

УДК 621.039

Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов

Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, 24, 603950, г. Нижний Новгород, Россия

Поступила 15.09.2015

Принята к печати 6.11.2015

Разработка интенсификаторов тепло- и массообмена является важной инженерной задачей при конструировании новых и модернизации существующих тепловыделяющих сборок (ТВС). Такие устройства создают направленный поперечный основному потоку перенос массы теплоносителя. В то же время конструкция интенсификаторов влияет как на перемешивание теплоносителя, так и на гидравлическое сопротивление. Целью работы являлась разработка методики измерения локальных векторов скорости теплоносителя в моделях ТВС с различными перемешивающими решетками. Для решения поставленных задач был изготовлен пневмометрический пятиканальный зонд, проведена его тарировка в однородном потоке воздуха с заданной скоростью при различных углах установки зонда. По результатам тарировки получены численные значения безразмерных комплексов давления в каналах зонда и определена их зависимость от углов набегания воздушного потока. Представленная в статье методика измерения вектора скорости потока воздуха многоканальным пневмометрическим зондом была применена в экспериментальных исследованиях по изучению локальной гидродинамики в тепловыделяющих сборках с перемешивающими решетками. Анализ полученных векторных полей поперечной скорости теплоносителя позволил изучить формирование вторичных вихревых течений за перемешивающими решетками моделей ТВС, а также определить основные закономерности движения теплоносителя. Количественные данные о распределении всех трех проекций вектора скорости потока теплоносителя, полученные с помощью пятиканального зонда, позволили определить величины поперечных скоростей потока в межтвэльных зазорах, а также определить расстояние, на котором происходит затухание процессов перемешивания.

Ключевые слова: пневмометрический зонд, локальная гидродинамика, тепловыделяющая сборка.

Адрес для переписки:

Добров А.А.
Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, 24, 603950, г. Нижний Новгород, Россия
e-mail: a.a.dobrov@yandex.ru

Address for correspondence:

Dobrov A.A.
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Minina st., 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: a.a.dobrov@yandex.ru

Для цитирования:

Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е.
Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов
Приборы и методы измерений,
2015. – Т. 6, № 2. – С. 188–195

For citation:

Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Legchanov M.A., Khrobostov A.E.
Application of multihole pressure probe for research of coolant velocity profile in nuclear reactor fuel assemblies
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 188–195

Введение

Одним из самых энергонапряженных элементов реакторной установки является активная зона, которая может работать лишь на тех уровнях мощности, для которых обеспечивается достаточное охлаждение самых «горячих» тепловыделяющих сборок (ТВС). Повышение интенсивности перемешивания в ТВС ядерных реакторов с водой под давлением приводит к выравниванию локальных свойств теплоносителя, тем самым уменьшая влияние факторов местного перегрева [1]. Это говорит о том, что разработка интенсификаторов тепло- и массообмена является важной инженерной задачей при конструировании новых и модернизации существующих ТВС. В качестве таких интенсификаторов, например, могут применяться дистанционирующие решетки, выполненные из сотовых элементов сложной формы [2–3], или дополнительно установленные перемешивающие решетки, снабженные турбулизирующими дефлекторами [4–6]. Такие устройства создают направленный конвективный поперечный перенос массы теплоносителя. В то же время форма и угол отгиба дефлекторов влияют как на интенсивность перемешивания теплоносителя, так и на гидравлическое сопротивление решетки. Поэтому представление о степени влияния геометрии дефлекторов на гидродинамические характеристики теплоносителя весьма важно для поиска оптимальной конструкции перемешивающей решетки, а также для проведения достоверного теплогидравлического расчета активной зоны, учитывающего эффекты от таких решеток. Целью работы являлась разработка методики измерения локальных векторов скорости теплоносителя в моделях ТВС с различными перемешивающими решетками.

Описание экспериментального стенда и средств измерения скорости потока теплоносителя в моделях тепловыделяющих сборок

Для решения задач по исследованию локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в моделях ТВС с перемешивающими решетками использовался экспериментальный стенд [7], представляющий собой разомкнутый аэродинамический контур (рисунок 1).

Моделирование течения водяного теплоносителя воздухом, а также использование увеличенных моделей позволяют достичь высоких значений чисел Рейнольдса при относительно невысоких

скоростях и не требуют учета сжимаемости воздушного потока. При этом с учетом теории подобия результаты исследования гидродинамических характеристик, представленные в безразмерной форме, могут быть перенесены на натурные условия течения теплоносителя. Кроме того, выбор воздуха в качестве рабочей среды позволил применить достаточно простые и информативные пневмометрические методы измерения скорости. Одним из таких методов является использование многоканального пневмометрического зонда. После предварительной тарировки по информации об измеренных значениях давления в приемных отверстиях зонда можно восстановить три компоненты вектора скорости, а также значения полного и статического давления в исследуемой точке.

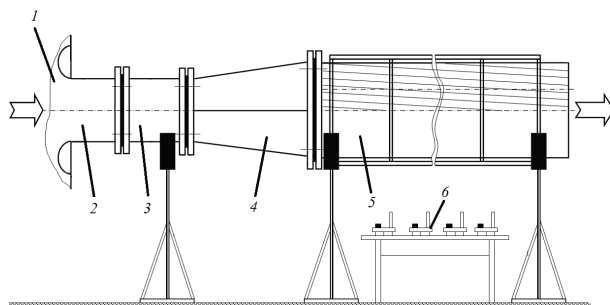


Рисунок 1 – Схема экспериментального аэродинамического стенда: 1 – аэродинамическая труба; 2 – расходомерный коллектор; 3 – успокоительный участок; 4 – переходник; 5 – экспериментальная модель; 6 – преобразователи давления

Figure 1 – The scheme of the experimental aerodynamic stand: 1 – wind tunnel; 2 – flowmeter; 3 – stabilizing section; 4 – adapter; 5 – experimental model; 6 – pressure transducers

Для измерения вектора скорости в моделях ТВС активных зон ядерных реакторов была разработана конструкция зонда. Чувствительная часть зонда представляет собой пять стальных капилляров $\varnothing 0,8 \times 0,1$ мм, расположенных в двух перпендикулярных друг другу диаметральных плоскостях. Остальная часть капилляров проложена внутри державки зонда, которая представляет собой стальную трубку. Центральный капилляр срезан под углом 90° к своей оси, а четыре боковых капилляра срезаны под углом 45° .

Методика тарировки пневмометрического зонда

При проведении исследований использовалась методика измерения вектора скорости воздушного

потока неподвижным многоканальным пневмометрическим зондом с предварительной тарировкой его в аэродинамической трубе. При тарировке зонда необходимо записать значения давлений в его приемных отверстиях, а также значения статического и полного давления в точке измерения для каждой комбинации углов установки зонда при заранее установленной скорости. Координатное устройство, входящее в состав тарировочной, позволяет поворачивать зонд в горизонтальной плоскости (угол δ) и вращать его вокруг собственной оси (угол φ).

Для проведения последующих измерений скорости неподвижным зондом необходимо произвести перенос системы координат, применяемой при тарировке $\{W, \varphi, \delta\}$, в систему координат $\{W, \alpha, \beta\}$, связанную с зондом (рисунок 2).

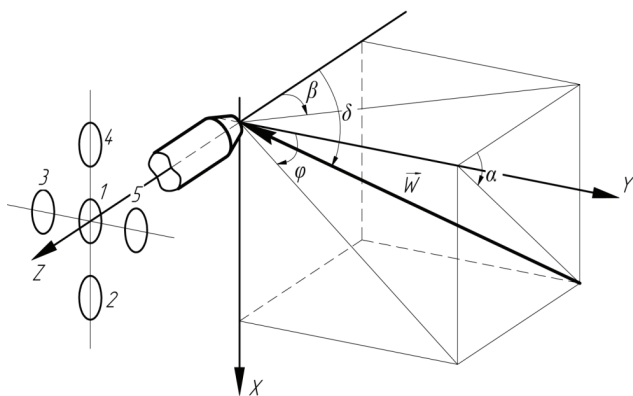


Рисунок 2 – Ориентация зонда и схема координатных осей: W – абсолютное значение вектора скорости; α – угол атаки (лежит в плоскости, проходящей через ось зонда и отверстия 4-1-2); β – угол заноса (лежит в плоскости, проходящей через ось зонда и отверстия 3-1-5)

Figure 2 – Orientation of the probe and the scheme of coordinate axes: W – absolute velocity; α – pitch angle; β – yaw angle

Такое преобразование осуществляется по следующим формулам:

$$\alpha = \arctg(\tg\delta \cdot \sin\varphi), \quad (1)$$

$$\beta = \arctg(\tg\delta \cdot \cos\varphi). \quad (2)$$

По результатам тарировки определены показания давления в приемных отверстиях в зависимости от углов установки зонда. Для дальнейшего использования этих данных были составлены безразмерные комплексы давления и определена их зависимость от углов α и β .

C_α – тарировочный коэффициент угла атаки α :

$$C_\alpha = \frac{P_2 - P_4}{P_1 - P_{ave}}, \quad (3)$$

где P_{ave} – псевдостатическое давление, которое определяется как среднее арифметическое от показаний давления в боковых приемных отверстиях ($P_2 - P_5$):

$$P_{ave} = (P_2 + P_3 + P_4 + P_5) / 4, \quad (4)$$

C_β – тарировочный коэффициент угла заноса β :

$$C_\beta = \frac{P_5 - P_3}{P_1 - P_{ave}}, \quad (5)$$

C_{st} – тарировочный коэффициент статического давления:

$$C_{st} = \frac{P_1 - P_{st}}{P_1 - P_{ave}}, \quad (6)$$

где P_{st} – статическое давление, Па.

C_{tot} – тарировочный коэффициент полного давления:

$$C_{tot} = \frac{P_1 - P_{tot}}{P_1 - P_{ave}}. \quad (7)$$

где P_{tot} – полное давление, Па.

Зависимости коэффициентов C_α , C_β от углов α и β приведены на рисунках 3, 4 в виде картограмм. Данные коэффициенты аппроксимированы гладкими полиномиальными зависимостями средствами математического пакета *Matlab* (функция *sftool*).

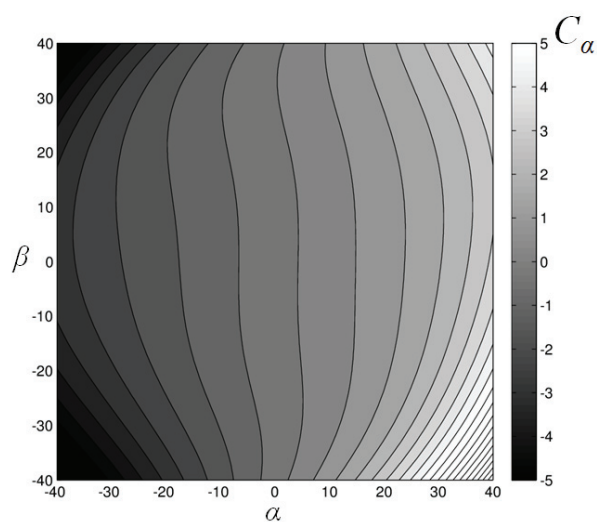


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента C_α от углов α и β

Figure 3 – C_α coefficient dependence on the angles α and β

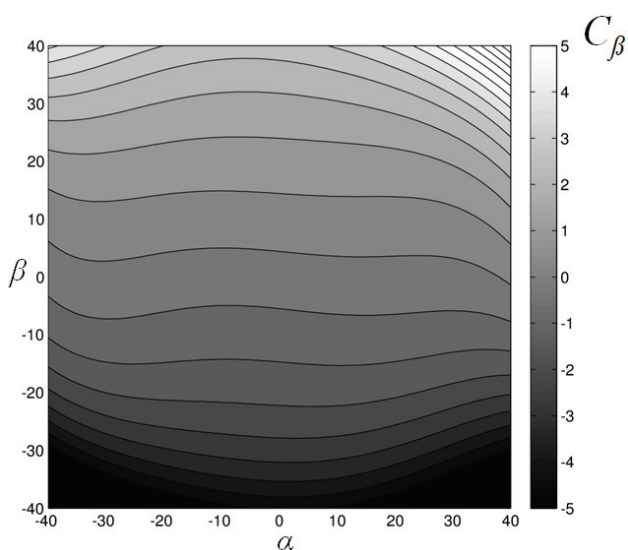


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента C_β от углов α и β

Figure 4 – C_β coefficient dependence on the angles α and β

Методика определения величины и направления вектора скорости потока теплоносителя

Для измерения величины и направления вектора скорости пневмометрический зонд с помощью координатного устройства последовательно размещается в заданных точках экспериментальной модели ТВС. При этом производится замер значений давления в каждом канале зонда с помощью пьезоэлектрических преобразователей давления. Затем производится обработка первичных данных по следующей методике:

1) по измеренным значениям давлений рассчитываются комплексы C_α и C_β ;

2) определяются углы набегания потока α и β с использованием обратных зависимостей $\alpha = f(C_\alpha, C_\beta)$ и $\beta = f(C_\alpha, C_\beta)$;

3) определяются коэффициенты статического и полного давлений C_{st} и C_{tot} в зависимости от углов набегания;

4) рассчитываются значения статического и полного давлений:

$$P_{st} = P_1 - C_{st} \cdot (P_1 - P_{ave}), \quad (8)$$

$$P_{tot} = P_1 - C_{tot} \cdot (P_1 - P_{ave}); \quad (9)$$

5) рассчитывается величина вектора скорости:

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{tot} - P_{st})}{\rho}}; \quad (10)$$

6) рассчитываются проекции вектора скорости на оси X, Y, Z системы координат модели:

$$W_z = \frac{W}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta}}, \quad (11)$$

$$W_x = W_z \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (12)$$

$$W_y = W_z \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (13)$$

Результаты использования пневмометрического зонда для изучения гидродинамики потока в моделях тепловыделяющих сборок

Вышеописанная методика определения величины и направления вектора скорости потока была применена в экспериментальных исследованиях по изучению локальной гидродинамики в тепловыделяющих сборках ТВСА для реакторов ВБЭР-300 и ТВС-КВАДРАТ для реакторов PWR [8–12].

В тепловыделяющей сборке ТВСА реактора ВБЭР-300 применяются перемешивающие решетки (ПР), которые позволяют турбулизовать поток в пределах отдельных ячеек и улучшить перемешивание теплоносителя между ячейками сборки.

В конструкции ТВС-КВАДРАТ для улучшения теплогидравлических характеристик используются перемешивающие дистанционирующие решетки (ПДР) с интенсификаторами теплообмена – дефлекторами потока типа *split vane*.

На рисунках 5, 6 представлены фотографии экспериментальных моделей фрагментов ТВСА и ТВС-КВАДРАТ.

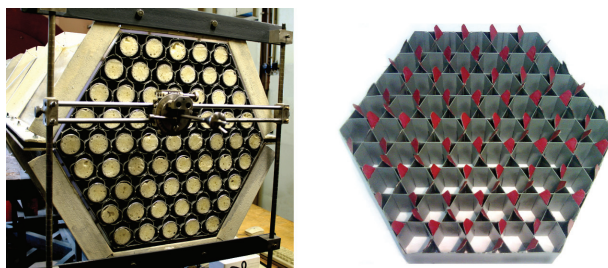


Рисунок 5 – Общий вид масштабной 61-стержневой модели фрагмента ТВСА и перемешивающей решетки типа «порядная прогонка»

Figure 5 – A general view of a large-scale 61-rod model of TVSA fuel assembly and mixing grid

Измерения локальных гидродинамических характеристик проводились в характерных областях экспериментальных моделей в нескольких сечениях по длине.

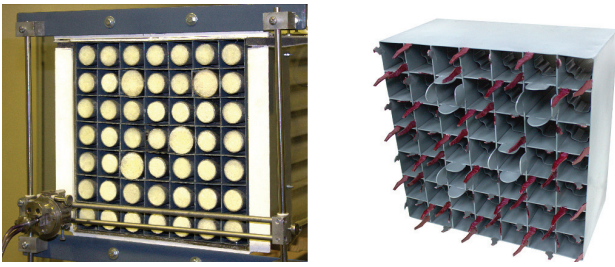


Рисунок 6 – Общий вид масштабной 49-стержневой модели фрагмента ТВС-КВАДРАТ и перемешивающей решетки

Figure 6 – A general view of a large-scale 49-rod model of TVS-KVADRAT fuel assembly and mixing grid

По результатам измерений с помощью пятиканального зонда получены данные о распределении компонент вектора скорости в различных сечениях за дистанционирующими решетками, а с помощью математического пакета *Matlab* построены векторные поля поперечной скорости (рисунок 7, 8).

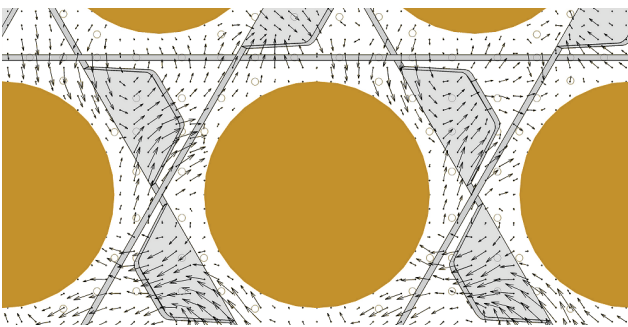


Рисунок 7 – Векторное поле поперечной скорости на расстоянии 1 гидравлического диаметра за перемешивающей решеткой ТВСА

Figure 7 – The vector field of lateral velocity behind the mixing grid of TVSA model

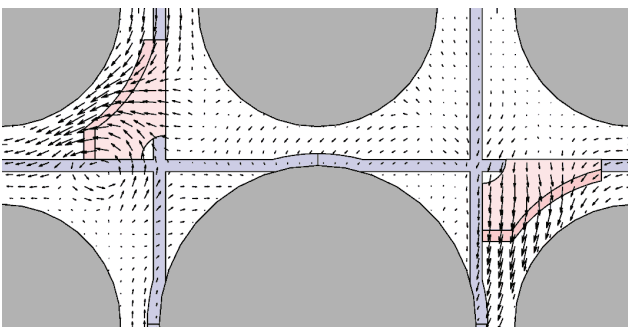


Рисунок 8 – Векторное поле поперечной скорости в области направляющего канала на расстоянии 1 гидравлического диаметра за перемешивающей решеткой ТВС-КВАДРАТ

Figure 8 – The vector field of lateral velocity behind the mixing grid of TVS-KVADRAT model

Полученные векторные поля поперечной скорости теплоносителя позволили наглядно изучить формирование вторичных вихревых течений за дефлекторами перемешивающих решеток ТВС, а также определить основные закономерности движения теплоносителя.

Максимальное значение поперечной скорости теплоносителя за ПР модели ТВСА наблюдается сразу за дефлекторами и достигает 35 % от аксиальной составляющей. На расстоянии 5 гидравлических диаметров от ПР это значение снижается до 20 %. Полное затухание поперечных скоростей прекращается на расстоянии 23–25 гидравлических диаметров.

В результате анализа векторных полей поперечной скорости за ПДР ТВС-КВАДРАТ сделаны следующие выводы:

– в стандартной области сразу за дефлекторами перемешивание происходит в основном внутри ячейки, но уже на небольшом расстоянии (примерно 2 гидравлических диаметра за ПДР) поперечный поток движется по направлению дефлекторов в соседние ячейки. Затухание поперечных скоростей происходит на расстоянии 25–27 гидравлических диаметров за ПДР;

– в районе направляющего канала результатом воздействия дефлектора на поток теплоносителя является вихрь, дающий основное перемешивание лишь внутри ячейки.

Количественные данные о распределении всех трех проекций вектора скорости потока теплоносителя, полученные с помощью пятиканального зонда, позволили определить величины поперечных скоростей потока в межъячеечных зазорах, а также определить расстояние, на которых происходит затухание процессов перемешивания. Полученные сведения необходимы для вычисления коэффициентов межъячеечного перемешивания, позволяющих учесть эффекты, вызванные перемешивающими решетками в инженерных программах теплогидравлического расчета активных зон ядерных реакторов.

Заключение

Представленная в данной работе методика определения вектора скорости воздушного потока многоканальным пневмометрическим зондом адаптирована для исследований гидродинамических характеристик потока в моделях ТВС ядерных реакторов. Результатом исследований являются данные о величинах поперечных скоростей

за перемешивающими устройствами, установленными в ТВС, а также восстановленные по этим данным векторные поля, позволяющие изучить влияние дефлекторов на локальную гидродинамику потока теплоносителя в ТВС. Эти данные необходимы для обоснования теплотехнической надежности активных зон с ТВС, оснащенными перемешивающими решетками.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 03.12.2014 г. в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации № 218 от 9 апреля 2010 г.

Список использованных источников

1. *Дмитриев, С.М.* Основное оборудование АЭС / С.М. Дмитриев [и др.]. – Минск : Вышэйшая школа. – 2015.
2. *Марков, П.В.* Интенсификация перемешивания в ТВС водоохлаждаемых реакторов сотовыми перемешивающими решетками / П.В. Марков // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2012. – № 1. – С. 117–125.
3. *Крапивцев, В.Г.* Организация конвективного переноса в пучке твэлов за сотовыми решетками для водоводяных энергетических реакторов / В.Г. Крапивцев, В.И. Солонин, С.И. Цирин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 4. – С. 7–12.
4. *Самойлов, О.Б.* Перемешивающая решетка тепловыделяющей сборки ядерного реактора / О.Б. Самойлов [и др.] // Патент RU 2383954 от 15.09.2008.
5. *Самойлов, О.Б.* Экспериментальные исследования теплотехнических характеристик ТВСА с переме-

шивающими решетками / О.Б. Самойлов [и др.] // Атомная энергия. – 2014. – Т.116. – Вып.1. – С. 11–15.

6. *Перепелица, Н.И.* Дистанционирующие решетки с локальными завихрителями для тепловыделяющих сборок PWR / Н.И. Перепелица // Атомная техника за рубежом. – 2006. – № 1. – С.3–7.

7. *Дмитриев, С.М.* Экспериментальные и расчетные исследования гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в модели ТВС реактора КЛТ-40С / С.М. Дмитриев [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 3. – С. 114–119.

8. *Бородин, С.С.* Исследования гидродинамических и массообменных характеристик теплоносителя в ТВСА–Альфа реакторов ВВЭР при постановке системы перемешивающих решеток типа «порядная прогонка» / С.С. Бородин [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4–3. – С. 650–652.

9. *Дмитриев, С.М.* Исследование массообмена теплоносителя за перемешивающими решетками ТВС реакторов ВВЭР-300 с целью обоснования их эффективности / С.М. Дмитриев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 5 (102). – С. 197–205.

10. *Дмитриев, С.М.* Исследования локальной гидродинамики и межъячеечного массообмена потока теплоносителя в районе направляющих каналов тепловыделяющих сборок реакторов PWR / С.М. Дмитриев [и др.] // Промышленная энергетика. – 2013. – № 12. – С. 45–50.

11. *Дмитриев, С.М.* Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реакторов PWR с перемешивающими решетками / С.М. Дмитриев [и др.] // Теплоэнергетика. – 2014. – № 8. – С. 20–27.

12. *Бородин, С.С.* Расчетно-экспериментальные исследования локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР с перемешивающими решетками / С.С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. – 2015. – № 4. – С. 177–182.

Application of multihole pressure probe for research of coolant velocity profile in nuclear reactor fuel assemblies

Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Legchanov M.A., Khrobostov A.E.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Minina st., 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia

Received 17.06.2015

Accepted for publication 03.11.2015

Abstract. Development of heat and mass transfer intensifiers is a major engineering task in the design of new and modernization of existing fuel assemblies. These devices create lateral mass flow of coolant. Design of intensifiers affects both the coolant mixing and the hydraulic resistance. The aim of this work is to develop a methodology of measuring coolant local velocity in the fuel assembly models with different mixing grids. To solve the problems was manufactured and calibrated multihole pressure probe. The air flow velocity measuring method with multihole pressure probe was used in the experimental studies on the coolant local hydrodynamics in fuel assemblies with mixing grids. Analysis of the coolant lateral velocity vector fields allowed to study the formation of the secondary vortex flows behind the mixing grids, and to determine the basic laws of coolant flow in experimental models. Quantitative data on the coolant flow velocity distribution obtained with a multihole pressure probe make possible to determine the magnitude of the flow lateral velocities in fuel rod gaps, as well as to determine the distance at which damping occurs during mixing.

Keywords: multihole pressure probe, local hydrodynamics, fuel assembly.

Адрес для переписки:

Добров А.А.
Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, 24, 603950, г. Нижний Новгород, Россия
e-mail: a.a.dobrov@yandex.ru

Address for correspondence:

Dobrov A.A.
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Minina st., 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: a.a.dobrov@yandex.ru

Для цитирования:

Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е.
Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных каскад ядерных реакторов
Приборы и методы измерений,
2015. – Т. 6, № 2. – С. 188–195

For citation:

Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Legchanov M.A., Khrobostov A.E.
Application of multihole pressure probe for research of coolant velocity profile in nuclear reactor fuel assemblies
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 188–195

Acknowledgments

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the contract № 02.G25.31.0124 dated December 3, 2014 according to Government of the Russian Federation order №218 dated April 9, 2010.

References

1. Dmitriev S.M., Zverev D.L., Byh O.A., Panov Ju.K., Sorokin N.M., Farafonov V.A. *Osnovnoye oborudovaniye AES* [Basic equipment of Nuclear Power Plants]. Minsk, Vyshejschaya shkola Publ., 2015. 288 p. (in Russian).
2. Markov P.V. [Mixing intensification in water-cooled reactor fuel assemblies with honeycomb mixing grid]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Yadernaya energetika*, 2012, no. 1, pp.117–125 (in Russian).
3. Krapivtsev V.G., Solonin V.I., Tsirin S.I. [Organization of convective transport in the rod bundle behind honeycomb grids for VVER]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroyeniye*, 2011, no. 4, pp. 7–12 (in Russian).
4. Samoilov O.B., Romanov A.I., Kaydalov V.B., Falkov A.A., Simanovskaya I.E., Kostritsyn V.A., Evstigneev I.V. *Peremeshivayuschaya reshiotka teplovyydelyayuschej sborki yadernogo reaktora* [Mixing grid for fuel assembly of nuclear reactor]. Patent RF № RU 2383954, 2008.
5. Samoilov O.B., Kupriyanov A.V., Falkov A.A., Shipov D.L., Molodtsov A.A., Luk'yanov V.E. Experimental investigation of the heat-engineering characteristics of TVSA fuel assemblies with mixing lattices. *Atomic Energy*, 2014, vol. 116, no. 1, pp.14–19.
6. Perepelitsa N.I. Spacer grid with local swirlers for PWR fuel assemblies. *Atomnaya tekhnika za rubezhom*, 2006, no. 1, pp. 3–7 (in Russian).
7. Varencov A.V., Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Solntsev D.N., Khrobostov A.E. [Experimental and computational studies of coolant hydrodynamics and mass transfer in the fuel assembly of KLT-40S reactor]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzhya*, 2013, no. 3, pp. 114–119 (in Russian).
8. Borodin S.S., Varencov A.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Solntsev D.N. [Researches of hydrodynamic and mass transfer characteristics of the coolant in the TVSA-Alpha fuel assembly with system of mixing grids “raw sweep”]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4–3, pp. 650–652 (in Russian).
9. Dmitriev S.M., Varentsov A.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Legchanov M.A., Khrobostov A.E. [Researches of coolant mass transfer behind mixing grids in fuel assemblies for reactors VBER-300 in order to substantiate its effectiveness]. *Trudy NGTU imeni R.E. Alekseyeva*, 2013, no. 5 (102), pp. 197–205 (in Russian).
10. Dmitriev S.M., Legchanov M.A., Khrobostov A.E., Varentsov A.V., Doronkov D.V., Dobrov A.A. [Researches of local hydrodynamics and intercell mass transfer of coolant flow in the area of the control rod of PWR fuel assemblies]. *Promyshlennaya energetika*, 2013, no. 12, pp. 45–50 (in Russian).
11. Dmitriev S.M., Samoilov O.B., Khrobostov A.E., Varentsov A.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Sorokin V.D. Combined numerical and experimental investigations of local hydrodynamics and coolant flow mass transfer in KVADRAT-type fuel assemblies of PWR reactors with mixing grids. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, issue 8, pp. 558–565.
12. Borodin S.S., Varentsov A.V., Dobrov A.A., Dmitriev S.M., Pronin A.N., Solntsev D.N., Sorokin V.D., Khrobostov A.E. [Computational and experimental studies of local hydrodynamic and mass transfer characteristics of coolant flow in the TVSA fuel assembly of VVER reactors with mixing grids]. *Teplovye processy v tekhnike*, 2015, no. 4, pp. 177–182 (in Russian).