным кодам, построенным на классических гомогенных и одномерных моделях и служивших в основном целям поверочного анализа балансов импульса, тепла и массы теплоносителя, поскольку искомыми переменными в них являются осредненные по сечению канала температура, скорость, перепад давления. Тогда как первопричинами, определяющими поведение теплоносителя и элементов ТВС, являются мгновенные трех (или, по крайней мере, двух-) мерные поля давления, скорости и температуры.

Основными методами при проектировании ТВС являются численные методы. Учитывая сложный нестационарный режим течения и широкий диапазон пространственных

и временных масштабов, в настоящее время вычислительные мощности не позволяют использовать метод DNS для расчета всей ТВС, и поэтому используют модели гибридные URANS/LES, LES, URANS и RANS. Для этих моделей необходимы начальные и граничные условия, которые обеспечивает физический эксперимент, а также верификация полученных численных данных в результате расчета. Основные экспериментальные методы, позволяющие получить пространственные распределения гидродинамических характеристик, являются бесконтактные методы на основе цифровой трассерной визуализации (PIV). В последнее время количество экспериментальных работ, использующих метод PIV, увеличивается. Однако основные экспериментальные работы выполнены для ТВС с дистанционирующими решетками, которые являются более разреженными и обеспечивают оптический доступ к измерительной области.

В настоящее время существует ряд работ по исследованию гидродинамики и теплообмена в пучках твэлов с дистанционирующей навивкой. Экспериментальные работы в данной области ограничены в основном определением средних по поперечному сечению чисел Нуссельта с использованием термопар, а также измерением гидравлического сопротивления сборки. Так, в работе [1] было проведено исследование зависимости местного коэффициента теплоотдачи продольно обтекаемыхборок стержней с проволочной навивкой от шага и числа заходов навивки. В работе [2] было проведено численное моделирование влияния способа дистанционирования на гидродинамику течения пучка твэлов. Верификация результатов численного моделирования была выполнена с использованием экспериментальных корреляций для гидравлического сопротивления. Турбулентная структура потока в сборке из шести твэлов была экспериментально изучена в работе [3] с использованием термоанемометров. Однако полученные результаты были точечными и не позволили восстановить мгновенную структуру потока в сборке. В работе [5] для численного моделирования течения в сборке была использована модель URANS. Были моделированы режимы течений при различных числах Рейнольдса от 5 000 до 21 5000. Было изучено влияние числа Рейнольдса и шага навивки на касательное напряжение на стенке, кинетическую энергию турбулентности, перемешивание и крупномасштабные вихревые структуры. Верификация расчетной модели проводилась на экспериментальных результатах [5], которые были ограничены измерением продольной компоненты скорости в сборке. Как можно заметить из приведенных работ для верификации численных моделей требуются экспериментальные данные, которые должны быть получены с высоким пространственным и временным разрешением. Целью нашей работы было применение современных экспериментальных методов и получение экспериментальных данных о вихревой структуре течения, формирующейся в поперечном сечении прозрачной модели фрагмента активной зоны из 19 элементов – имитаторов твэлов.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на гидродинамическом стенде (рис.1). На рис. 1, б представлена фотография фрагмента экспериментального гидродинамического стенда в прозрачной модели активной зоны с 19 элементами. Измерения полей скорости проводились с помощью метода PIV. На рис. 1 справа представлена фотография с расположением измерительной аппаратуры для измерений PIV методом. Все компоненты измерительной аппаратуры, лазер и камера, устанавливались на координатные балки, которые были жестко закреплены между собой и смонтированы на координатном механизме. Координатная система позволяла перемещать измерительную систему с точностью до 25 мкм. Блок лазерного излучения устанавливался на направляющую рельсу и располагался слева от рабочего участка.

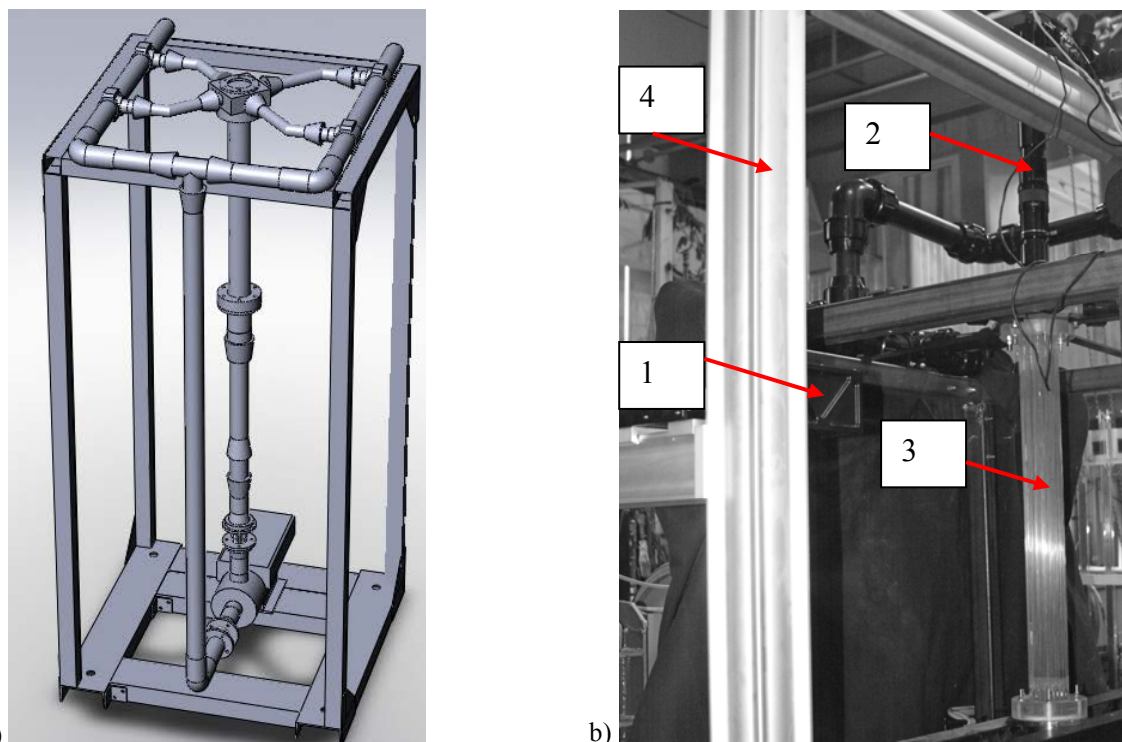


Рис. 1. а) Схема гидродинамического стенда; б) Фотография рабочего участка. 1 – лазер, 2 – камера с объективом, 3 – рабочий участок 4 – координатные балки

Для освещения частиц в потоке использовался сдвоенный лазер EverGreen (70 мДж, 532 нм, 10 нс) и высокоскоростной сдвоенный лазер Photonix DM-532-DH-150 (15 мДж, 532 нм, 100 нс, частота съемки 15 кГц). Плоскость лазерного ножа была расположена перпендикулярно оси сборки и оптической оси объектива. Лазерный нож, сформированный с помощью оптической насадки, освещал измерительную область в поперечном сечении сборки. Для регистрации образов частиц использовались камера ПОЛИС (4 Мрiх) и камера Photron FASTCAM SA5 (1 Мрiх, частота съемки 7 кГц). Камера крепилась на координатную балку через штативную головку 410 фирмы Manfrotto, которая располагалась сверху над выходным коллектором рабочего участка. Ось оптической системы (объектива) была параллельна оси сборки. Для высокого разрешения использовался микроскопный объективом K2/SC фирмы Infinity. Рабочей жидкостью являлась дистиллированная вода. Температура жидкости в рабочем участке поддерживалась постоянной и равнялась 40 градусов. Для измерения полей скорости использовалась измерительная система «ПОЛИС». В качестве трассеров использовались монодисперсные полиамидные частицы размером 5 мкм, плотность трассеров равнялась плотности жидкости. Толщина лазерного ножа составляла 1 мм. Для увеличения пространственного разрешения исследовалась только одна из шести криволинейных треугольных областей, сформированных поверхностями центрального и двух соседних элементов, обозначенная на (рис. 2, а) красным кружком. Расположение координатных осей было следующим; координата x и y располагались в поперечном сечении сборки, координата z была направлена по потоку и совпадала с осью центрального элемента. Эксперименты были выполнены для чисел Рейнольдса 6 500, 13 500 и 22 000. Число Рейнольдса рассчитывалось следующим образом $Re = U_{av} * d_s / \nu$, где U_{av} – среднерасходная скорость, ν – динамическая вязкость, $d_s = 3,5$ мм – гидравлический диаметр криволинейного треугольника. Измерения полей скорости проводилось в криволинейной треугольной области (рис. 2, б) в каждой из двадцати шести плоскостей (обозначены зеленым цветом), расположенных перпендикулярно оси центрального элемента с шагом 6 мм (рис. 2, а). В экспериментах с низкоскоростной микро-PIV системой для каждой измерительной плоскости были получены 1 000 мгновенных полей скорости, по которым рассчитывались поля средней скорости.

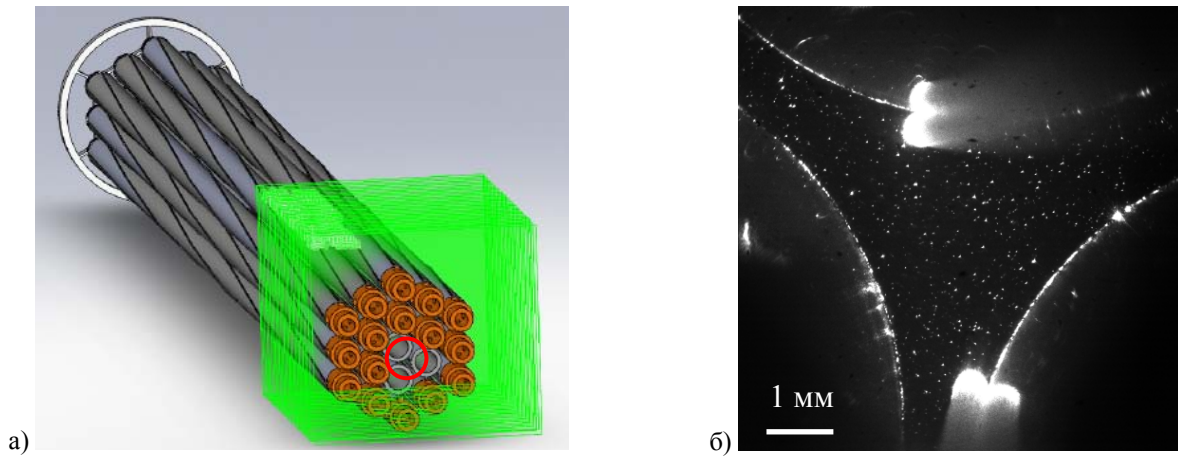


Рис. 2. а) Схема расположения измерительной области и измерительные плоскости; б) Фотография измерительной области в месте указанном кружком

В экспериментах с высокоскоростной микро-PIV системой для одного сечения были получены 18 000 мгновенных полей скорости с частотой 10 кГц для числа $Re = 22\,000$ и 5 кГц для числа $Re = 13\,500$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На основе полученных в 26 поперечных сечениях мгновенных полей скорости были рассчитаны распределения осредненной скорости для трех чисел Рейнольдса 6 500, 13 500 и 22 000. Осреднение проводилось по ансамблю мгновенных полей скорости, который состоял из 1000 не зависимых реализаций. На рис. 3 представлены результаты измерений в поперечном сечении, расположенном на расстоянии 105 мм от выходной решетки. На рис. 3 показаны векторные поля осредненной нормированной скорости, положение навивки в измеряемом сечении указано красным кружком. При анализе векторных полей скорости можно сделать вывод о подобию структуры течения для всех трех чисел Рейнольдса, которое характерно и для других поперечных сечений. Основные особенности в структуре течения формируются за навивкой в виде зон возвратного течения.

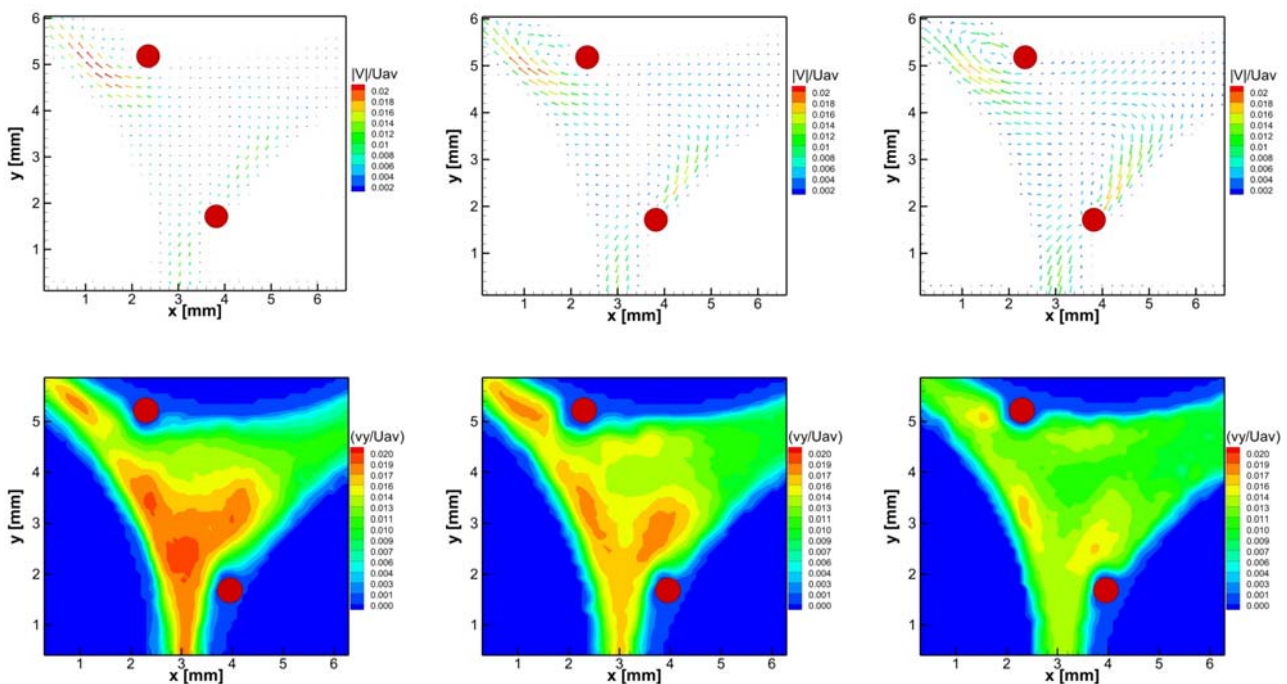


Рис. 3. Среднее поле скорости в сечении, расположенном на расстоянии 105 мм от выходной решетки, для трех чисел Re : а) 6 500, б) 13 500 и в) 22 000. Распределение нормированных пульсаций скорости для трех чисел Re : г) 6 500, д) 13 500 и е) 22 000

На рис. 3 представлены нормированные на среднерасходную скорость распределения пульсаций скорости. Из распределений нормированных пульсаций скорости видно, что по мере увеличения числа Re , отношение амплитуды пульсаций поперечной скорости к среднерасходной скорости уменьшается. При этом области максимумов в распределении пульсаций поперечной скорости уменьшаются и локализуются в трех местах. Уменьшение амплитуды пульсаций связано с все большим преобладанием продольной компоненты скорости. Два максимума располагаются непосредственно около навивки и обусловлены отрывными и возвратными течениями, формирующимися при ее обтекании. Для объяснения расположения третьего максимума, который образуется на твэле без навивки данных, полученных в поперечных сечениях, недостаточно и требуется дальнейшее исследование. На рис. 4 представлены распределения по глубине межтвэльного канала для двух нормированных поперечных компонент осредненной скорости. Для наилучшего представления данных масштаб по оси Z был уменьшен в 10 раз и распределения были построены в масштабе $X:Y:Z$ как $1:1:0.1$. Для сравнения на рис. 4, в) распределения построены в масштабе $X:Y:Z$ как $1:1:1$.

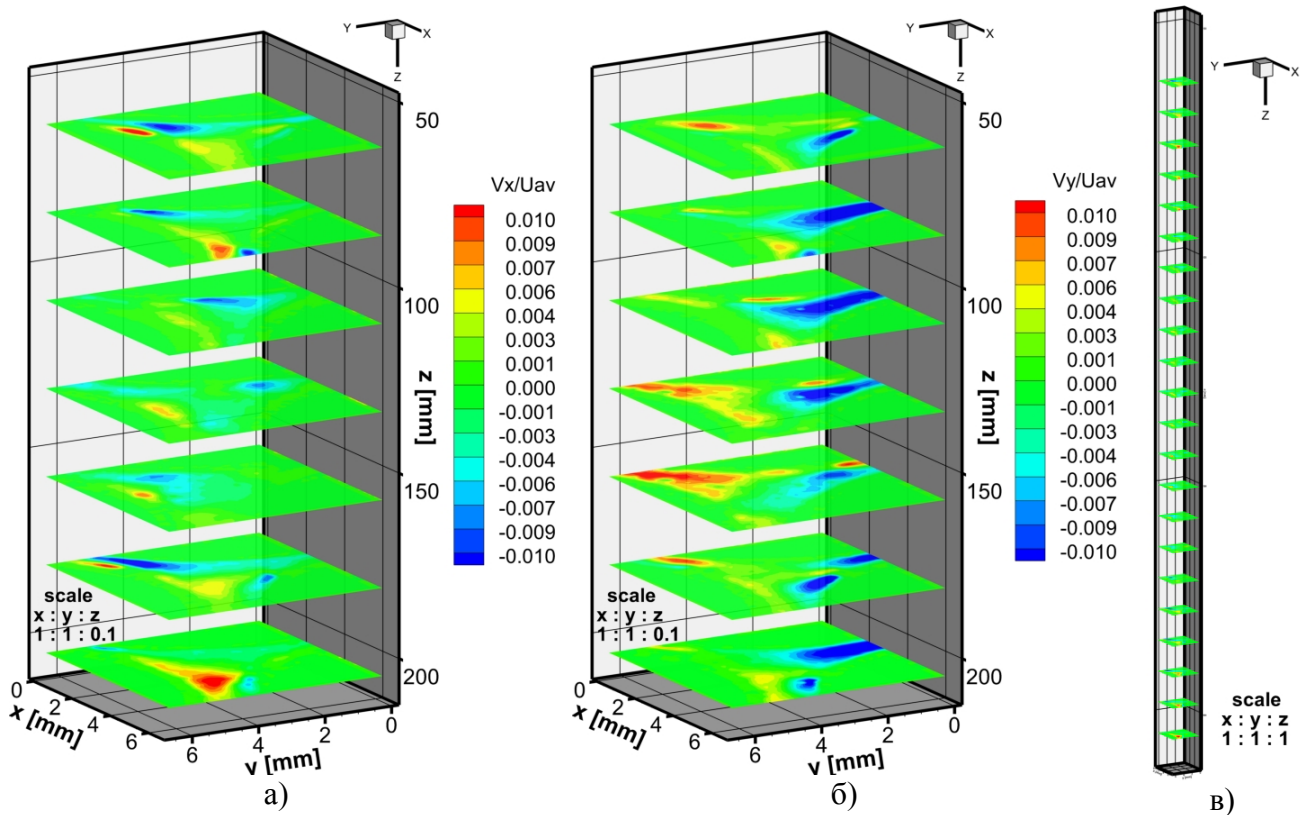


Рис. 4. Распределение нормированных поперечных компонент осредненной скорости в различных сечениях межтвэльного канала: а) и б) – в масштабе $X:Y:Z$ как $1:1:0.1$; в) – в масштабе $X:Y:Z$ как $1:1:1$

На основании распределения осредненной скорости были рассчитаны значения Q – критерия. Q – критерий широко распространен в гидродинамике как индикатор вихревых структур. Значения Q – критерия показали наличие вторичных течений в потоке. Вторичные течения (изоповерхности красного цвета) образуются за дистанционирующей навивкой и характерны для всех ТВЭЛов в сборке (рис. 5). В результате анализа мгновенных полей скорости были выявлены крупномасштабные вихревые структуры. Для исследования процессов формирования вихревых структур в потоке мы провели эксперименты с помощью метода μPIV с высоким временным разрешением. Данные высокоскоростных измерений позволили выявить вихревые структуры и наблюдать их динамику.

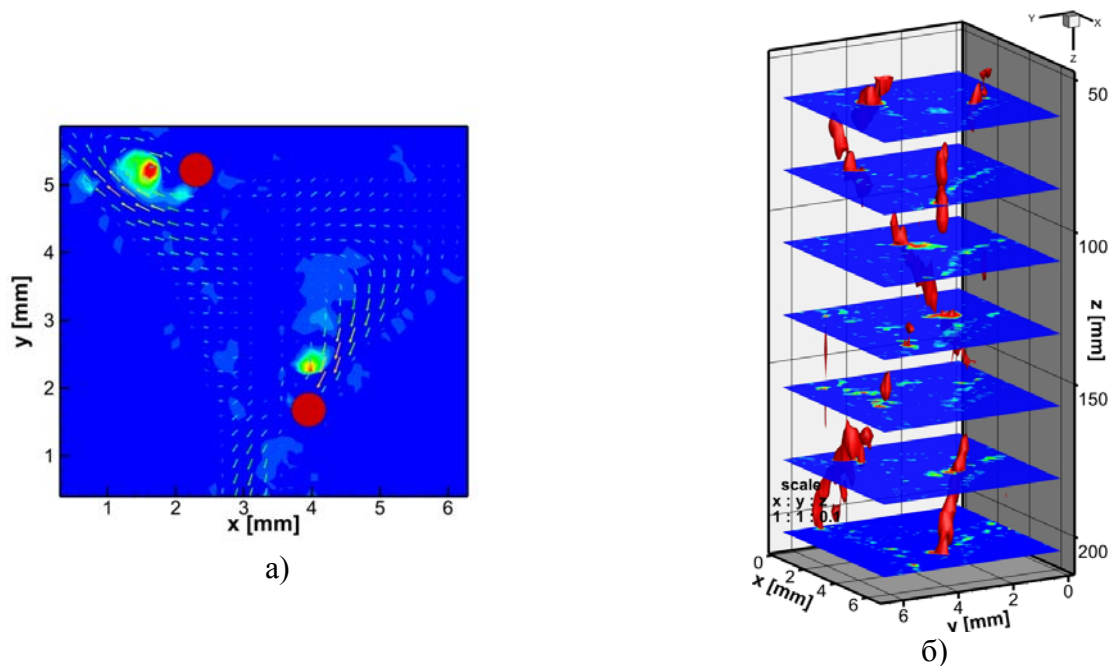


Рис. 5. Распределение Q – критерия: а) в сечении 105 мм от входной решетки; б) Распределение Q - критерия в межзвёльном пространстве в масштабе X:Y:Z как 1:1:0,1.

Результаты скоростного эксперимента показали, что направление течения в канале между твэлами имеет осциллирующий (реверсивный) характер рис. 6, а и рис. 6, в. В потоке крупномасштабные вихревые структуры могут образовываться в двух случаях: в результате взаимодействия потоков, вытекающих из межзвёльных каналов, и при обтекании навивки.

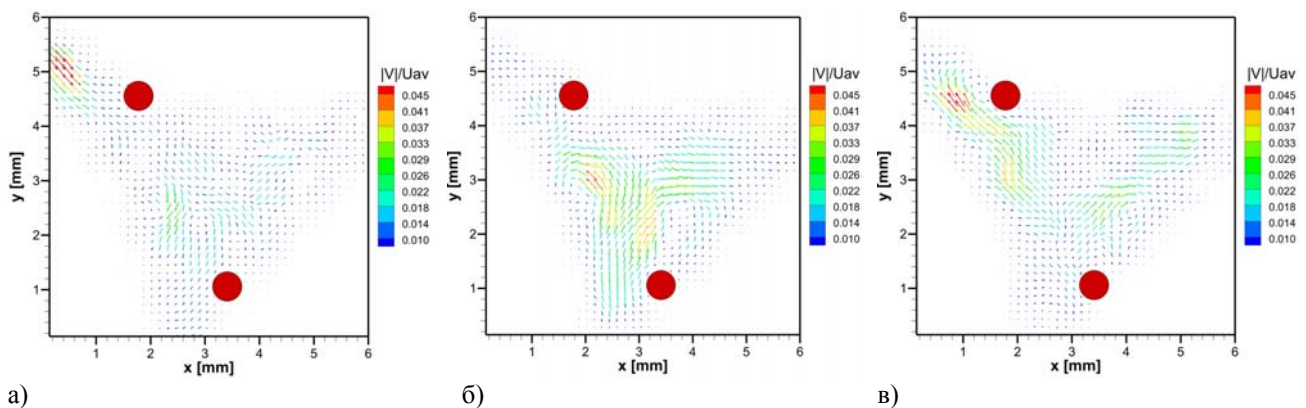


Рис. 6. Векторное поле скорости в различные моменты времени, полученные с помощью высокоскоростной системы micro-PIV

В результате анализа последовательных полей скорости, полученных в поперечных сечениях с частотой съемки 10 кГц, были обнаружены продольные вихревые структуры. Выводы о пространственной структуре продольных вихрей делались на основании длительности присутствия вихревой структуры в локальной области. В результате оценок, учитывающих среднерасходную скорость, диаметр вихря и время его существования, были получены характерные размеры вихревых структур. Оказалось, что в турбулентном режиме течения ($Re = 22\,000$) формируются продольные вихревые с временами существования порядка 3 мс и диаметром около 1 мм и длиной до 12 мм. Наличие в потоке крупномасштабных пульсаций поперечных компонент скорости можно видеть на временной реализации скорости в точке потока (рис. 7, а), указанной на рисунке (рис. 7, б). На основании временной реализации были рассчитаны одномерные спектры пульсаций поперечной компоненты скорости (рис. 7, в). В спектре можно определить несколько характерных пиков, которые свидетельствуют о выделенных частотах в потоке.

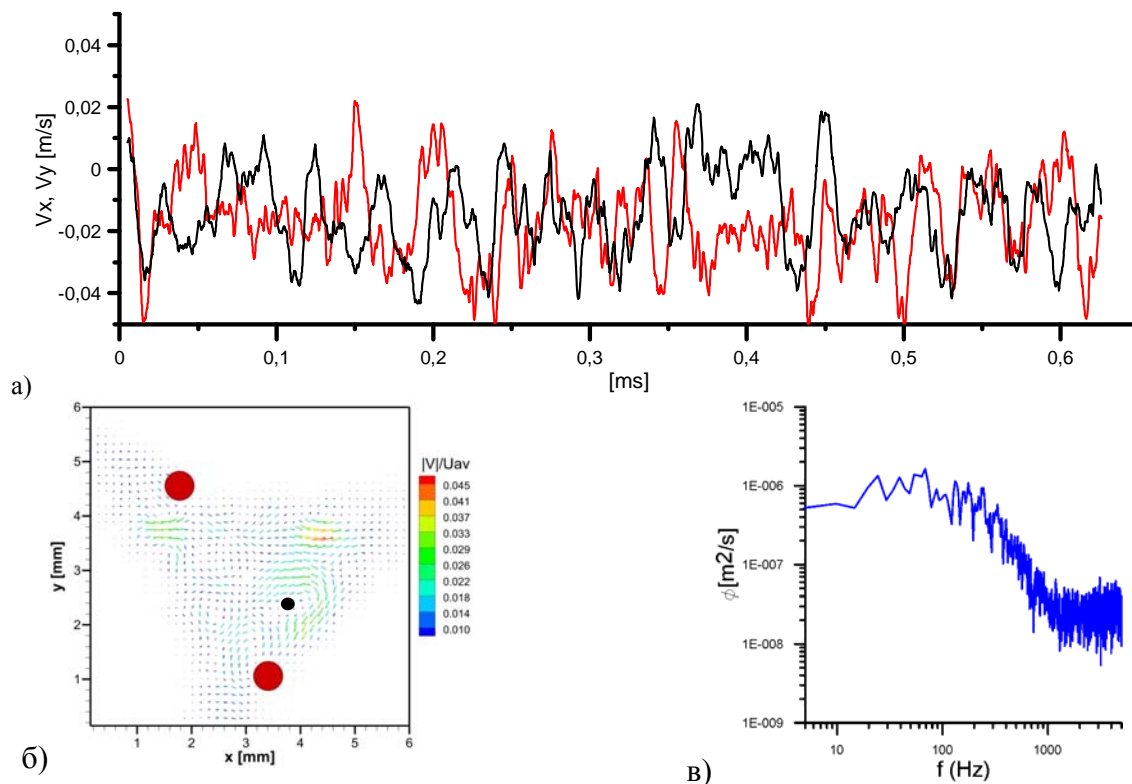


Рис. 7. а) Временная реализация поперечных компонент скорости, полученная в точке, указанной на векторном поле мгновенной скорости б), в) временной спектр, рассчитанный для временной реализации а)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе применен метод μ PIV высокого пространственного и временного разрешения, который позволил получить новые экспериментальные данные о мгновенной вихревой структуре течения, формирующейся при обтекании изотермическим турбулентным потоком плотной гексагональной упаковки, состоящей из 19 цилиндрических элементов с проволочной навивкой. Эксперименты проводились для трех чисел Рейнольдса ($Re = 6\,500$; $13\,500$ и $22\,000$). В результате проведенных экспериментов были измерены мгновенные поля скорости вблизи центрального элемента. На основании полученных мгновенных полей скорости рассчитаны осредненные поля поперечной скорости и пульсаций скорости. Показано, что в осредненной структуре потока образуются вторичные течения, которые локализованы за дистанционирующей навивкой и присутствуют вдоль всего твэла. Анализ последовательных распределений мгновенной скорости показал, что характер течения является сильно нестационарным с образованием крупномасштабных продольных вихревых структур. Определены характерные времена и масштабы крупномасштабных вихревых структур. На основании рассчитанных временных спектров показано существование выделенных частот в потоке. Выявлена область существования вихревых структур, не связанная с отрывом при обтекании дистанционирующей навивки, которая требует дальнейшего исследования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана:

Грантом Президента РФ для поддержки ведущих научных школ НШ-5984.2014.8

Грантом Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ № 15-08-99617

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Re – число Рейнольдса;

U_{av} – среднерасходная скорость, м/с;

$d_э$ – эквивалентный диаметр, мм;

ν – динамическая вязкость, м²/с;

$|V|$ – модуль скорости рассчитанный по поперечным компонентам скорости, м/с;

V_x – осредненная поперечная x – компонента скорости, м/с;

V_y – осредненная поперечная y – компонента скорости, м/с;

v_x – пульсации поперечной x – компоненты скорости, м/с;

v_y – пульсации поперечной y – компоненты скорости, м/с.

Индексы:

av – среднерасходная скорость;

э – эквивалентный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чесна Б.** Влияние шага закрутки проволоки на местный теплообмен в продольно обтекаемом пучке с однонаправленной проволочной навивкой.
2. **Марков П.В., Солонин В.И.** Влияние способа дистанционирования на гидродинамику семистержневого пучка тепловыделяющих элементов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, Сер.: Машиностроение. 2013. № 1. С. 38-48
3. **Kim, KyungMin, Bae, Ji-Yeul, Shin, ChangHwan, In, Wang-Kee, Cho, HyungHee.** Turbulent vortex trains in narrow square arrayed rod bundles of a dual-cooled nuclear reactor // Science China Technological Sciences, 2013, V. 56, I.9, pp. 2143-2149
4. **Yiqi Yu, Yanhua Yang.** URANS simulation of the turbulent flow in a tight lattice bundle // Front Energy 2011, 5(4), pp. 404-411.
5. **Krauss T., Meyer T.** Experimental investigation of turbulent transport of momentum and energy in a heated rod bundle // Nuclear Engineering and Design. 1998, 180 (3) , pp. 185-206.

M.V. Shestakov¹, M.P. Tokarev¹, D.M. Markovich^{1,2}

¹ Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia,
630090, Novosibirsk, Lavrentiev ave., 1, E-mail: mvsh@itp.nsc.ru

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
630090, Novosibirsk, Pirogova st., 2, E-mail: dmark@itp.nsc.ru

APPLICATION OF PIV TECHNIQUE FOR THE STUDY OF VORTEX FLOW STRUCTURE IN WIRE-WRAPPED ROD BUNDLES

In the study Time-resolved micro - PIV technique was used to obtain new experimental data of flow vortex structure in wire-wrapped rod bundles. Experimental investigations were made on hydrodynamic setup of IT SB of RAS. Instantaneous fields of velocity were measured in transverse sections near central rod. Experimental data analysis showed that flow pattern is strong unsteady and contains longitudinal large-scale vortex structure. It was shown that in flow near wire-wrapper secondary flow exists.

METHOD TIME-RESOLVED MICRO-PIV, FLOW STRUCTURE IN WIRE-WRAPPED ROD BUNDLES, VORTEX FLOW STRUCTURE