

Претестовые и посттестовые CFD-расчёты позволили оценить эффективность использования моделей, заложенных в расчётные программы, а также определить явления и эффекты, которые изначально не были учтены. Таким образом, уже на данном этапе возможности стенда позволяют получить представительные экспериментальные данные, которые могут быть использованы в качестве верификационной базы для расчётных программ.

В рамках проведения следующего этапа планируется провести исследования процессов смешения теплоносителя в напорной камере реактора при варьировании критерии Рейнольдса за счет изменения скорости потока, молекулярной вязкости и гидравлического диаметра.

УДК 621.039

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССООБМЕНА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ВОДОЙ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

*С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, А.В. Рязанов,
Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов
Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева, Российская Федерация*

Одними из задач атомной энергетики РФ являются: повышение мощности и надежности работающих АЭС, создание первой в мире плавучей АЭС и др. Привнося значительный вклад в достижение поставленных целей АО «ОКБМ Африкантов» (РФ, г. Н. Новгород) проводит разработки ТВС для реакторов различных типов. К таким кассетам относятся: ТВСА для реакторов ВВЭР-1000 и ТВС КЛТ-40С для плавучей АЭС. Перечисленные топливные сборки имеют принципиальные конструктивные отличия от других типов ТВС аналогичного назначения, что позволяет получать более высокие эксплуатационные показатели при сохранении уровня теплотехнической надежности. Конструкции ТВС предусматривают наличие решеток интенсификаторов. Таким образом, необходимы исследования, которые позволят оценить влияние решеток на поток теплоносителя, с целью выбора оптимальной конструкции с точки зрения интенсивности перемешивания и гидравлических потерь.

Для оценки влияния на поток теплоносителя различных типов решеток, в базовой научно-исследовательской лаборатории «Реакторная гидродинамика» создан экспериментальный стенд, представляющий собой аэродинамический контур через который прокачивается воздух (рис. 1).

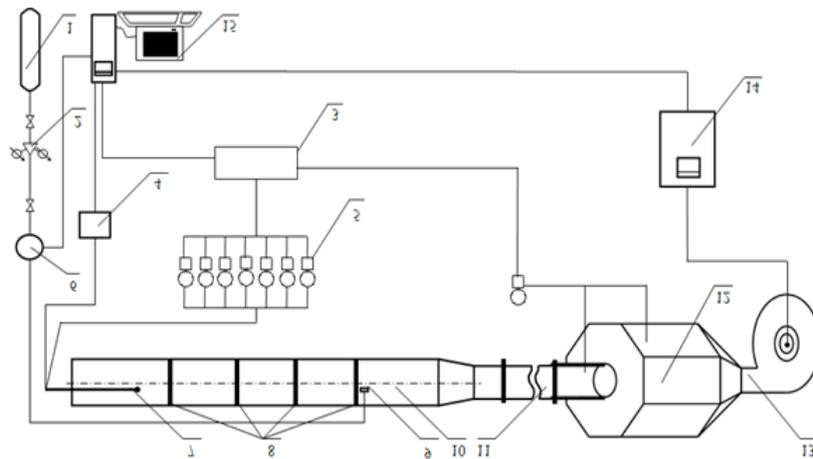


Рисунок 1 – Схема аэродинамического стенда

1 – газовый баллон, 2 – редуктор, 3 – базовый блок коммутации/измерения, 4 – модульный газоанализатор, 5 – преобразователи давления, 6 – регулятор расхода газа, 7 – отборный зонд, 8 – статические отборы, 9 – устройство ввода трассера в ячейку ЭМ, 10 – экспериментальная модель, 11 – успокоительный участок, 12 – ресиверная емкость, 13 – вентилятор высокого давления, 14 – преобразователь частоты, 15 – ЭВМ

Исследования локальных характеристик межъячеечного массообмена потока в экспериментальных моделях (ЭМ) ТВС проводились методом трассера. Принцип проведения исследований заключается в том, что поток воздуха посредством радиального вентилятора высокого давления поступает в ресиверную емкость, движется через расходомерное устройство и успокоительный участок, а затем, пройдя через ЭМ, выбрасывается в атмосферу. Газ-трассер подается через впускной зонд (рис. 2а) в характерную ячейку пучка твэлов в начале исследуемого участка и также выбрасывается в атмосферу вместе с газоздушной смесью. При помощи трубки Пито (рис. 2б), используемой в качестве отборного зонда, за исследуемым поясом решетки производится замер концентрации трассера по длине и сечению ЭМ. Каждая из исследуемых ЭМ в поперечном сечении условно делилась на ячейки, каждой из которых присваивался свой порядковый номер. Также по длине каждая изучаемая сборка разбивалась на определенное количество сечений, в зависимости от места установки исследуемой решетки. Измерение полей скорости в ЭМ производилось при помощи пневмометрического пятиканального зонда. Данным зондом (рис. 2в) определяется вектор скорости в точке по трем его компонентам путем измерения давлений в отверстиях чувствительной головки зонда и последующего пересчета по тарировочным характеристикам.

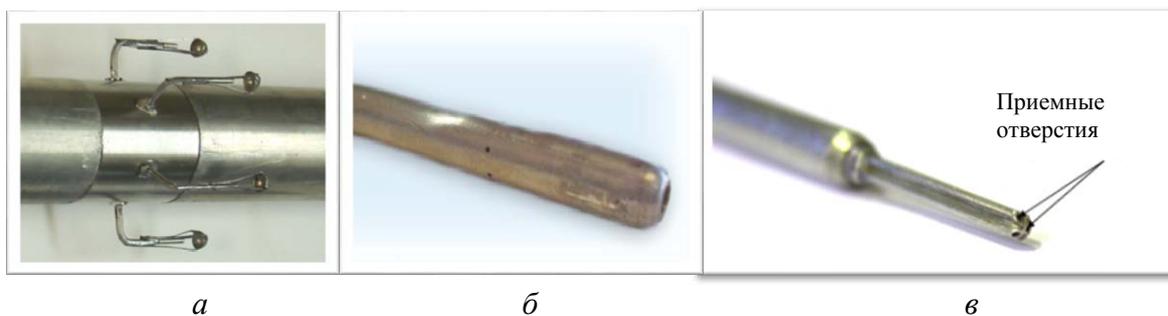


Рисунок 2 – Оснастка для проведения экспериментов:
а – впускной зонд, *б* – трубка Пито, *в* – пятиканальный пневмометрический зонд

На аэродинамическом стенде были также определены коэффициенты гидравлического сопротивления (КГС) всех исследуемых решеток. Анализ результатов исследований КГС показывает, что выбранные конструкции и геометрические характеристики изучаемых решеток в диапазоне требуемых чисел Re обеспечивают их необходимое гидравлическое сопротивление, а полученные значения соответствуют гидравлическому сопротивлению натуральных решеток. Погрешности измерения концентрации газа-трассера не превышают 1,5%, подача газа обеспечивается регулятором расхода газа El-Flow с отклонениями 0,5% массового расхода. Измерение давлений в каналах пневмометрических зондов осуществлялось при помощи преобразователей избыточного давления с пределом допускаемой основной погрешности 0,25%, погрешность получаемых проекций скорости не превышала 7% от ее абсолютного значения.

Результаты исследований течения в моделях кассеты ТВСА

Исследования локальных характеристик потока в ТВСА проводились на различных ЭМ, представляющих собой масштабные копии фрагментов активной зоны и сегментов кассет (рис. 3). 57 и 94 стержневые модели имитируют область АЗ на стыке соседних ТВС реакторов ВВЭР, что дает возможность исследования межкассетных взаимодействий в потоке.

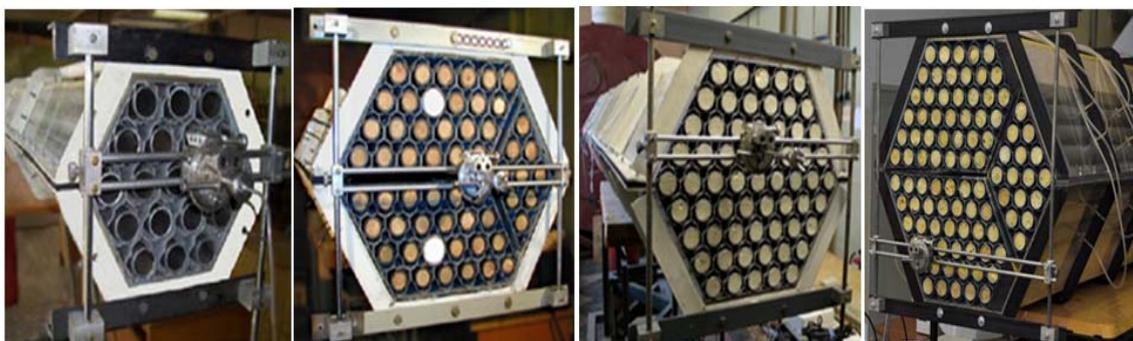


Рисунок 3 – Экспериментальные модели ТВСА

В ходе исследований определялась оптимальная конфигурация установки перемешивающих решеток (ПР) типа «порядная прогонка» и «закрутка вокруг твэла». По результатам комплексных исследований были

сделаны следующие выводы: экспериментально определены расходы через характерные ячейки модели; наличие дефлекторов приводит к возникновению направленного конвективного движения потока по направлению отгиба соответствующих дефлекторов и, как следствие, появлению поперечных постепенно затухающих составляющих скорости; изменение концентрации трассера в ячейках показывает, что не весь поток теплоносителя движется по направлению расположения дефлекторов. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за ПР вследствие дополнительной турбулизации потока; определены длины затуханий возмущений массообменных процессов за ПР ($l/d \approx 14, 16$, d – гидравлический диаметр модели); при последовательной постановке двух перемешивающих решеток типа «порядная прогонка» происходит более равномерное распределение концентрации трассера в поперечном сечении экспериментальной модели, по сравнению с одной ПР типа «порядная прогонка» или ПР типа «закрутка вокруг твэла».

Выводы. В результате экспериментальных работ выявлены основные закономерности течения в топливных сборках различных конструкций. На основе исследований массообменных характеристик был создан расчетный алгоритм, заложенный в программу для ЭВМ. Созданная программа позволяет оценивать распределения концентрации, используя экспериментально полученные поля скоростей. Результаты расчетов были использованы для вычисления коэффициентов массообмена между характерными ячейками моделей, а также эффективного коэффициента перемешивания ПР для ТВСА реакторов ВВЭР, используемых при инженерных расчетах АЗ в качестве замыкающих соотношений.

Накопленная база данных по течению теплоносителя в ТВС для реакторов различных типов легла в основу инженерного обоснования конструкций АЗ. Результаты исследований используются для верификации CFD-кодов и программ детального поэлементного расчета активных зон с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности.