УДК 532.57, 533.6.08, 519.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ В ПУЧКЕ ТВЭЛОВ С ПРОВОЛОЧНОЙ НАВИВКОЙ: TIME-RESOLVED MICRO PIV ИЗМЕРЕНИЯ

Шестаков М.В.[1], Токарев М.П.[1], Небучинов А.С.[1], Маркович Д.М.[1,2]

[1]Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН
[2]Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

Работа поддержана грантом РФФИ № 15-08-99617-а

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.

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

© Шестаков М.В., Токарев М.П., Небучинов А.С., Маркович Д.М.

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 обтекаемых сборок 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 ИТ СО РАН. На рисунке 1 представлена фотография фрагмента экспериментального гидродинамического стенда с прозрачной моделью пучка из 19 элементов. Измерения полей скорости проводились с помощью micro-PIV метода. Все компоненты измерительной аппаратуры, лазер и камера, монтировались на координатные балки, которые были жестко закреплены между собой. При помощи координатного механизма измерительная система могла перемещаться с точностью 25 мкм. Блок лазерного излучения устанавливался на направляющую рельсу и располагался слева от рабочего участка. Для освещения частиц в потоке использовался сдвоенный лазер EverGreen (70 мДж, 532 нм, 10 нс) а для регистрации образов частиц использовались камера ПОЛИС (4 Mpix). В экспериментах по исследованию динамики вихревых структур использовался высокоскоростной сдвоенный лазер Photonix DM-532-DH-150 (15 мДж, 532 нм, 100 нс, с частотой 15 кГц) и высокоскоростная камера Photron FASTCAM SA5 (1 Mpix, частота съемки 7 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. Камера 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.

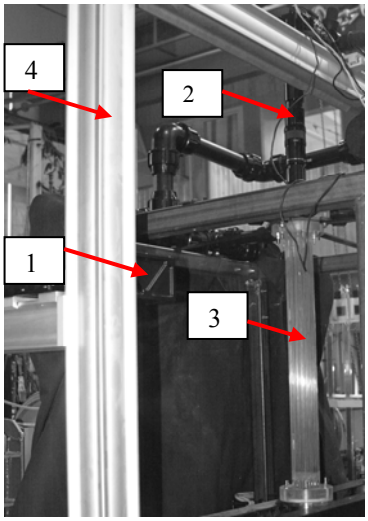

Рис. 1 Фотография рабочего участка. 1 – лазер, 2 – камера с объективом, 3 – рабочий участок 4 – координатные балки.

Для увеличения пространственного разрешения исследовалась только одна из шести криволинейных треугольных областей, сформированных поверхностями центрального и двух соседних элементов. Расположение координатных осей было следующим; координата x и y располагались в поперечном сече-

нии сборки, координата z была направлена против потока 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=Uav*dэ/v, где Uav – среднерасходная скорость, v - динамическая вязкость, dэ= 3.5 мм – гидравлический диаметр криволинейного треугольника.

Измерения полей скорости проводилось в криволинейной треугольной области (рис. 2) в каждой из двадцати шести плоскостей, расположенных перпендикулярно оси центрального элемента с шагом 6 мм. В экспериментах с низкоскоростной micro-PIV системой для каждой измерительной плоскости были получены 1 000 мгновенных полей скорости, по которым рассчитывались поля средней скорости. В экспериментах с высокоскоростной micro-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.

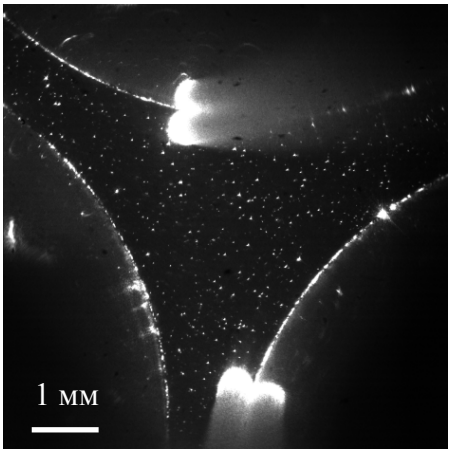

Рис. 2 Фотография измерительной области.

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. При анализе векторных полей средней скорости можно сделать вывод о подобии структуры течения для всех трех чисел Рейнольдса, которое характерно и для других поперечных сечений.

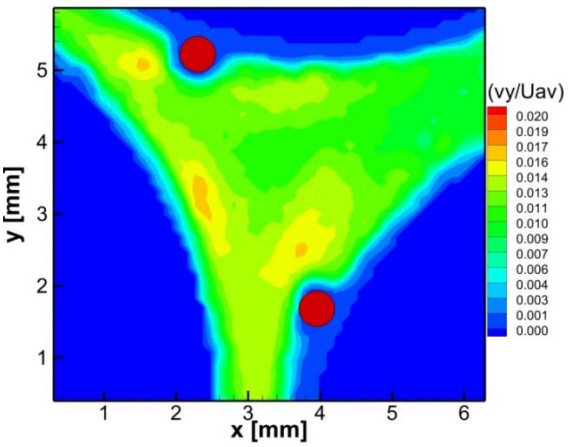

Рис. 3 Распределение нормированных пульсаций скорости. Расстояние от выходной решетки 105 мм, Re=22 000.

Основные особенности в структуре течения формируются за навивкой в виде зон возвратного течения. На рисунке 3 представлены нормированные на среднерасходную скорость распределения пульсаций скорости.

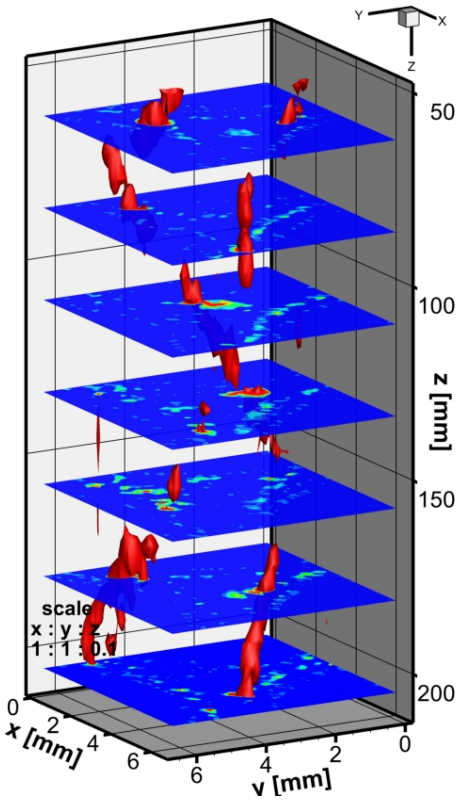

Рис. 4 Распределение Q - критерия в межТВЭЛьном пространстве в масштабе X:Y:Z как 1:1:0.1.

При увеличении числа Re, отношение амплитуды пульсаций поперечной скорости к среднерасходной скорости уменьшается. При этом области выделяют-

ся три максимума в распределении пульсаций скорости (рис. 3). 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, мы провели анализ мгновенных полей скорости. Оказалось что это максимум связан с вихревой структурой, которая периодически появлялась в данном месте.

При увеличении числа Re, отношение амплитуды пульсаций поперечной скорости к среднерасходной скорости уменьшается. При этом области выделяются три максимума в распределении пульсаций скорости (рис. 3). 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, мы провели анализ мгновенных полей скорости. Оказалось что это максимум связан с вихревой структурой, которая периодически появлялась в данном месте.

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 обозначены как изоповерхности красного цвета на рисунке 4, образуются за дистанционирующей навивкой и характерны для всех ТВЭЛов в сборке.

Для исследования динамики вихревых структур в потоке мы провели эксперименты с помощью метода micro-PIV с высоким временным разрешением. Данные высокоскоростных измерений позволили выявить вихревые структуры и наблюдать их динамику. Результаты скоростного эксперимента показали, что направление течения в канале между ТВЭЛами имеет осциллирующий (реверсивный) характер рис. 5 а) - б).

В потоке крупномасштабные вихревые структуры могут образовываться в двух случаях: в результате взаимодействия потоков, вытекающих из межТВЭЛьных каналов, и при обтекании навивки. В результате анализа последовательных полей скорости, полученных в поперечных сечениях с частотой съемки 10 кГц, были обнаружены продольные вихревые структуры рис. 5 в). 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.

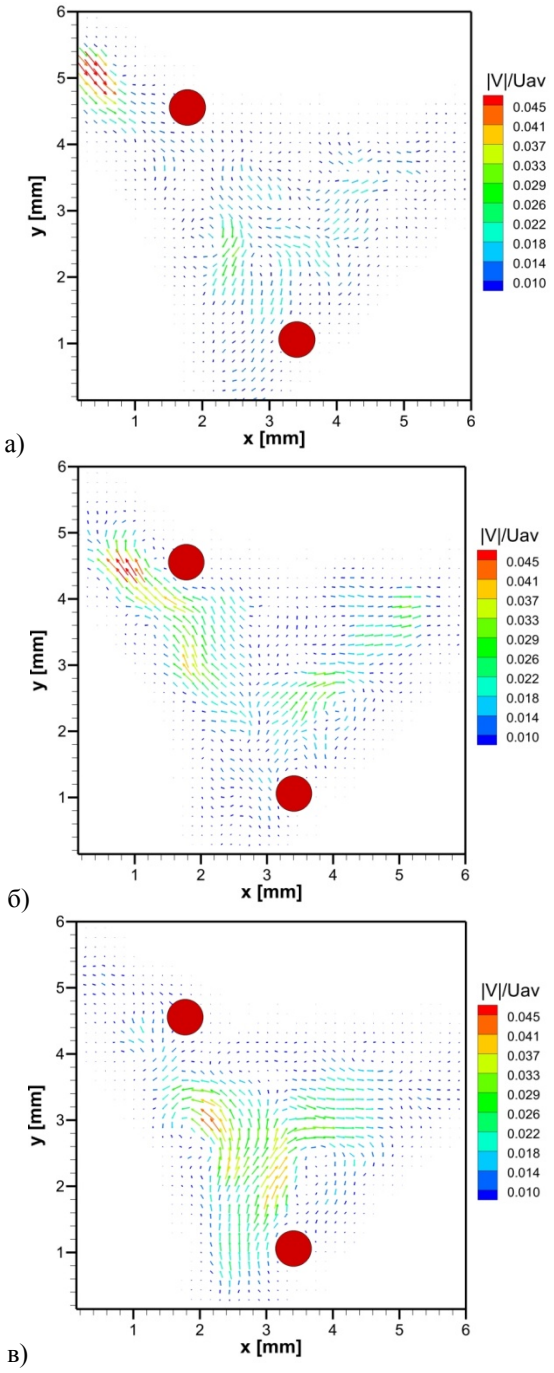

Рис. 5 Векторное поле скорости в различные моменты времени полученные с помощью высокоскоростной системы micro-PIV. Re=22 000.

Наличие в потоке крупномасштабных пульсаций поперечных компонент скорости можно зафиксировать при анализе временной реализации скорости в точке потока. На основании временной реализации были рассчитаны одномерные спектры пульсаций

поперечной компоненты скорости, на которых можно определить несколько характерных максимумов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе применен метод micro - 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. Получена кспериментальная база данных высокого пространственного и временного разрешения, оторая может использоваться для верификации CFD кодов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Чесна. Влияние шага закрутки проволоки на местный теплообмен в продольно обтекаемом пучке с однонаправленной проволочной навивкой. Доклады V Минского междануродного формума по тепломассообмену (MIF-V). Минск. 2004. с. 1-75.

   B. Chesna. Vliyanie shaga zakrutki provoloki na mestnyy teploobmen v prodolno obtekaemom puchke s odnonapravlennoy provolochnoy navivkoy. Doklady V Minskogo mezhdanurodnogo formuma po teplomassoobmenu (MIF-V). Minsk. 2004. pp. 1-75.

2. П.В. Марков, В.И. Солонин. 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

   P.V. Markov, V.I. Solonin. Vliyanie sposoba distantsionirovaniya na gidrodinamiku semisterzhnevogo puchka teplovydelyayushchikh elementov // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana, Ser.: Mashinostroenie. 2013. № 1. pp.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.