

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В МОДЕЛИ-ИМИТАТОРЕ ТВС С ДИСТАНЦИОНИРУЮЩЕЙ РЕШЕТКОЙ

О. Н. Кашинский,¹ П. Д. Лобанов,¹ А. С. Курдюмов,¹ Н.А. Прибатурин¹, С.Е. Волков²

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

²ОАО «ТВЭЛ», Москва, Россия

Дистанционирующую решетку в ТВС важно рассматривать не только как элемент конструкции, вносящий дополнительное гидравлическое сопротивление, но и как возмущающий течение жидкости фактор, длину и величину возмущения от которого необходимо знать. В работе проведено экспериментальное исследование локальной гидродинамической структуры потока и теплообмена от нагреваемой стенки к потоку в 37 стержневой сборке-имитаторе ТВС при наличии дистанционирующей решетки. Показано, что наибольшая неравномерность распределения течения вокруг имитатора твэла наблюдается в области, непосредственно примыкающей к зоне выхода потока жидкости из дистанционирующей решетки. При увеличении расстояния от решетки наблюдается равномерное распределение гидродинамических характеристик потока.

Введение.

Переход от расчета средних значений теплогидравлических параметров контуров ЯЭУ к локальным значениям является важнейшей задачей на этапе проектирования реакторов четвертого поколения [1]. Знание локальных распределений полей давления, температуры и скорости жидкости особенно важно при проектировании наиболее напряженных узлов активной зоны реактора. Проведенное в [2] численное исследование процессов, протекающих в энерговыделяющей сборке, показывает существенное различие локальной структуры потока при расчете при помощи кодов CFX и COBRA. При работе с коммерческими кодами существует проблема правильного выбора моделей турбулентности и замыкающих условий. Некорректно подобранные условия могут привести к значительным погрешностям расчета. Прямые методы численного моделирования, такие как DNS и LES занимают значительное компьютерное время даже для каналов простой геометрии и пока не могут быть использованы для проектирования сложного технологического оборудования.

Важным элементом активной зоны реактора являются дистанционирующие решетки (ДР). Они являются одним из основных источников гидравлического сопротивления в теплообменном контуре реактора [3]. При изучении течения вблизи дистанционирующих решеток [4-6] отмечалось влияние решетки на характер течения возле нее.

В связи с этим является актуальным проведение цикла экспериментальных исследований локальных распределений теплогидравлических характеристик потока теплоносителя в натуральных и модельных условиях в каналах ЯЭУ.

Целью работы является экспериментально исследование локальной гидродинамической структуры потока в 37 стержневой сборке-имитаторе ТВС при наличии дистанционирующей решетки.

Экспериментальная установка.

Экспериментальное исследование проведено на гидродинамическом стенде, представляющем собой замкнутый контур. Жидкость из бака 1 емкостью 500 л подавалась циркуляционным насосом 4 на вход вертикально установленного рабочего участка, в котором расположена модель - имитатор ТВС 6. На подводящем трубопроводе расположена расходомерная диафрагма 5. Из рабочего участка жидкость по отводящему

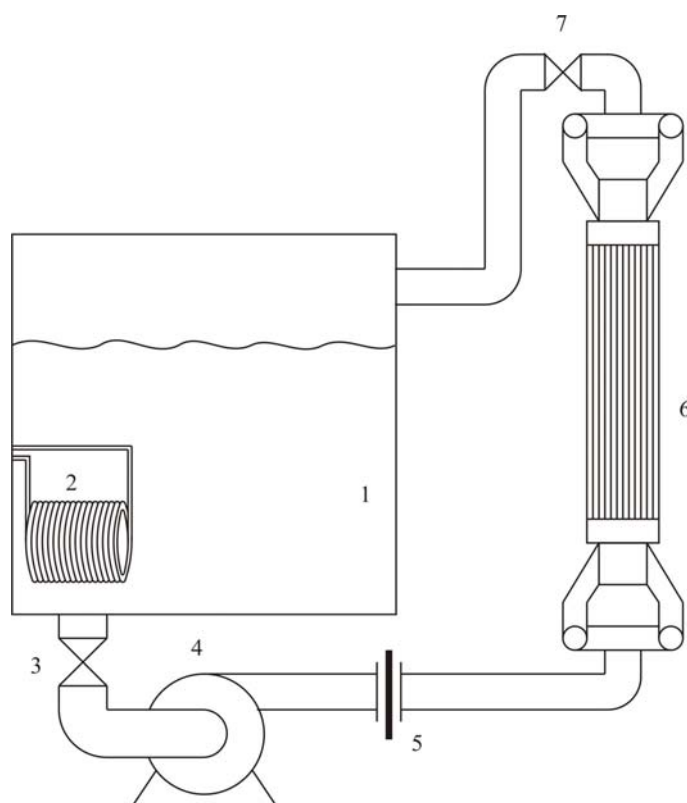


Рисунок 1. Схема измерительного стенда.

1 – бак с жидкостью, 2 – нагреватель, 3, 7 – вентиль запорный, 4 – насос, 5 – расходомерная диафрагма, 6 – рабочий участок с моделью – имитатором ТВС.

трубопроводу попадает обратно в бак. Для обеспечения равномерного поля скорости жидкости на входе в модель ТВС перед ней в рабочем канале установлен хонейкомб, выполненный из трубок из нержавеющей стали внешним диаметром 8 мм и толщиной стенки 1 мм. Длина трубок хонейкомба составляет 150 мм.

Модель - имитатор ТВС, длиной 1,2 м состоит из 37 металлических стержней - имитаторов твэлов и пяти дистанционирующих решеток. Две дистанционирующие решетки расположены на расстоянии 50 мм от торцов имитаторов твэлов. Еще две решетки расположены на расстоянии 250 мм от торцов имитаторов твэлов. Эти решетки служат для позиционирования стержней. Исследуемая дистанционирующая решетка устанавливается посередине пучка стержней. Модель – имитатор ТВС была изготовлена таким образом, что ее поперечное сечение соответствует форме 37-ми сложенных вместе правильных шестиугольных ячеек с шагом размещения, соответствующим параметрам ТВС для ВВЭР. В такой модели площадь проливного сечения сохраняется постоянной по ее длине.

Расход жидкости через рабочий участок составлял $30.2 \text{ м}^3/\text{ч}$, что соответствовало средней скорости течения жидкости через модель – имитатор 3 м/сек. Число Рейнольдса, определенное по гидравлическому диаметру равнялось 39500. Во время экспериментов температура рабочей жидкости поддерживалась постоянной на уровне 25°C .

В ходе экспериментов проводились измерения изменения статического давления по высоте модели – имитатора ТВС, перепада давления на ДР, осевой скорости жидкости вокруг центрального стержня – имитатора твэла, коэффициентов трения и теплообмена на его стенке. В системе регистрации сигналов использовался многоканальный АЦП, на вход которого подавались напряжения от датчиков давления, расходомерной системы, датчиков температуры жидкости, датчиков скорости и трения.

Методика измерения скорости.

Измерение скорости жидкости внутри модели – имитатора ТВС проводилось с использованием трубки Пито. Для этого в центральный стержень-имитатор твэла вмонтирован миниатюрный датчик скорости. Датчик изготовлен из капиллярной нержавеющей трубки с внутренним диаметром 0.4 мм и наружным диаметром 0.6 мм. Центр капиллярной трубки находится на расстоянии 1,8 мм от поверхности стержня – имитатора твэла. Определение скорости жидкости V производилось по измеренному перепаду давления ΔP между отборами статического и динамического давления в соответствии с формулой $V = (2 * \Delta P / \rho)^{1/2}$, где ρ - плотность жидкости. Отбор динамического давления осуществлялся через капиллярную трубку, отбор статического давления производился через отверстие диаметром 0,9 мм находящееся на поверхности трубки - имитатора твэла и расположенное на одной координате по высоте с рабочим торцом капилляра. Погрешность измерения скорости составляла 3 %.

Методика измерения трения.

В основе электродиффузионного метода лежит измерение скорости диффузии ионов к электроду, помещенному в поток электропроводящей жидкости. Непосредственно измеряемой величиной является ток датчика, пропорциональный диффузионному потоку активных ионов. В поток жидкости помещаются два электрода: катод малого размера, являющийся датчиком измеряемой величины, и анод, имеющий значительно больший размер. Между датчиком и анодом прикладывается постоянное напряжение от источника. При этом на электродах происходит быстрая химическая реакция перезарядки ионов, после которой концентрация активных ионов вблизи катода становится равной нулю. В этом случае электрический ток в цепи будет лимитироваться лишь конвективной диффузией ионов в среде, т.е. определяться гидродинамикой потока.

Для проведения измерений распределения трения в центральный стержень - имитатор твэла были вмонтированы заподлицо с внешней поверхностью стержня электрохимические датчики. Погрешность измерения трения составляла 7%.

В процессе измерений скорости жидкости и трения на стенке производилось вращение центральной трубки – имитатора твэла вокруг оси и ее перемещение по высоте. Позиционирование датчиков скорости и трения относительно осевой и азимутальной координат производилось с использованием шаговых электродвигателей. Управление двигателями осуществлялось при помощи программного комплекса, позволяющего одновременно управлять положением датчика и регистрировать сигнал. Минимальные шаги измерений составляли 10 градусов по азимутальной координате и 5 мм по высоте модели имитатора ТВС. Выполняя измерения таким образом, мы получаем возможность восстановить картину течения жидкости в межтвэльном зазоре вокруг центрального стержня – имитатора твэла по матрице данных, состоящей из 36 точек для каждого из 20 поперечных сечений по высоте. Последующая обработка записанных реализаций сигналов датчиков позволяла построить трехмерные распределения осевой скорости и трения на стенке.

Результаты экспериментов.

Присутствие ДР вызывает существенное изменение гидродинамики течения в сборке вертикальных стержней. Прежде всего следует отметить тот факт, что обладая гидродинамическим сопротивлением, ДР вызывает скачкообразное падение давления. Однако график изменения давления при течении жидкости через ДР является более сложным чем линейная зависимость. Как следует из рисунка 2, где приведен такой график, внутри ДР давление резко падает, а затем восстанавливается. Подобное поведение давления свидетельствует о происходящих внутри ДР изменениях скорости течения, приводящих к перестройке профиля осевой скорости на выходе из решетки.

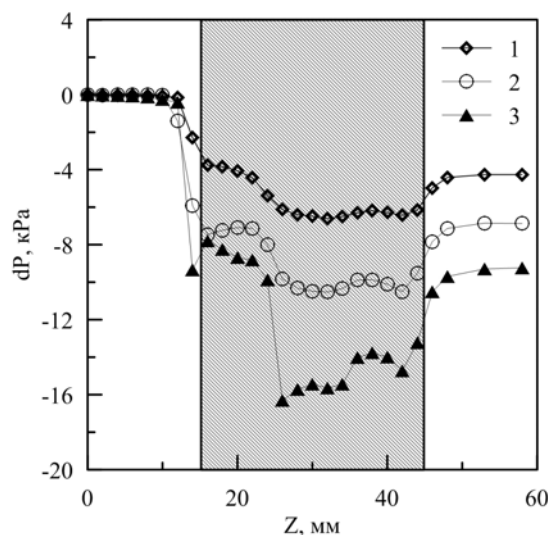


Рисунок 2. Изменение давления внутри ДР: 1 – $V_L = 2.99$ м/с; 2 – $V_L = 3.96$ м/с; 3 – $V_L = 4.76$ м/с.

Эволюцию напряжения трения на стенке можно рассматривать как параметр, указывающий на степень влияния возмущения течения внутри ТВС, вносимого дистанционирующей решеткой. Область распространения возмущений можно определить по графику, представленному на рисунке 3. Здесь приведены осредненные по угловой координате значения напряжения трения на стенке центрального стержня имитатора твэла в зависимости от расстояния до и после дистанционирующей решетки. Расположение решетки на рисунке показано заштрихованной областью. Как видно, в области до решетки трение на стенке практически сохраняет свое значение на постоянном уровне. К этому значению и отнесены данные по трению, представленные на графике. Сразу после решетки трение возрастает на 15 – 20 % и затем резко спадает. Как следует из графика, для всех скоростей жидкости V_L наблюдается достаточно быстрое уменьшение трения на стенке по мере удаления от дистанционирующей решетки. Практически можно считать, что на расстоянии 100 мм от решетки трение возвратилось на свой первоначальный уровень и при дальнейшем увеличении расстояния сохраняет свое значение. Это

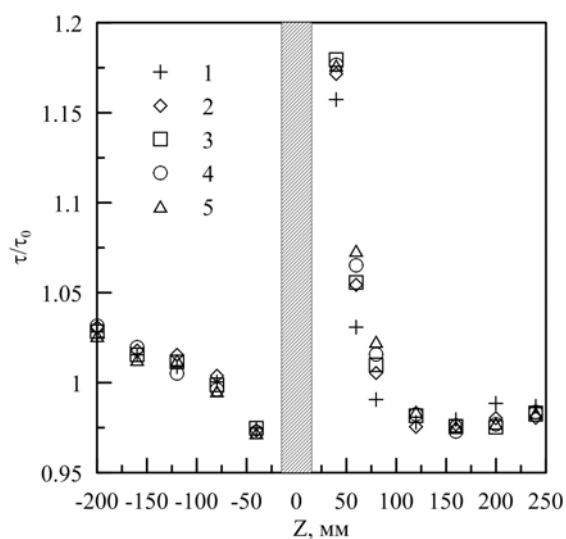


Рисунок 3. Зависимость относительного напряжения трения на стенке имитатора твэла от вертикальной координаты в модели ТВС: 1 – $V_L = 2.99$ м/с; 2 – $V_L = 3.52$ м/с; 3 – $V_L = 3.96$ м/с; 4 – $V_L = 4.36$ м/с; 5 – $V_L = 4.76$ м/с.

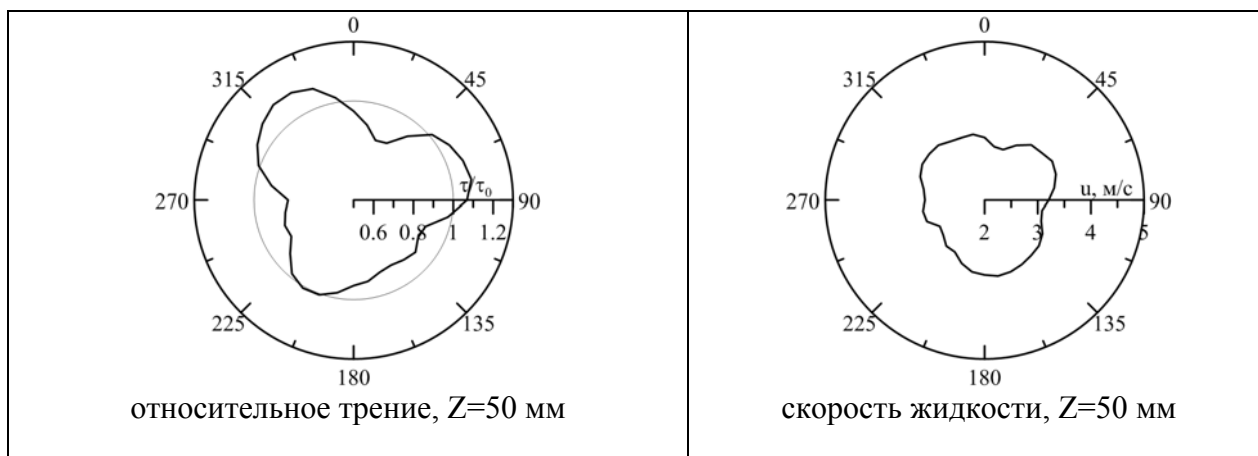


Рисунок 4. Азимутальное распределение осевой скорости –а) и трения на стенке центрального стержня –б) после ДР

расстояние показывает предел влияния возмущения потока жидкости, вызванное ДР, на течение жидкости в ТВС. Аналогичный результат получен для коэффициента теплообмена.

Показано, что наибольшая неравномерность распределения течения вокруг имитатора твэла наблюдается в области, непосредственно примыкающей к зоне выхода потока жидкости из дистанционирующей решетки (рис. 4). Наличие большой неоднородности подтверждают измерения напряжения трения на стенке центрального стержня сборки и скорости жидкости в межтвэльном пространстве вокруг центрального стержня сборки. Длина этой области невелика и составляет величину порядка $Z=50$ мм, т.е. не превышает двух высот дистанционирующей решетки. Результаты измерений показали, что на расстоянии больше чем 100 мм после дистанционирующей решетки азимутальные профили осевой скорости вокруг стержня имитатора твэла и локального трения на стенке этого стержня близки к форме окружности, т.е. возмущение вносимое решеткой на течение пропадает.

Выводы

Проведено исследование локальной гидродинамической структуры течения теплоносителя в сборке-иммитаторе ТВС.

Показано, что наибольшая неравномерность распределения осевой скорости и трения на стенке вокруг имитатора твэла наблюдается в области, непосредственно примыкающей к зоне выхода потока жидкости из дистанционирующей решетки. Картина течения в этой области характеризуется существенной неравномерностью потока жидкости в межтвэльном пространстве вокруг имитатора твэла. Разница между максимальными и минимальными значениями осевой скорости и трения на стенке по азимутальной координате достигает 20 – 25 %. Длина этой области невелика и составляет величину порядка 50 мм, т.е. не превышает двух высот дистанционирующей решетки.

Полученные данные позволяют сделать вывод о расстоянии, на которое распространяются возмущения, вносимые в поток жидкости дистанционирующей решеткой. Результаты измерений показали, что на расстоянии больше чем 100 мм после дистанционирующей решетки азимутальные профили осевой скорости вокруг стержня имитатора твэла и локального трения на стенке этого стержня близки к форме окружности, т.е. возмущение вносимое решеткой на течение пропадает.

Работа проведена при частичной поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых кандидатов наук МК-5147.2012.8.

Литература

1. Кириллов П.Л. Основные направления научных исследований в области теплогидравлики атомных энергетических установок (Часть I). 2005. Теплоэнергетика, т. 3. С. 15-19.
2. Toth S., Aszodi A. CFD study on coolant mixing in VVER-440 fuel rod bundles and fuel assembly heads. Nuclear Eng. And Design. V. 240. 2010. P. 2194-2205.
3. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Том 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ. Под общей редакцией доктора технических наук, профессора П.Л. Кириллова. М.: ИздАТ. 2010. 774 с.
4. Пометько Р.С., Селиванов Ю.Ф. Результаты исследований кризиса теплообмена и перемешивания теплоносителя применительно к реакторам ВВЭР. - 3-я научно-техническая конференция "ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС С ВВЭР", Подольск, 2003, с.153 .
5. Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Самойлов О.Б., Сорокин Н.М., Хробостов А.Е. Особенности локальной гидродинамики различных модификаций альтернативных ТВС. В сборнике докладов 2-ой Международной научно-технической конференции «Росэнергоатом» Москва, 2006, стр. 68-77
6. Rehme K. The Structure of Turbulent Flow through Rod Bundles. - Nuclear Engineering and Design, 1987, v. 99, pp.141-154.