

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССОБМЕНА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВСА-АЛЬФА РЕАКТОРА ВВЭР

А.С. Балыбердин*, С.С. Бородин*, С.М. Дмитриев*, М.А. Легчанов*,
А.В. Львов*, О.Ю. Новикова**, Д.Н. Солнцев*, В.Д. Сорокин*,
А.Е. Хробостов*

**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород*

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



Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локального массообмена и гидродинамики потока теплоносителя в ТВСА-АЛЬФА реакторов типа ВВЭР с системой поясов перемешивающих решеток типа «порядная прогонка».

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, межканальный массообмен, дистанционирующая и перемешивающая решетки.

Keywords: nuclear reactor, fuel assembly, hydrodynamics of heat carrier, mass exchange, spacer and mixing grids.

ВВЕДЕНИЕ

Уровень развития современного реакторостроения в значительной мере зависит от гидродинамики и массообмена теплоносителя в активной зоне ядерного реактора. Необходимость исследования процессов массообмена и гидродинамики определяется тем, что ядерные реакторы представляют собой высокоэнергонапряженные аппараты, в которых эти процессы проявляются в сложной форме. Успешная эксплуатация реакторных установок типа ВВЭР во многом определяется полнотой и надежностью гидродинамического и теплофизического обоснования активной зоны при различных режимах работы ЯЭУ.

С другой стороны, в настоящее время становится актуальным вопрос о создании реакторных установок ВВЭР, работающих на более высоком уровне мощности. Для этого требуется улучшение теплогидравлических характеристик ТВС, а также одновременное снижение сопротивления тепловыделяющих сборок. Данные характеристики во многом зависят от тепломассообменных процессов, происходящих в активных зонах водо-водяных реакторов.

В разработанной в ОАО «ОКБМ АФРИКАНТОВ» ТВСА-АЛЬФА для интенсификации массообмена применяются перемешивающие решетки [1], позволяющие турбулизировать поток в пределах отдельных ячеек и улучшать перемешивание теплоносителя между ячейками.

© *А.С. Балыбердин, С.С. Бородин, С.М. Дмитриев, М.А. Легчанов, А.В. Львов,
О.Ю. Новикова, Д.Н. Солнцев, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов, 2010*

Одним из вариантов оптимизации конструкции ТВСА-АЛЬФА реактора ВВЭР является применение системы перемешивающих решеток типа «порядная прогонка», которые устанавливаются с поворотом каждой решетки относительно предыдущей на угол 60° по часовой стрелке, чем достигается изменение направления движения теплоносителя.

В связи со сложностью математического описания течения потока теплоносителя в активных зонах ядерных реакторов необходимо проведение экспериментальных исследований на масштабных и полноразмерных моделях [2].

С одной стороны, для обоснования теплотехнической надежности активных зон РУ типа ВВЭР с ТВСА с перемешивающими решетками необходимо определить влияние конструкции таких решеток на гидродинамику и массообмен теплоносителя. С другой стороны, для оптимальной конструкции перемешивающей решетки требуется поиск вариантов, обеспечивающих наиболее благоприятное сочетание таких параметров, как интенсивность перемешивания, гидравлические потери.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования локальных характеристик межъячеечного массообмена потока теплоносителя проводились на аэродинамическом экспериментальном стенде методом диффузии газового трассера на 57-стержневой модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР, включающей в себя сегменты трех топливных кассет ТВСА и межкассетное пространство. Экспериментальная модель (ЭМ) выполнена с коэффициентом геометрического подобия $K_r = 4,4$ и состоит из шестигранного чехла, твэлов-имитаторов, поясов дистанционирующих решеток, двух поясов перемешивающих решеток типа «порядная прогонка» (рис. 1).

Перемешивающие решетки (ПР) имеют турбулизирующие дефлекторы (рис. 2), которые улучшают перемешивание потока теплоносителя. Величина угла отгиба турбулизирующего дефлектора составляла 30° , а высота – 19,8 мм, что соответствует высоте 4,5 мм натурного дефлектора.

Исследование локальных характеристик межъячеечного массообмена потока теплоносителя в модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-АЛЬФА осуществлялось методом диффузии примесей (метод трассера), основанном на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции (краски, соли, газа и т.д.) [3].

Подвод трассера из газового баллона осуществлялся через запорную и регулируемую арматуру, расходомерное устройство и впускной зонд. Для равномерного распределения газа по сечению ячейки предусмотрены короткие Г-образные

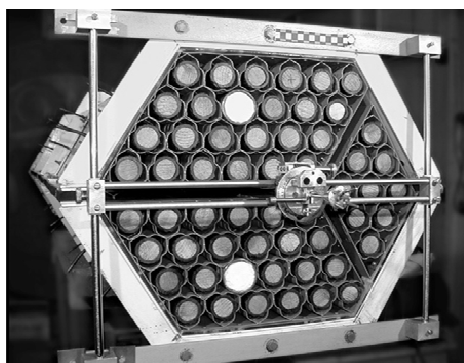


Рис. 1. Экспериментальная модель

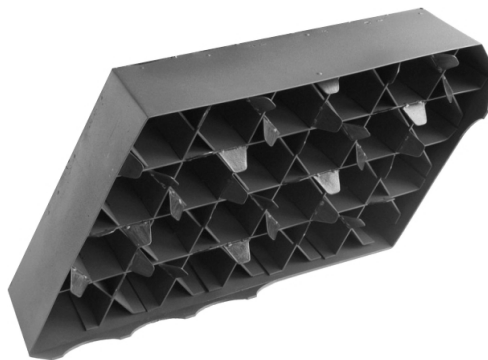


Рис. 2. Фрагмент пояса перемешивающей решетки

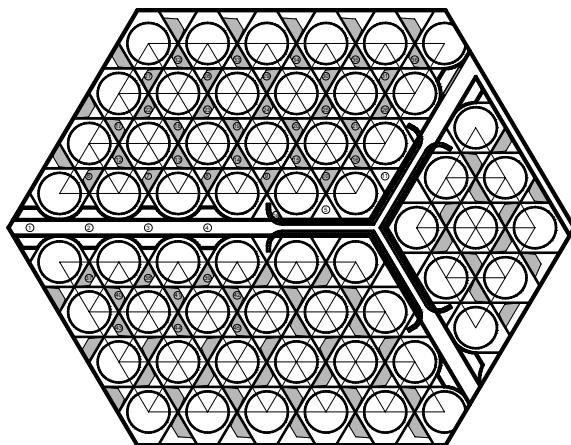


Рис. 3. Расположение зон измерения в поперечном сечении ЭМ

штуцеры, на выходе из которых установлены специальные рассеивающие насадки. Для отбора проб трассера использовался зонд, выполненный в виде трубки Пито-Прандл, позволяющий определять значения осевой скорости, статического и полного давлений в исследуемой точке и одновременно выполнять функцию транспортного газопровода для подачи трассера в газоанализатор.

Для определения коэффициента межканального массообмена в ЭМ за второй перемешивающей решеткой типа «порядная прогонка» газоанализатором измерялась концентрация пропанового трассера в характерных зонах по сечению модели (рис. 3). Исследования проводились для трех характерных вариантов подачи трассера: стандартная область, уголковая область и область межкассетного зазора (подача трассера в зоны №22, №20 и №3 соответственно).

Для обоснования представительности экспериментальных исследований гидродинамических характеристик модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-АЛЬФА необходимо соблюдение равенства местного гидравлического со-

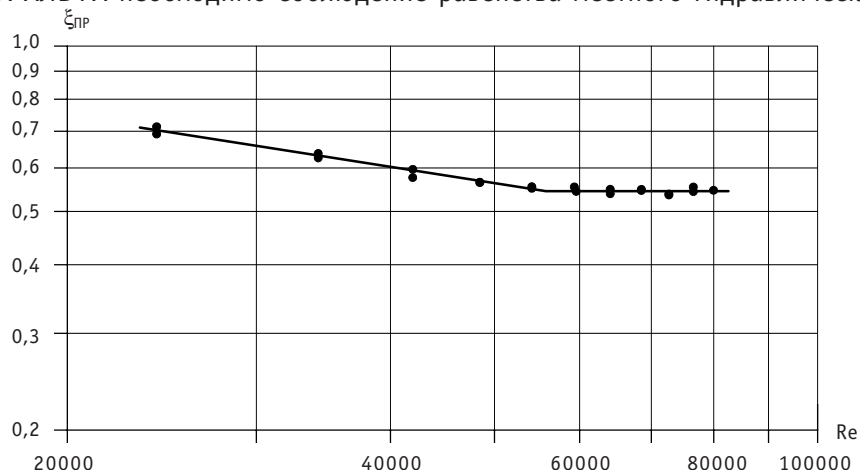


Рис. 4. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления пояса ПР типа «порядная прогонка» от числа Re

противления натурных перемешивающих решеток ТВСА-АЛЬФА и перемешивающих решеток экспериментальной модели. Коэффициент гидравлического сопротивления перемешивающей решетки ЭМ составил $\xi_{\text{ПР}} = 0,54$ (рис. 4). Полученное значение соответствует гидравлическому сопротивлению натурных ПР.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТРАССЕРА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ФРАГМЕНТА АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВВЭР С ТВСА-АЛЬФА ПРИ ПОСТАНОВКЕ СИСТЕМЫ ДВУХ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ РЕШЕТОК ТИПА «ПОРЯДНАЯ ПРОГОНКА»

Все экспериментальные исследования проводились в диапазоне чисел Re от 80000 до 100000 на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя, что подтверждено соответствующими исследованиями. По полученным данным строились графики зависимости концентрации трассера от относительной координаты по длине экспериментальной модели, а также картограммы распределения концентрации трассера в поперечном сечении ЭМ.

Комплексный анализ результатов исследований изменения концентрации трассера по длине экспериментальной модели для характерных зон ТВСА-АЛЬФА позволил заключить следующее.

1. В стандартной области
 - распространение трассера из ячейки инъекции обусловлено ориентацией турбулизирующих дефлекторов (рис. 5);
 - распространение пропана из верхнего сегмента ЭМ (при подаче в ячейку №22) охватывает помимо стандартной область межкассетного зазора и первый ряд нижнего сегмента экспериментальной модели (рис. 6).
2. В уголовой области
 - при подаче пропана в ячейку №20 происходит интенсивное перемешивание трассера, что вызывает отсутствие застойных зон в данной области (рис. 7);
 - концентрация трассера по направлению турбулизирующих дефлекторов остается постоянной, это связано с тем, что за вторым поясом ПР трассер уже «до-

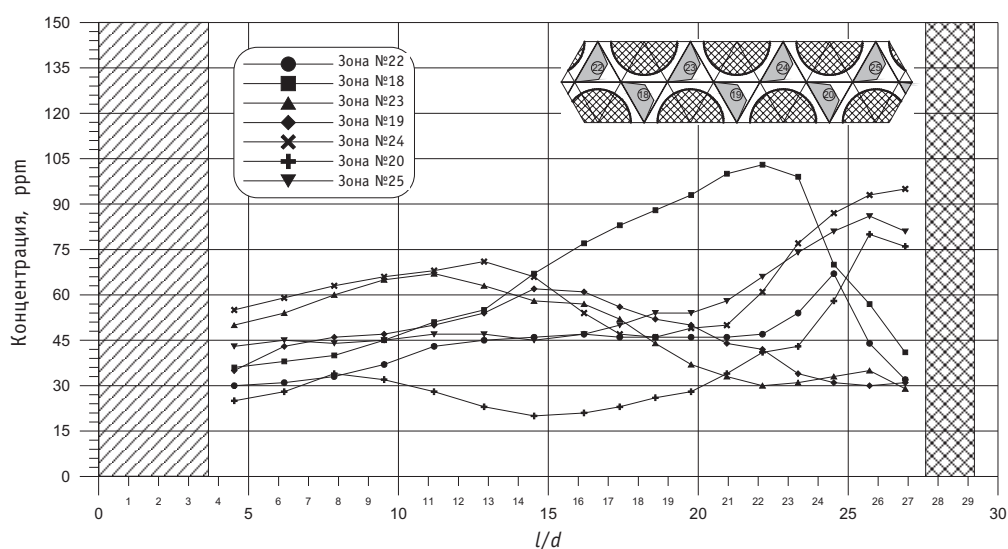


Рис. 5. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели для характерных зон за вторым поясом перемешивающих решеток типа «порядная прогонка» при подаче трассера в стандартную область

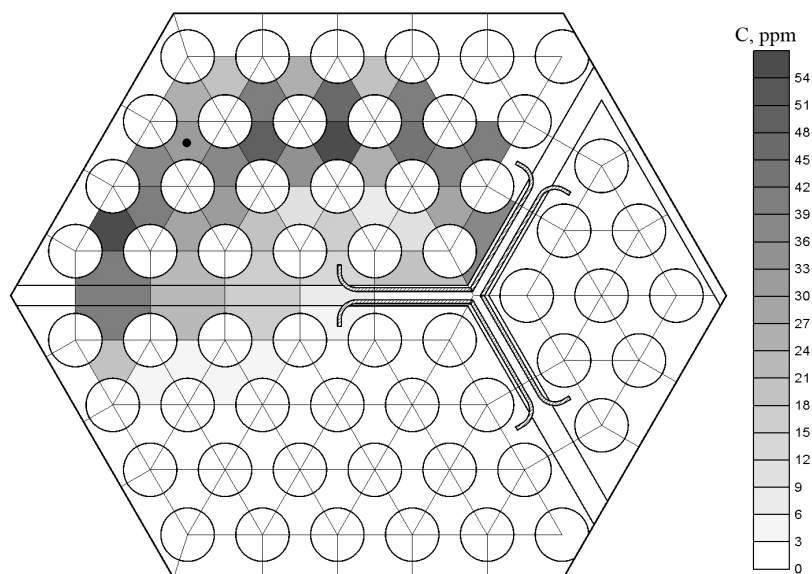


Рис. 6. Распределение концентраций трассера в выходном сечении ЭМ при подаче трассера в стандартную область

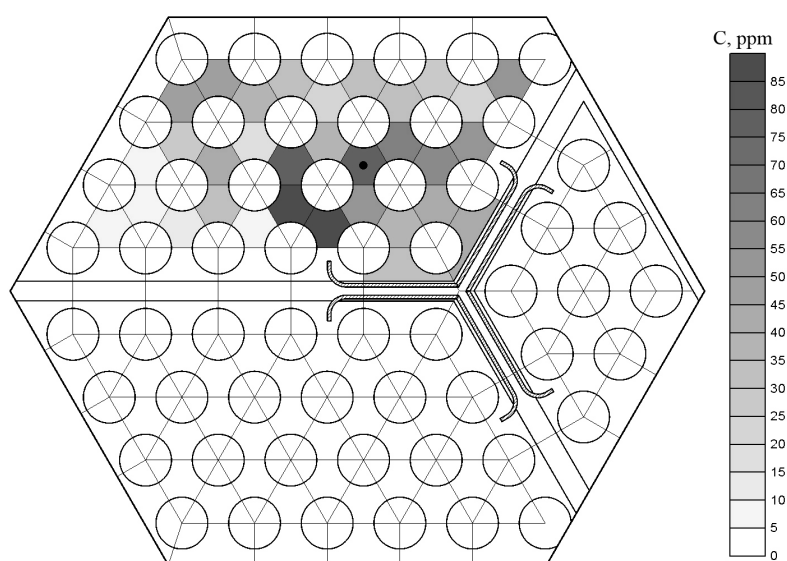


Рис. 7. Распределение концентраций трассера в выходном сечении ЭМ при подаче трассера в угловую область

статочно хорошо перемешан» по сечению ЭМ первым поясом ПР (рис. 8).

3. В межкассетном зазоре

- при подаче пропана в ячейку №3 в данной зоне наблюдается максимальное значение его концентрации по всей длине ЭМ (рис. 9);
- существует направленное течение потока теплоносителя, обусловленное расположением обода в виде «кремлевской стены», и направление лопаток турбулизирующих дефлекторов. Глубина распространения газа трассера из межкассетного зазора охватывает область трех периферийных рядов твэлов соседних ТВСА-АЛЬФА (рис. 10).

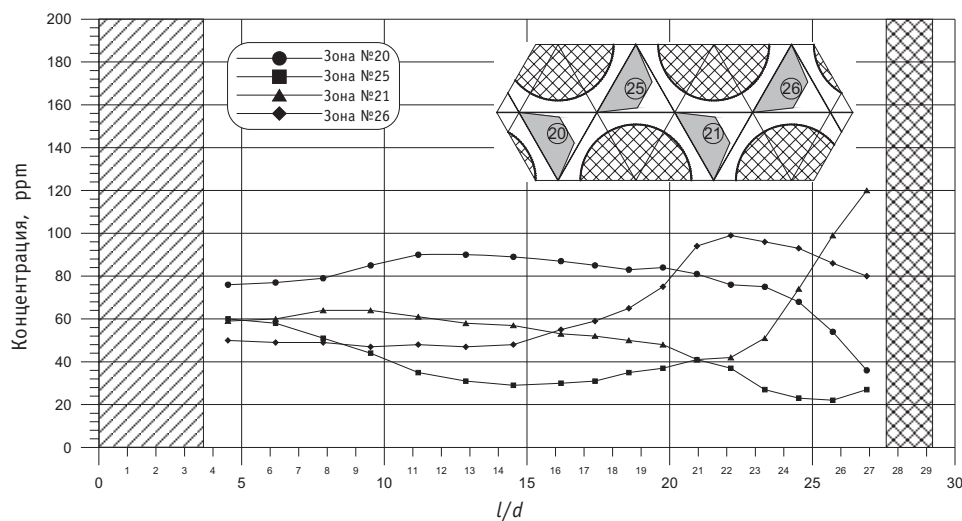


Рис. 8. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели для характерных зон за вторым поясом перемешивающих решеток типа «порядная прогонка» при подаче трассера в уголковую область

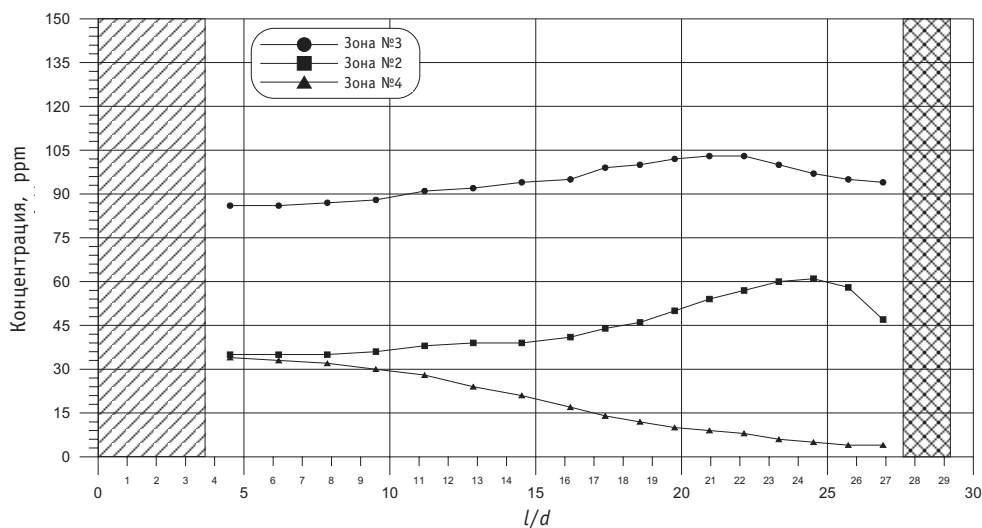


Рис. 9. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели для характерных зон за вторым поясом перемешивающих решеток типа «порядная прогонка» при подаче трассера в область межкассетного зазора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании комплексного анализа экспериментальных данных по исследованию гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР при постановке системы двух перемешивающих решеток типа «порядная прогонка» сделаны следующие выводы.

1. Показано, что после двух перемешивающих решеток типа «порядная прогонка» происходит более равномерное распределение концентрации пропана в поперечном сечении экспериментальной модели по сравнению с постановкой ПР типа «закрутка вокруг твэла».

2. Показано, что за дефлекторами перемешивающей решетки происходит направленное постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов.

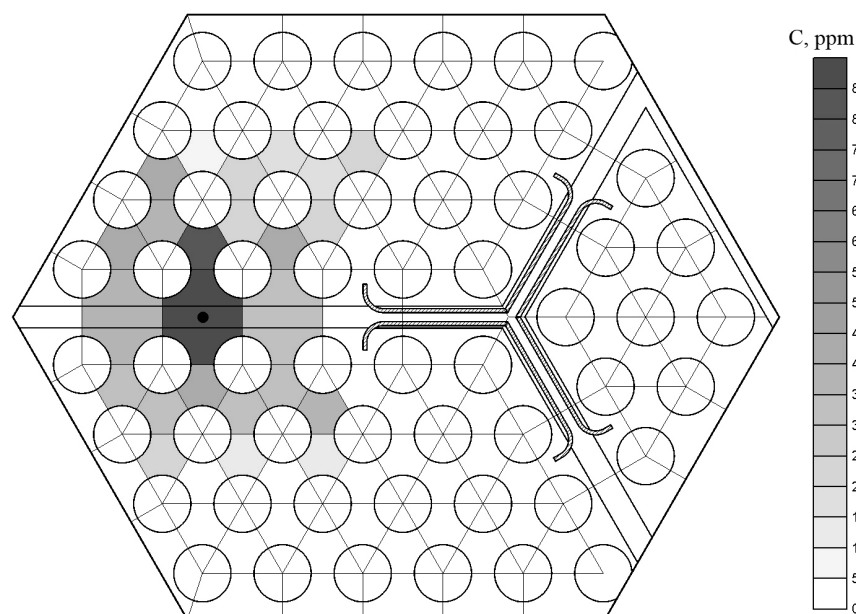


Рис. 10. Распределение концентраций трассера в выходном сечении ЭМ при подаче трассера в область межкассетного зазора

3. Экспериментально определено, что в уголкового области происходит равномерное распределение трассера за двумя перемешивающими решетками типа «порядная прогонка».

4. Глубина распространения газа трассера из межкассетного зазора охватывает область трех периферийных рядов твэлов соседних ТВСА-АЛЬФА с двумя перемешивающими решетками типа «порядная прогонка». Этот факт показывает лучшее перемешивание потока теплоносителя при постановке в ТВСА-АЛЬФА системы двух решеток типа «порядная прогонка» по сравнению с постановкой одной ПР типа «закрутка вокруг твэла» или «порядная прогонка».

Полученные результаты могут быть использованы в качестве банка экспериментальных данных для верификации программ поочередного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов с ТВСА-АЛЬФА. По экспериментальным данным определяется эффективность перемешивающих решеток, находятся коэффициенты турбулентного и эффективного (включая конвективный) межъячеечного массообмена.

Литература

1. Молчанов В.Л., Панюшкин А.К., Железняк В.М., Самойлов О.Б., Кууль В.С., Курылев В.И. Итоги создания и дальнейшего совершенствования ТВС альтернативной конструкции для реактора ВВЭР-1000/Сб. докл. Международной конференции «Атомные электростанции на пороге XXI века». – Электросталь, 2000. – С. 412-428.
2. Бородин С.С., Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Хробостов А.Е., Самойлов О.Б., Сорокин Н.М. Особенности гидродинамики теплоносителя в альтернативных ТВС реакторов ВВЭР-1000 при использовании перемешивающих решеток // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2006. – №4.
3. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: Теоретические основы и физика процесса. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 184 с.

Поступила в редакцию 10.12.2009

The results of statistic analysis of the radiation monitoring data of river system pollution were produced in this work. There was short description of analyzable data and under consideration territory in it. The distribution-free statistic methods, used for comparative analysis, were described. Reasons of their selection and application peculiarities were given. Also the comparative analysis of data by traditional method of normal statistics was given in this work. Reliable decrease of ^{90}Sr specific activity from object to object was determined in studied river system. This is evidence of this radionuclide transportation in the river system Tcha-Iset-Tobol-Irtysh.

УДК 621.039.534

Features of Hydrodynamics and Mass Exchange of the Heat-Carrier in Alternative Fuel Assembly of VVER \ A.S. Balyberdin, S.S. Borodin, S.M. Dmitriev, A.E. Khrobostov, M.A. Legchanov, A.V. Lvov, O.Y. Novikova, D.N. Solncev, V.D. Sorokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 10 illustrations. – References, 3 titles.

The results and analysis of experimental data on investigation of the local mass-transfer and hydrodynamics of heat-transfer flow in alternative fuel assembly of reactor VVER at use of system of mixing grids «flowing along the rod lines» type are submitted.

УДК 621.039.56

Research of vibrations of the main vapor conductors of the first power unit of the Volgodonsk Nuclear Power Plant \ I. Veselova, M. Okulova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 2 tables, 8 illustrations. – References, 6 titles.

Authors consider a problem of operational vibrations of the main vapor conductors of power units of the Nuclear Power Plant of the unified series with PWR-1000 (Pressurized water reactor). For the first time it has arisen in the course of starting-up and adjustment works at stages development of capacity of the power unit № 1 Zaporozhye Nuclear Power Plant also it has remained actual for all subsequent blocks of this series, including for power units № 1 of Volgodonsks Nuclear Power Plant.

The fixed raised vibrations of system of vapor conductors of fresh steam led to various damages (to occurrence of fistulas, breakage of auxiliary pipelines brace of armatures, to maladjustment of trailer switches, slipping of control cargoes on pulse safety valves, etc.), and also caused repeated decrease in cyclic durability of the main steam lines and increase of probability of their fatigue failure.

By measurements it is proved, that a source of operational vibrations are pressure pulsations in steam lines which are available in each steam line. The data received by experimental on the Volgodonsks NPP, well correlate with the data received by settlement methods on the basis of inspections of pipelines of Nuclear Power Plant "Timelin". The received experimental data have been taken as a principle the calculations executed by experts NICE «Centre Energy» and Institute of the applied mechanics of BRNO, within the limits of performance of works on decrease in level of operational vibrations of steam lines. Thus it is offered to change frequency of own fluctuations of loops of pipelines.

On the basis of the spent calculations it is offered to change geometry of two bringing pipelines to safety gates PG TX50S03 and TX50S04 as follows: to extend a pipeline shoulder to X50S03 against a stream on +1 m; to extend a pipeline shoulder to TX50S04 on a stream on +1,2m; to truncate a pipeline shoulder to TX50S04 against a stream on -1 m. The offered actions are realized on VNPP during time carrying out Starting Safety Works 2008.

Reconstruction of ring taps has led to considerable decrease in level of vibrations on drives and armature BRU-A and safety valves, that, undoubtedly, raises safety of operation of the nuclear power plant and increases a resource of work of the equipment.

УДК 621.311.25: 621.039

Use Combined-Cycle Technologies on the Nuclear Power Station \ A.V. Kryajev. A.M. Antonova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Higher