

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТВС РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000 ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ РЕШЕТОК*

С.С. Бородин*, С.М. Дмитриев*, М.А. Легчанов*, А.Е. Хробостов*,
О.Б. Самойлов**, Н.М. Сорокин***

**Нижегородский государственный технический университет,
г. Нижний Новгород*

***ФГУП «ОКБМ им. И.И. Африкантова», г. Нижний Новгород*

****Концерн «Росэнергоатом», г. Москва*



Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локальных гидродинамических характеристик в альтернативной ТВС реакторов ВВЭР-1000 при использовании перемешивающих решеток.

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.

В настоящее время активизировались работы по усовершенствованию конструкции дистанционирующих решеток (ДР) и оптимизации шага их расположения по высоте тепловыделяющей сборки [1]. Следует отметить, что от конструктивных особенностей ДР зависит не только работоспособность ТВС, но и величина запаса до кризиса теплоотдачи. Поэтому дальнейшая модернизация ТВСА заключается в использовании перемешивающих решеток (рис. 1), имеющих турбулизирующие дефлекто-

© С.С. Бородин, С.М. Дмитриев, М.А. Легчанов, А.Е. Хробостов, О.Б. Самойлов,
Н.М. Сорокин, 2006

** Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Федерального агентства по науке и инновациям (грант МК-5533.2006.8, договор №02.120.11.5533)*

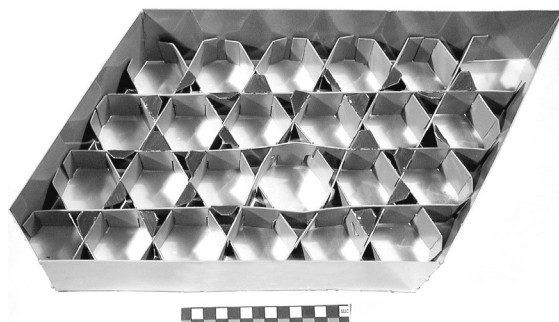


Рис. 1. Пояс перемешивающей решетки

ры, которые позволяют улучшить перемешивание теплоносителя между ячейками и турбулизовать поток в пределах отдельных ячеек.

Оптимизация конструкции перемешивающей решетки (ПР) требует поиска вариантов углов отгиба турбулизирующего дефлектора, обеспечивающих наиболее благоприятное сочетание таких параметров, как интенсивность перемешивания, гидравлические потери и запасы до кризиса теплоотдачи. Возможна постановка перемешивающей решетки после пояса ДР по ходу движения потока, объединенной с ним одним бандажом, а также размещение ПР в середине пролета между поясами дистанционирующих решеток.

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 (рис. 2), представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВВЭР-1000 с ТВСА. 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 твэлами с описанными диаметрами $40 \pm 0,5$ мм, 2 имитатора направляющих каналов, 3 уголка жесткости и межкассетное пространство. Перемешивающая решетка имеет турбулизирующие дефлекторы, величина угла отгиба дефлектора составляла 30 и 45° соответственно.

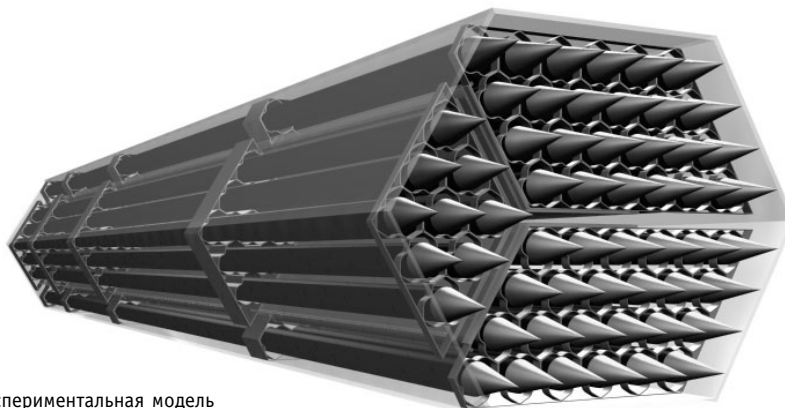


Рис. 2. Экспериментальная модель

Для изучения пространственной гидродинамики потока использовался пятиканальный пневмометрический зонд [2], позволяющий определять направление движения потока, значения абсолютной скорости, статического и полного давлений в исследуемой точке. Пневмометрический зонд представляет собой пять стальных капилляров, диаметром 0,8 мм, расположенных в двух перпендикулярных друг к другу диаметральных плоскостях. Чувствительная часть зонда имеет длину 20 мм. Остальная часть капилляров проложена внутри державки зонда, которая представляет собой стальную трубку $\varnothing 5 \times 1$ мм. Центральный капилляр срезан под углом 90° к своей оси, а четыре боковых капилляра срезаны под углом 45° к оси центральной трубки.

Для представительности экспериментальных исследований гидродинамических характеристик ЭМ необходимо соблюдение равенства местного гидравлического сопротивления натурных 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 натурных решеток с различными углами отгиба дефлектора (30 и 45°).

В соответствии с теорией подобия в области автомодельного течения безразмерный профиль скорости остается неизменным на протяжении всей области автомодельности. Все экспериментальные исследования проводились в диапазоне чисел $Re = 9 \cdot 10^4 \div 10^5$ на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя [3], что подтверждено соответствующими исследованиями.

Для построения пространственной картины течения потока в модели были рассчитаны составляющие абсолютной скорости в ее поперечном сечении (рис. 3). Координаты каждой точки замера подставлены в декартовой системе координат.

Среднеквадратичные отклонения W_x , W_y , W_z составляют соответственно 5,9, 5,9 и 5,2%, а величина предельных отклонений проекций абсолютной скорости на оси X , Y , Z при доверительной вероятности 0,997 не превышают 17,7, 17,7 и 15,6% соответственно.

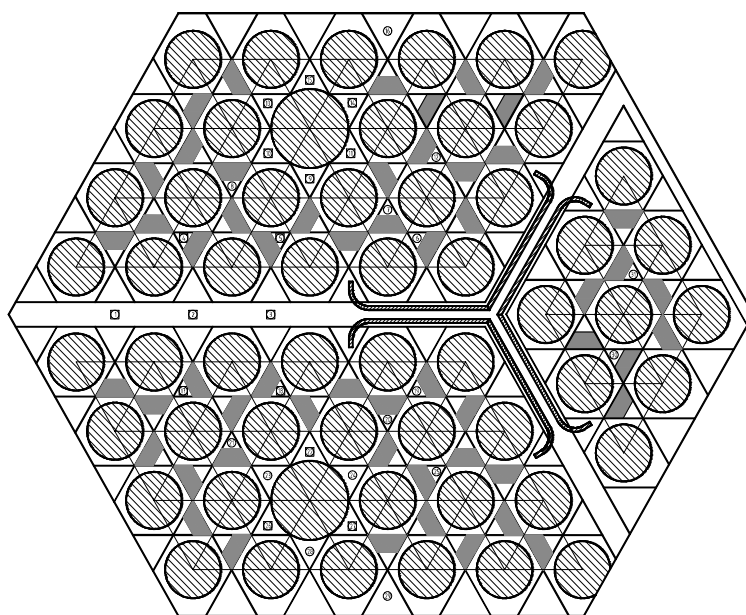


Рис. 3. Расположение зон измерений в поперечном сечении экспериментальной модели

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В МЕЖКАССЕТНОМ ЗАЗОРЕ И В РАЙОНЕ ТУРБУЛИЗИРУЮЩЕГО ДЕФЛЕКТОРА

Комплексный анализ полученных результатов экспериментальных исследований позволяет сделать основные выводы.

1. Показано, что для модели с поясом ДР с углом отгиба дефлекторов 45° абсолютная величина максимальной поперечной составляющей скорости W_x/\bar{W} после дефлектора потока находится на уровне 40% от среднерасходной скорости, а абсолютная величина максимальной поперечной составляющей скорости W_y/\bar{W} – на уровне 50–55% от среднерасходной скорости потока (рис. 4). Этот факт свидетельствует о том, что за турбулизирующим дефлектором существуют направленные конвектив-

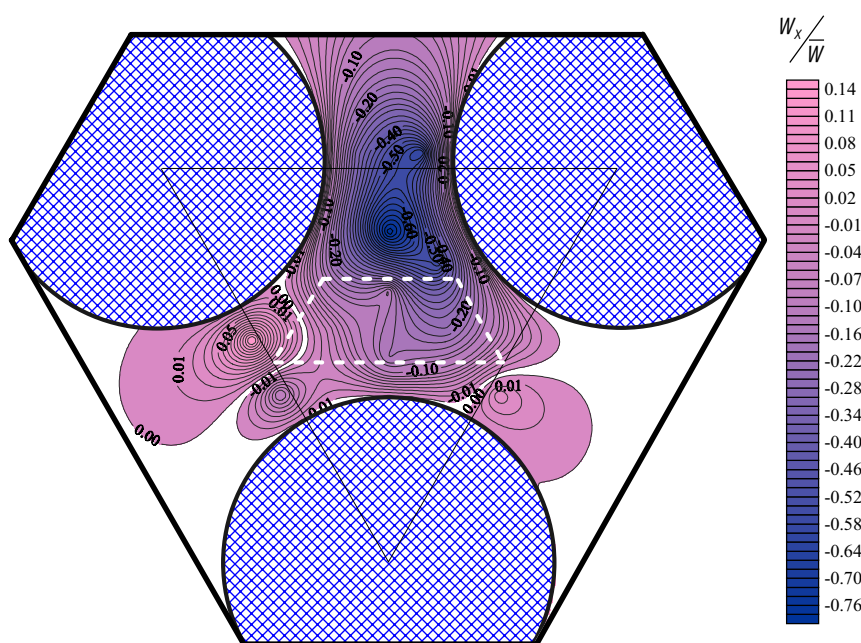


Рис. 4. Распределение относительной скорости W_x/\bar{W} в районе турбулизирующего дефлектора перемешивающей решетки (угол отгиба дефлектора 45° , $\bar{W} = 32,8$ м/с, $Re = 91530$, $\ell/d = 7,65$)

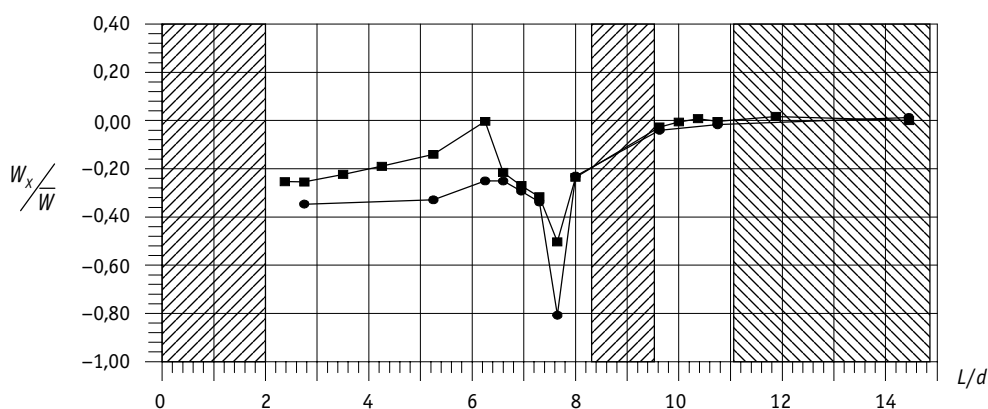


Рис. 5. Распределение относительной скорости W_x/\bar{W} за турбулизирующим дефлектором при углах отгибов дефлектора 30° и 45° ($\bar{W} = 32,8$ м/с, $Re = 91530$): ● дефлектор с углом отгиба 45° ; ■ дефлектор с углом отгиба 30°

ные течения, которые способствуют интенсивному перемешиванию теплоносителя непосредственно за перемешивающей решеткой.

2. Затухание конвективных возмущений, вызванных турбулизирующим дефлектором, происходит на расстоянии $\ell/d = 2 \div 3,5$ за перемешивающей решеткой (рис. 5).

3. Уменьшение угла отгиба турбулизирующего дефлектора с 45° до 30° приводит к уменьшению абсолютных величин максимальных поперечных составляющих скорости после дефлектора на 20–25% (рис. 6).

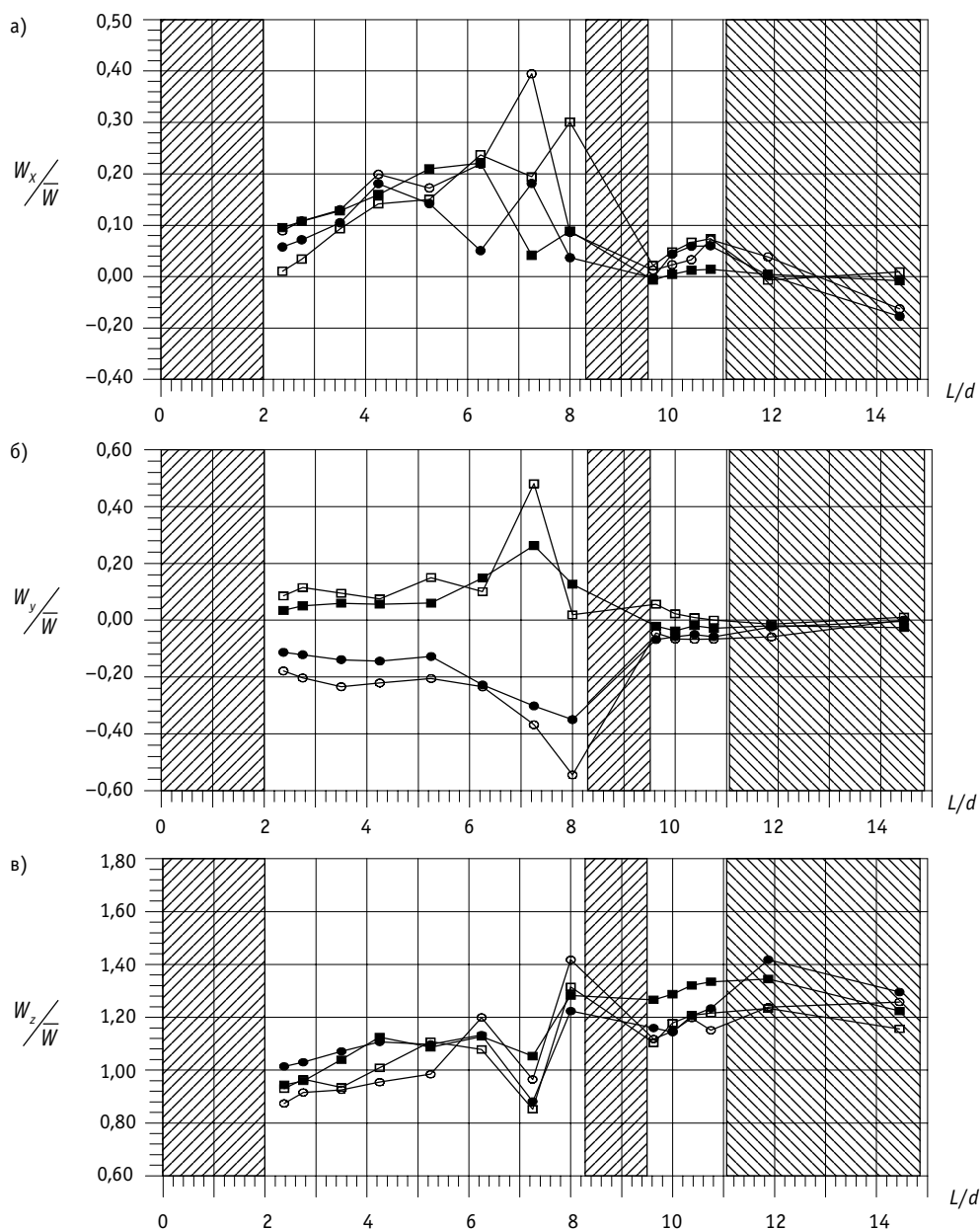


Рис. 6. Распределение относительных скоростей W_x/W , W_y/W и W_z/W для зон №17 и №18 при углах отгиба

дефлектора 30° и 45° ($\bar{W} = 32,8$ м/с, $Re = 91530$): ● зона № 17, угол отгиба 30° ; ■ зона № 18, угол отгиба 30° ; ○ зона № 17, угол отгиба 45° ; □ зона № 18, угол отгиба 45°

4. Направление конвективных течений после перемешивающей решетки полностью определяется направлением и величиной угла отгиба дефлекторов перемешивающей решетки пояса ДР.

5. В областях, где отсутствуют турбулизирующие дефлекторы, поток теплоносителя носит осевой характер. К таким областям можно отнести течение теплоносителя в районе направляющего канала (рис. 7) и в межкассетном зазоре (рис. 8).

6. Экспериментально доказано, что уменьшение величины угла отгиба турбулизирующего дефлектора с 30 до 45° не приводит к изменению расхода теплоносителя через ячейки, прилежащие к направляющему каналу.

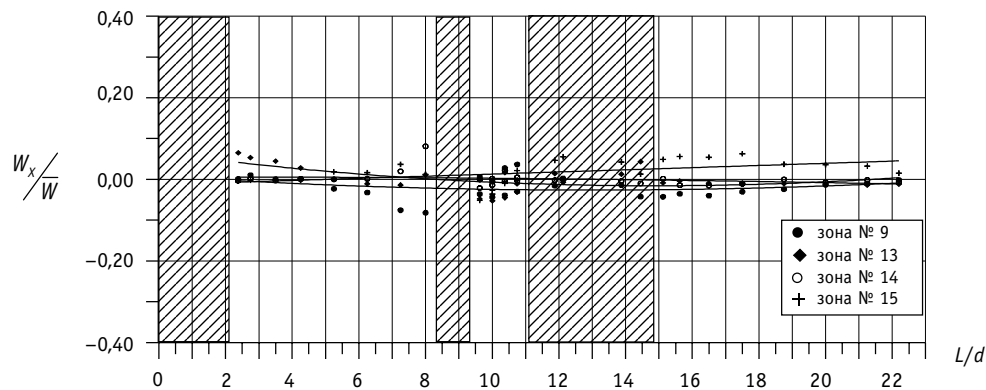


Рис. 7. Распределение относительной скорости W_x/W в районе направляющего канала при гидравлическом сопротивлении пояса ДР с перемешивающей решеткой с $\xi_{\text{ДР}} = 1,0$ ($\bar{W} = 32,8$ м/с, $Re = 91530$)

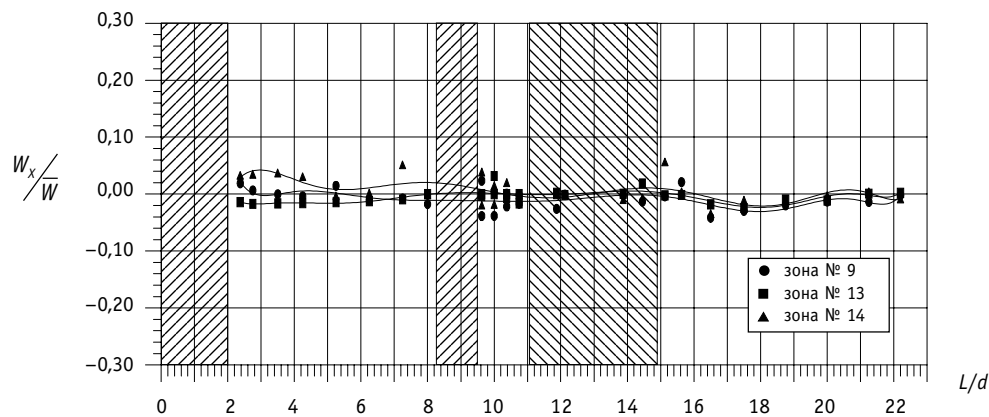


Рис. 8. Распределение относительной скорости W_x/W для межкассетного зазора при гидравлическом сопротивлении пояса ДР с перемешивающей решеткой $\xi_{\text{ДР}} = 1,0$ ($\bar{W} = 32,8$ м/с, $Re = 91530$)

7. Проведены экспериментальные исследования влияния турбулизирующих дефлекторов на локальные поля скорости по периметру твэлов ТВСА-Т.

8. Показано, что максимальная величина относительных поперечных скоростей около твэлов за дефлекторами с углами отгиба 30° не превышает 25% от среднерасходной скорости потока и быстро уменьшается с удалением от перемешивающей решетки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведены исследования и получены экспериментальные данные по локальным полям скорости в районе перемешивающей решетки пояса ДР с углами отгиба дефлекторов 30 и 45° и по периметру твэлов ТВСА-Т реактора ВВЭР-1000. Полученные экспериментальные данные позволили выявить особенности пространственно-турбулентного течения теплоносителя за перемешивающей решеткой пояса ДР ТВСА-Т.

2. Экспериментально исследованы поля скоростей в районе турбулизирующего дефлектора перемешивающей решетки. Показано, что величина поперечных составляющих абсолютной скорости может достигать 40–50% от среднерасходной скорости, что свидетельствует о наличии направленного конвективного течения теплоносителя за турбулизирующим дефлектором, которое способствует интенсивному перемешиванию теплоносителя непосредственно за перемешивающей решеткой.

3. Показано, что направление конвективных течений после перемешивающей решетки полностью определяется направлением и величиной угла отгиба дефлекторов перемешивающей решетки пояса ДР. В областях, где отсутствуют турбулизирующие дефлекторы, поток теплоносителя носит осевой характер.

4. Полученные результаты являются базой данных для уточнения гидродинамики потока теплоносителя ТВСА в целях уменьшения консерватизма при расчетах теплотехнической надежности активных зон с альтернативными ТВС с перемешивающими решетками.

Литература

1. *Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Легчанов М.А.* Особенности гидродинамики теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР-1000 при использовании смесительных и двойных дистанционирующих решеток/Труды 4-ой научно-технической конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск, 2005. – С. 96-97.
2. *Дмитриев С.М., Самойлов О.Б., Спиридонов Д.В., Хробостов А.Е.* Экспериментальное исследование локальных полей скорости в центральной и периферийной частях ТВС альтернативной конструкции реактора ВВЭР-1000/Труды Третьей Российской национальной конф. по теплообмену (в 8 томах). – Т.1. – М.: МЭИ, 2002. – С. 174-177.
3. *Сорокин Н.М., Самойлов О.Б., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Легчанов М.А.* Особенности гидродинамики альтернативных ТВС ВВЭР-1000 в районе направляющих каналов различной конструкции//ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 2004. – Вып. 2. – С. 56-65.

Поступила в редакцию 21.08.2006