

С.М. Дмитриев¹, М.А. Легчанов¹, О.Б. Самойлов², Н.М. Сорокин³, А.Е. Хробостов¹

Нижегородский государственный технический университет, Россия
ФГУП «ОКБМ им И.И. Африкантова», Н.Новгород, Россия
ФГУП Концерн «Росэнергоатом»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ТВС ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ АКТИВНЫХ ЗОН РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локальных гидродинамических характеристик в альтернативной ТВС реакторов ВВЭР-1000 в районе направляющих каналов различного конструктивного исполнения и при использовании смесительных решеток.

1. ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации серийных ТВС при глубоком выгорании топлива на действующих энергоблоках ВВЭР-1000 показывает однозначную тенденцию увеличения их формоизменения, являющуюся следствием недостаточной осевой устойчивости конструкции кассет.

ФГУП «ОКБМ им. И.И. Африкантова» разработана альтернативная ТВС (ТВСА) с улучшенными характеристиками для использования в активных зонах как действующих, так и вновь вводимых установок типа ВВЭР-1000.

Преимуществом конструкции ТВСА является повышенная стойкость к формоизменению при глубоких выгораниях топлива, что сводит к минимуму искривления ТВСА в процессе эксплуатации. Конструкция ТВСА характеризуется наличием 6 уголков жесткости, которые вместе с поясами дистанционирующих решеток (ДР) образуют силовой каркас, обеспечивающий в процессе эксплуатации жесткость и геометрическую стабильность ТВСА.

Модернизация альтернативной ТВС заключается в использовании усовершенствованного типа органов регулирования СУЗ, и, как вариант, требует применения направляющего канала (НК) увеличенного диаметра. Это влечет за собой уменьшение проходного сечения в области, прилегающей к НК, и, как следствие, изменение теплосъема с твэлов, расположенных вокруг направляющего канала. Кроме того, для предотвращения изгиба поясов дистанционирующих решеток принято решение устанавливать опорные элементы в виде втулок на направляющий канал непосредственно за поясами ДР. Следует отметить, что минимальные значения запаса до кризиса теплоотдачи реализуется на твэлах вблизи направляющего канала.

В последнее время активизировались работы по усовершенствованию конструкции дистанционирующих решеток (ДР) и оптимизации шага их расположения по высоте тепловыделяющей сборки. Поэтому дальнейшая модернизация ТВСА заключа-

ется в использовании смесительных решеток, имеющих турбулизирующие дефлекторы, которые позволяют улучшить перемешивание теплоносителя между ячейками и турбулизовать поток в пределах отдельных ячеек. Оптимизация конструкции решетки требует поиска вариантов углов отгиба турбулизирующего дефлектора, обеспечивающих наиболее благоприятное сочетание таких параметров, как интенсивность перемешивания, гидравлические потери и запасы до кризиса теплоотдачи. Смесительные решетки устанавливаются после пояса ДР по ходу движения потока и объединены с ним одним бандажом.

Таким образом, различные модернизации конструкции ТВСА, связанные с использованием НК увеличенного диаметра и применением опорных втулок, а также с применением смесительных решеток потребовали детального анализа гидродинамики потока теплоносителя [1,2].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования гидродинамических характеристик потока теплоносителя в межкассетном зазоре и пучке твэлов проводились на экспериментальном стенде, представляющем собой аэродинамический разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. В состав экспериментального стенда входят: экспериментальная модель (ЭМ), расходомерное устройство с участками стабилизации потока, регулирующая аппаратура, измерительный комплекс.

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВВЭР-1000 с ТВСА (рис.1). ЭМ выполнена с коэффициентом геометрического подобия $K_r=4,4$, имеет длину $L=3$ м и включает в себя сегменты трех топливных кассет с 54-я твэлами - имитаторами, 2 имитатора направляющих каналов, 3 уголка жесткости и межкассетное пространство. Смесительная решетка имеет турбулизирующие дефлекторы, величина угла отгиба которых составляла 30° и 45° соответственно.

Для изучения пространственной гидродинамики потока сконструирован и использовался пятиканальный пневмометрический зонд, позволяющий определять направление движения потока, значения абсолютной скорости, статического и полного давления в данной точке [3].

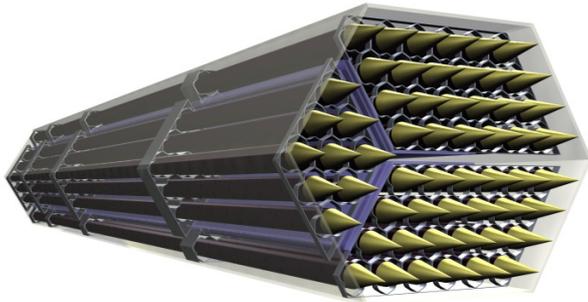


Рис.1. Экспериментальная модель

Для представительности экспериментальных исследований гидродинамических характеристик ЭМ необходимо соблюдение равенства местного гидравлического сопротивления натуральных поясов ДР и гидравлического сопротивления пояса ДР экспериментальной модели. В области автомодельного течения теплоносителя коэффициент гидравлического сопротивления дистанционирующих решеток ЭМ составил $\xi_{\text{ДР}}^{\text{ЭМ}} = 0,89$ и $1,0$, что соответствует коэффициенту гидравлического сопротивления натуральных решеток с различными углами отгиба дефлектора (30° и 45°).

Экспериментальные исследования проводились в диапазоне чисел $Re\ 90000 \div 100000$ на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя, что доказано соответствующими экспериментами. В соответствии с теорией подобия, в зоне автомодельного течения форма безразмерных полей скорости остается практически неизменной на протяжении всей области автомодельности.

Измерения величин абсолютной скорости и угла набегания потока пятиканальным пневмометрическим зондом проводились более чем в ста зонах в поперечном сечении модели на участке стабилизированного течения теплоносителя.

Исследования проводились как для направляющих каналов стандартного и увеличенного диаметров, так и при постановке на стандартный НК опорной втулки за поясом дистанционирующих решеток.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В РАЙОНЕ НАПРАВЛЯЮЩИХ КАНАЛОВ РАЗЛИЧНОГО КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Экспериментальные исследования гидродинамических характеристик потока теплоносителя в районе направляющего канала проводились в три этапа:

- исследование гидродинамики в районе направляющего канала стандартного диаметра;
- исследование гидродинамики в районе направляющего канала стандартного диаметра при постановке на направляющий канал опорной втулки;
- исследование гидродинамики в районе направляющего канала увеличенного диаметра.

Распределения проекций абсолютной скорости W_x, W_y, W_z по сечению ЭМ в ячейках, расположенных около направляющего канала стандартного диаметра, представлено на рис.2. Распределение проекций аксиальной составляющей абсолютной скорости W_z носит квазигармонический характер: минимальные значения составляющей находятся в зазорах между НК и твэлами, а максимальные значения составляющей наблюдаются в геометрических центрах нестандартных ячеек, прилежащих к НК. Величина поперечных составляющих абсолютной скорости W_x и W_y находится в пределах 3–6% среднерасходной скорости. Этот факт объясняется тем, что в турбулентном потоке в прямых каналах некруглого поперечного сечения существует движение в плоскости, перпендикулярной к направлению течения основного потока, называемое вторичным течением, являющееся следствием турбулентного переноса.

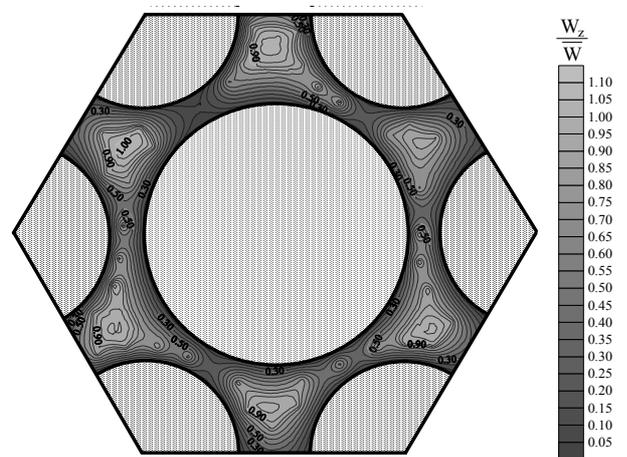


Рис. 2. Распределение проекции относительной скорости W_z/\bar{W} в районе направляющего канала стандартного диаметра без опорной втулки ($\bar{W}=34,5$ м/с, $Re=96280$, $L/d = 14,45$)

На рис. 3 представлено распределение проекций абсолютной скорости W_x, W_y, W_z по сечению ЭМ в ячейках, расположенных около направляющего канала ТВСА стандартного диаметра при постановке опорной втулки. Величина поперечных скоростей достигает максимальных значений $W_x/\bar{W} = 12\%$

$W_y/\bar{W} = 18\%$ при $L/d = 8,05$. Этот факт объясняется тем, при $L/d = 8,05$ исследуемая область находится в зоне возмущений потока за опорной втулкой. Распределение проекции аксиальной составляющей абсолютной скорости W_z имеет сильно выраженные максимумы скорости в центрах ячеек и минимумы скорости в зазорах между твэлами и направляющим каналом.

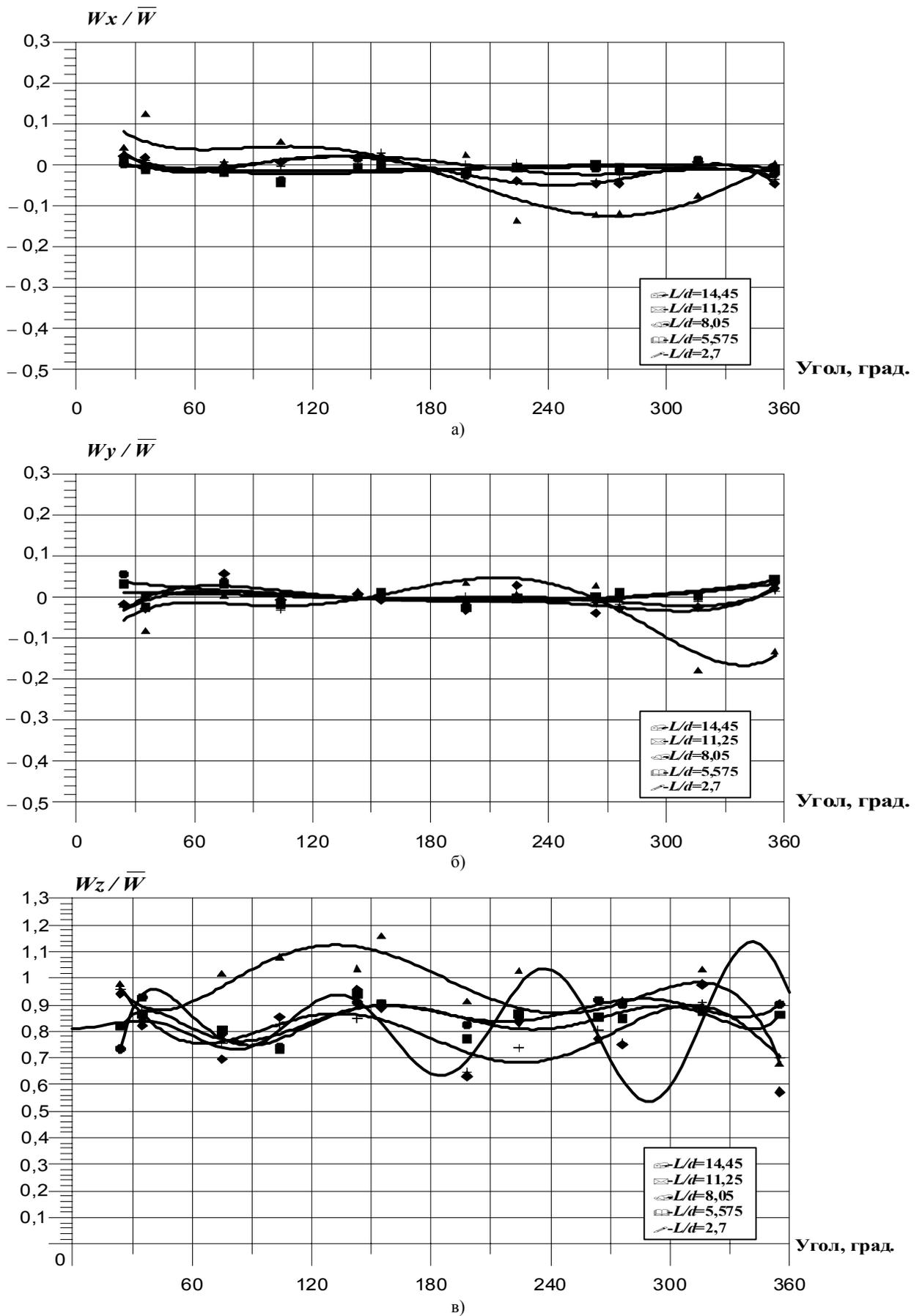


Рис.3. Распределение проекций относительных скоростей по периметру направляющего канала с опорной втулкой ($\bar{W} = 34,5$ м/с, $Re=96280$)

Особенность гидродинамики потока теплоносителя около НК увеличенного диаметра можно описать такими же закономерностями, как и для НК стандартного диаметра, но здесь сильнее выражены максимумы скорости в центрах ячеек и минимумы скорости в зазорах между твэлами и направляющим каналом, что обусловлено меньшей площадью проходного сечения ячеек, прилежащих к НК. Величина поперечных составляющих абсолютной скорости W_x и W_y находится в пределах 3–5% от среднерасходной скорости.

Для шести ячеек, прилежащих к направляющему каналу, определялась среднеинтегральная скорость по формуле:

$$\overline{W}_{яч.} = \frac{1}{F_{яч.}} \cdot \int_0^{F_{яч.}} w_i \cdot dF . \quad (1)$$

Определив среднеинтегральную скорость в ячейках по формуле (1), рассчитаем расходы теплоносителя через прилежащие к НК ячейки.

Анализ распределения расходов теплоносителя в ячейках, прилежащих к направляющему каналу, позволил заключить следующее:

- различие проходных сечений ячеек, прилежащих к направляющему каналу, и стандартных ячеек ТВСА приводит к вытеснению части расхода из области НК, в среднем на 30%-35% для направляющего канала стандартного диаметра и на 50%-60% — для направляющего канала увеличенного диаметра;
- наличие опорной втулки за поясом дистанционирующих решеток приводит к дополнительной турбулизации потока теплоносителя за ней, но не сказывается на перераспределении расхода в данной области.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ПОСТАНОВКЕ СМЕСИТЕЛЬНОЙ РЕШЕТКИ

Комплексный анализ полученных результатов экспериментальных исследований локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя при постановке смесительной решетки в ТВСА позволяет сделать следующие основные выводы:

- для модели со смесительной решеткой с углом отгиба дефлекторов 45° абсолютная величина максимальной поперечной составляющей скорости W_x/W после дефлектора потока находится на уровне 40% от среднерасходной скорости, а абсолютная величина максимальной поперечной составляющей скорости W_y/W - на уровне 50 - 55% от среднерасходной скорости потока. Этот факт свидетельствует о том, что за турбулизирующим дефлектором существуют направленные конвективные течения, которые способствуют интенсивному перемешиванию теплоноси-

теля непосредственно за смесительной решеткой;

- направление конвективных течений после смесительной решетки полностью определяется направлением и величиной угла отгиба дефлекторов смесительной решетки пояса ДР;
- затухание конвективных возмущений, вызванных турбулизирующим дефлектором, происходит на расстоянии $l/d = 2 \div 3,5$ за смесительной решеткой (рис. 4);

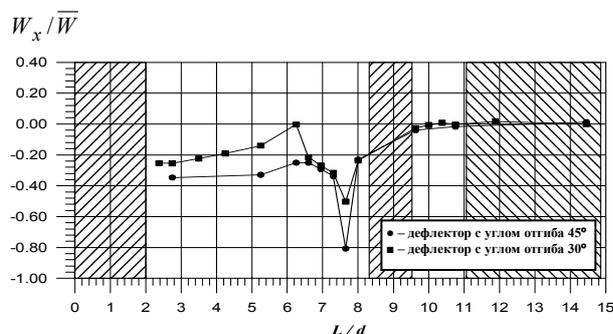


Рис. 4. Распределение проекций относительных скоростей за турбулизирующим дефлектором при углах отгибов дефлектора 30° и 45° ($\overline{W} = 32,8$ м/с, $Re = 91530$)

- уменьшение угла отгиба турбулизирующего дефлектора с 45° до 30° приводит к уменьшению абсолютных величин максимальных поперечных составляющих скорости после дефлектора на 20% - 25%;
- в областях, где отсутствуют турбулизирующие дефлекторы, поток теплоносителя носит осевой характер;
- уменьшение величины угла отгиба турбулизирующего дефлектора с 30° до 45° не приводит к изменению расхода теплоносителя через ячейки, прилежащие к направляющему каналу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведены исследования и получены экспериментальные данные по локальным полям скорости в районе направляющего канала и при постановке смесительной решетки в ТВСА реактора ВВЭР-1000. Полученные экспериментальные данные позволили выявить особенности пространственного турбулентного течения теплоносителя и процессов массопереноса в данных областях альтернативной ТВС.
2. Определено влияние опорных втулок на гидродинамику потока теплоносителя в районе НК. Наличие опорной втулки за поясом дистанционирующих решеток приводит к дополнительной турбулизации потока теплоносителя за ней, но не сказывается на перераспределении расхода в данной области.
3. Экспериментально исследованы поля скоростей в районе турбулизирующего дефлектора смесительной решетки. Показано, что величина поперечных составляющих абсолютной скорости может достигать $40 \div 50\%$ среднерасходной ско-

рости, что свидетельствует о наличии направленного конвективного течения теплоносителя за турбулизирующим дефлектором, которое способствует интенсивному перемешиванию теплоносителя непосредственно за смесительной решеткой.

4. Показано, что направление конвективных течений после смесительной решетки полностью определяется направлением и величиной угла отгиба дефлекторов смесительной решетки пояса ДР. В областях, где отсутствуют турбулизирующие дефлекторы, поток теплоносителя носит осевой характер. Уменьшение величины угла отгиба турбулизирующего дефлектора с 30° до 45° не приводит к изменению расхода теплоносителя через ячейки, прилежащие к направляющему каналу.
5. Полученные результаты являются базой данных для уточнения гидродинамических характеристик в нестандартных ячейках ТВСА в целях уменьшения консерватизма при анализе теплотехнической надежности активных зон с ТВСА.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ДР — дистанционирующая решетка;
НК — направляющий канал;

\bar{W} — среднерасходная скорость, м/с;

$F_{яч}$ — площадь проходного сечения ячейки;

w_i — скорость в i -ой точке в ячейки, прилежащей к НК, м/с;

Re — критерий Рейнольдса.

Индексы:

X, Y, Z — оси декартовой системы координат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Особенности** гидродинамики теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР-1000 при использовании смесительных и двойных дистанционирующих решеток / С.М. Дмитриев, А.Е. Хробостов, М.А. Легчанов // Труды 4-й науч.-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, 2005. С. 96 - 97.
2. **Экспериментальное** исследование локальных полей скорости в центральной и периферийной частях ТВС альтернативной конструкции реактора ВВЭР-1000 / С.М. Дмитриев, О.Б. Самойлов, Д.В. Спиридонов, А.Е. Хробостов // Труды Третьей Рос. нац. конф. по теплообмену. В 8 т. Т.1. М.: Издательство МЭИ, 2002. С. 174-177.
3. **Особенности** гидродинамики альтернативных ТВС реактора ВВЭР-1000 / Н.М. Сорокин, С.М. Дмитриев, А.Е. Хробостов, М.А. Легчанов // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2003. Вып. 3. С. 23 – 28.