УДК 621.039

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Андреев В.В., Дмитриев С.М., Доронков Д.В., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, e-mail: nevid000@mail.ru

В статье представлены результаты исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР–1000 АЭС «Темелин». Изучение процессов течения теплоносителя в твэльном пучке ТВСА проводилось на аэродинамическом экспериментальном стенде. Для получения более детальной информации о гидродинамических характеристиках потока теплоносителя в качестве модели был выбран фрагмента активной зоны реактора ВВЭР–1000, состоящий из двух сегментов ТВСА–12 PLUS и одного сегмента ТВСА–Т с уголками жесткости и межкассетным пространством. Исследования гидродинамических характеристик теплоносителя заключались в измерении вектора скорости как в характерных областях ТВСА, так и в области межкассетного пространства с помощью пятиканального пневмометрического зонда. Анализ пространственного распределения проекций абсолютной скорости потока позволил детализировать картину обтекания дистанционирующих, перемешивающих и комбинированных дистанционирующих решеток ТВСА, определить области реализации максимального поперечного потока теплоносителя, глубину распространения возмущений и перераспредение расхода теплоносителя в смежных кассетах ТВСА. Результаты исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА используются в АО «ОКБМ Африкантов» для уточнения методики теплогидравлического расчета активных зон ядерных ректоров типа ВВЭР–1000 и включены в базу данных для верификации программ вычислительной гидродинамики (CFD кодов) и детального поячеечного расчета активной зоны реакторов ВВЭР–1000.

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, дистанционирующие и перемешивающие решетки, межкассетное взаимодействие, гидродинамика теплоносителя

RESEARCHES OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF COOLANT IN VVER-1000 REACTOR CORE

Andreev V.V., Dmitriev S.M., Doronkov D.V., Sorokin V.D., Khrobostov A.E.

The Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, e-mail: nevid000@mail.ru

Results of researches of interassembly interaction of coolant flow in VVER-1000 core of Atomic Power Station «Temelin». Study of coolant flow process in fuel element bundle FA has been carried out on an aerodynamic experimental rig. VVER-1000 core fragment which consists of FA-12 PLUS and FA-T with stiffening angles and interassembly gap has been chosen as a model to receive more detailed information on hydrodynamic characteristics of coolant flow. Investigations of hydrodynamic characteristics of coolant have been consisted in measuring coolant flow velocity vector as in characteristic zones areas of FA, as in interassembly gap by means of the five-channel pneumometric probe. An analysis of spatial distribution of absolute velocity flow projections allowed to specificate pattern (picture) of flow-past spacer and mixing grids and combined spacer grids of FA, to determine realization zones of maximum cross-flow of coolant, depth of disturbance passage and redistribution of coolant rate in neighboring assemblies of FA. Investigation results of interassembly interaction of coolant between neighboring FAs are used in Afrikantov OKBM JSC to specify methods of hydraulic design VVER-1000 cores and have been included in a data-base for verifying CFD codes (Computation Fluid Dynamics) and for detailed cell-wise calculation VVER-1000 reactor cores.

Keywords: core, FA, spacer and mixing grids, interassembly interaction, coolant hydrodynamics

Актуальной задачей для ГК «Росатом» является увеличение доли присутствия российских компаний на международном рынке. Укрепление позиций невозможно без совершенствования поставляемого оборудования, в том числе оптимизации конструкции тепловыделяющих сборок (ТВС).

Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова» (АО «ОКБМ Африкантов», Н. Новгород) осуществляет разработку и проектирование ТВС для реакторов типа ВВЭР, расположенных как в России, так и за ее пределами. Одним из партнеров предприятия является чешская АЭС «Темелин», активная зона первого блока которой эксплуатируется с полной загрузкой из ТВСА–Т. Конструкция ТВСА–Т характеризуется применением комбинированных дистанционирующих решеток (КДР), состоящих из ячейковой дистанционирующей решетки (ДР) и пластинчатой перемешивающей решетки (ПР) с размещением дефлекторов по схеме «закрутка».

В настоящее время произведена частичная замена ТВСА–Т на более совершенную ТВСА–12 PLUS, которая отличается оптимизированным размещением ДР и применением ПР с размещением дефлекторов по схеме «порядная прогонка» [1].

Поскольку оба типа ТВС являются бесчехловыми, перемешивание теплоносителя происходит не только в пределах одной кассеты, но и между соседними кассетами. Данное явление необходимо учитывать в процессе оценки и обоснования теплотехнической надежности активной зоны реактора ВВЭР, что обусловило необходимость проведения комплекса исследований межкассетного взаимодействия потока теплоносителя между соседними ТВСА [2].

Материалы и методы исследования

Экспериментальный стенд

Для исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР в НГТУ им. Р. Е. Алексеева был создан аэродинамический экспериментальный стенд, представляющий собой разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. В состав стенда входят вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель, расходомерное устройство, система подачи и отбора трассера, измерительный комплекс [3].

Во время работы стенда воздух посредством вентилятора высокого давления нагнетается в ресиверную емкость, далее проходит успокоительный участок и экспериментальную модель и выбрасывается в атмосферу. Исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя внутри трубного пучка экспериментальной модели заключались в измерении модуля вектора скорости, углов набегания потока и статического давления [4]. Изучение межъячеечного массообмена потока теплоносителя в экспериментальной модели проводилось с применением метода диффузии примесей [5]. Данный метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции. В качестве примеси выбран пропан, поскольку он обладает наиболее близкими к воздуху свойствами и возможностью достаточно точной регистрации его концентрации.

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВВЭР, включающий в себя сегменты кассет ТВСА–12 PLUS и ТВСА–Т с межкассетным пространством, она выполнена с соблюдением полного геометрического подобия.

Пояс перемешивающей решетки ТВСА–12 PLUS имеет турбулизирующие дефлекторы, расположенные по схеме «порядная прогонка». Пояс КДР ТВСА–Т снабжен турбулизирующими дефлекторами, расположенными по схеме «закрутка вокруг твэла».

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят газоанализатор, расходомер газа, ЭВМ с программным обеспечением, трубка Пито-Прандтля, пятиканальный пневмометрический зонд и блок аналоговых преобразователей давления.

Измерения концентрации углеводородов в газо–воздушной смеси осуществлялись газоанализатором посредством зонда, представляющего собой трубку Пито–Прандтля. Принцип работы газоанализатора основан на измерении величины поглощения инфракрасного излучения. Диапазон измеряемых концентраций 0–10000 миллионных долей, погрешности измерений с учетом индивидуальной градуировки равны ± 1,5 % (0–1000 миллионных долей) и ± 0,5 % (1000–10000 миллионных долей) [6].

Поддержание заданного расхода газа–трассера осуществлялось массовым расходомером, позволяющим регулировать потоки газов, погрешность измерения расхода газа составляла не более 0,5 %.

Измерение вектора скорости потока теплоносителя осуществлялось пятиканальным пневмометрическим зондом. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси x, y и z не превышали 7 % от абсолютной скорости.

Снятие показаний с пятиканального пневмометрического зонда производилось блоком аналоговых преобразователей давления. Предел допускаемой основной погрешности данных приборов составлял ± 0,25 %.

Обоснование представительности экспериментальных исследований

Важным этапом проведения экспериментальных исследований является подтверждение их представительности. Поскольку моделирование течения водяного теплоносителя осуществляется воздухом, то на основе теории подобия можно утверждать, что в области автомодельности профиль относительной скорости остается практически неизменным. Следовательно, проведение исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя на экспериментальной модели в зоне автомодельности позволит перенести результаты эксперимента на натурные условия течения теплоносителя в штатных активных зонах. Для этого был проведен ряд испытаний, направленных на определение режимов течения теплоносителя в экспериментальной модели и нахождение границ зон автомодельного течения теплоносителя. Согласно полученным результатам, область автомодельного течения в экспериментальной модели начинается при числе Рейнольдса 55 000, а все исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя проводились при числе Рейнольдса 80000 на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя. Были определены значения коэффициентов местного гидравлического сопротивления дистанционирующих, перемешивающих и комбинированных дистанционирующих решеток, которые соответствуют значениям сопротивлений аналогичных решеток штатных ТВСА. Также произведена оценка точности полученных опытных результатов исследований.

Методика проведения исследований

Исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА проводились на экспериментальной модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР, состоящего:

а) из двух сегментов ТВСА–12 PLUS и одного сегмента ТВСА–Т;

б) из трех сегментов ТВСА–12 PLUS.

Экспериментальные исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА–12 PLUS и ТВСА–Т заключались в измерении локальных полей скорости пятиканальным пневмометрическим зондом. Вектор скорости измерялся в характерной области межкассетного зазора экспериментальной модели с расположением поясов дистанционирующих, перемешивающих и комбинированных дистанционирующих решеток, соответствующем верхнему и нижнему фрагментам твэльного пучка штатных ТВСА.

Исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА–12 PLUS заключались в следующем:

1) газовый трассер через впускной зонд подавался в характерные ячейки области межкассетного зазора экспериментальной модели до пояса перемешивающей решетки по ходу течения потока теплоносителя;

2) с помощью отборного зонда производился замер концентрации трассера газоанализатором по центрам всех ячеек в характерных сечениях по длине экспериментальной модели.

3) на основе полученных данных строились картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от относительной координаты. По полученным данным была выявлена картина течения потока теплоносителя.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя в нижнем фрагменте твэльного пучка ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил сделать следующие выводы:

В области межкассетного пространства экспериментальной модели перед КДР ТВСА–Т поперечный поток движется в ТВСА–12 PLUS, а перед ДР ТВСА–12 PLUS наоборот. Значение поперечной составляющей вектора скорости $\left(W_y / \overline{W}\right)$ перед КДР и ДР соответствующих кассет одинаково и составляет 30 % от среднерасходной скорости (рис. 1).

В зазорах между твэлами, прилежащими к межкассетному пространству, реализуется максимальный на данном фрагменте твэльного пучка ТВСА поперечный поток теплоносителя. Поперечная составляющая вектора скорости $\left(W_y / \overline{W}\right)$ перед КДР и ДР составляет 40 % от среднерасходной скорости (рис. 2 а и б).

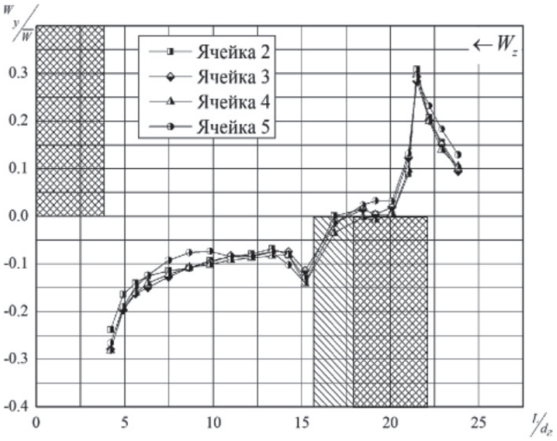
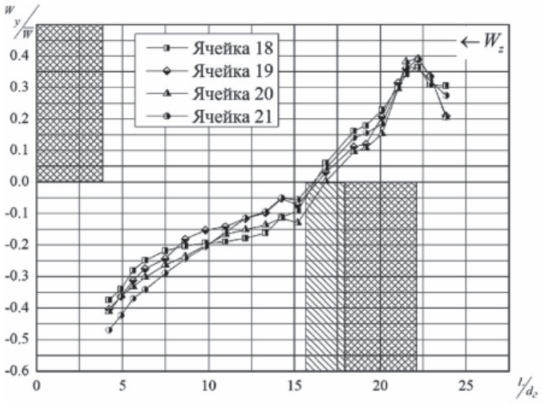
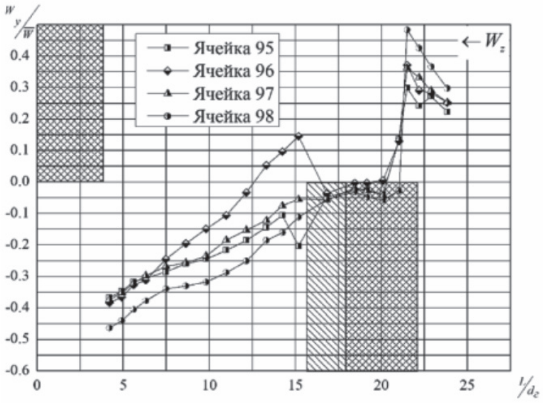


Рис. 1. Распределение относительной поперечной скорости в межкассетном пространстве



а)



б)

Рис. 2. Распределение относительной поперечной скорости в ряду твэлов, прилежащем к межкассетному пространству: а – ТВСА–12 PLUS; б – ТВСА–Т

Глубина распространения возмущений потока теплоносителя в кассетах ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS, вызванных обтеканием ДР и КДР, ограничивается твэлами четвертого ряда. Данный факт говорит о том, что интенсивное перераспределение потока между соседними сегментами кассет начинается уже на входе в твэльный пучок модели.

Результаты исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя в верхнем фрагменте твэльного пучка ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS

Основным отличием нижнего и верхнего фрагментов твэльных пучков ТВСА–12 PLUS и ТВСА–Т является применение в ТВСА–12 PLUS перемешивающей решетки, конструкция которой предусматривает два варианта расположения дефлекторов: дефлектор направлен в низ и дефлектор направлен в бок.

Анализ полученых экспериментальных данных позволил выявить влияние перемешивающей решетки на межкассетное взаимодействие теплоносителя.

Было установлено, что перед КДР ТВСА–Т поперечный поток движется в ТВСА–12 PLUS, а перед ПР и ДР ТВСА–12 PLUS наоборот в ТВСА–Т. Значение поперечной составляющей вектора скорости $\left(W_y / \overline{W}\right)$ в области межкассетного пространства перед КДР и ПР составляет 30% от среднерасходной скорости (рис. 3).

В областях межкассетного пространства, граничащих с ячейками ТВСА–12 PLUS, где дефлектор направлен вниз, значение поперечной составляющей вектора скорости $\left(W_y / \overline{W}\right)$ достигает 30% от среднерасходной скорости, а в областях, граничащих с ячейками, где дефлектор направлен в бок – 15% от среднерасходной скорости (рис. 3).

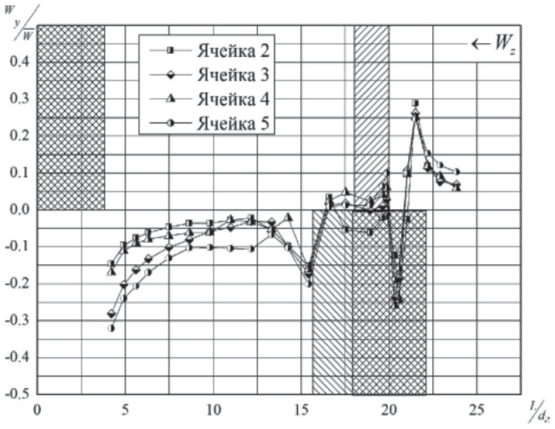
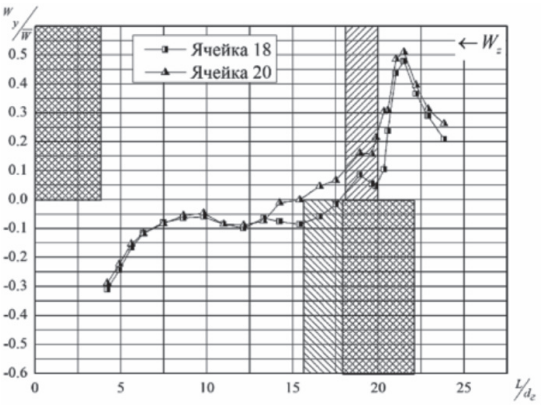


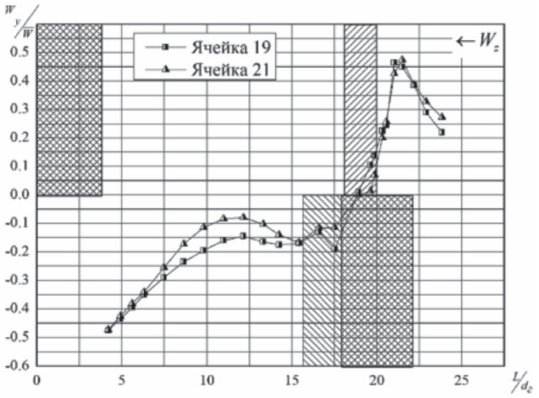
Рис. 3. Распределение относительной поперечной скорости в межкассетном пространстве

В зазорах между твэлами ТВСА–12 PLUS, прилежащими к межкассетному пространству, реализуется поперечный поток теплоносителя, который вызван обтеканием КДР ТВСА–Т. Значение поперечной составляющей вектора скорости $\left(W_y / \overline{W}\right)$ перед КДР составляет 50% от среднерасходной скорости (рис. 4, а и б).

На формирование потока теплоносителя за ПР ТВСА–12 PLUS, помимо поперечного потока, вызванного обтеканием ДР, оказывает влияние расположение дефлекторов ПР. В зазорах между твэлами ТВСА–12 PLUS, прилежащих к межкассетному пространству, где дефлектор направлен вниз, поперечная составляющая вектора скорости $\left(W_y / \overline{W}\right)$ составляет 50% от среднерасходной скорости, а в зазорах между твэлами, где дефлектор направлен в бок – 30% от среднерасходной скорости (рис. 4, а и б).



а)



б)

Рис. 4. Распределение относительной поперечной скорости в зазорах между твэлами ТВСА–12 PLUS, прилежащих к межкассетному пространству, где дефлектор направлен в низ (а) и в бок (б)

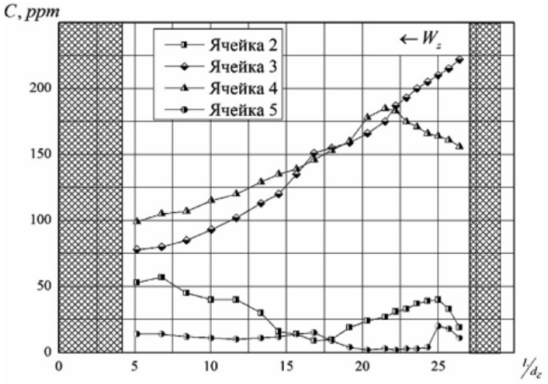
В зазорах между твэлами ТВСА–Т, прилежащими к межкассетному пространству, непосредственно перед КДР реализуется поперечный поток теплоносителя, движущийся в ТВСА–12 PLUS, а перед ДР ТВСА–12 PLUS наоборот в ТВСА–Т. Поперечная составляющая вектора скорости $\left(W_y / \overline{W}\right)$ перед КДР составляет 20% от среднерасходной скорости, а перед ДР – 30% от среднерасходной скорости.

Глубина распространения возмущений потока теплоносителя в ТВСА–12 PLUS и ТВСА–Т при обтекании КДР ограничивается четырьмя крайними рядами твэлов, а при обтекании ДР – третьим рядом твэлов каждой из кассет, что свидетельствует о ин-

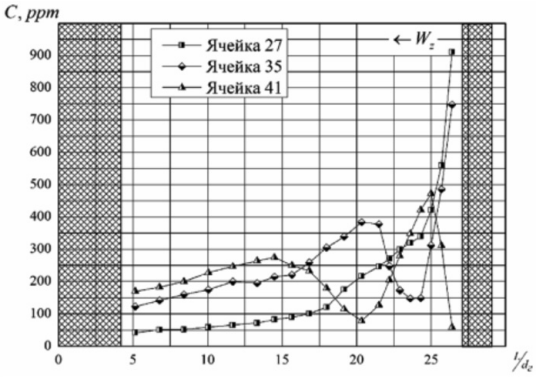
тенсивном межкассетном взаимодействие между соседними кассетами ТВСА.

Результаты исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА–12 PLUS

Комплексный анализ результатов экспериментальных исследований показал, что в области межкассетного зазора происходит вытеснение части потока теплоносителя из-под уголков жесткости (рис. 5, а), а в области ряда твэлов ТВСА–12 PLUS, прилежащего к межкассетному пространству, на движение потока теплоносителя помимо дефлекторов оказывают влияние зубчатые края обода ПР, которые организуют направленное внутрь кассеты движение потока теплоносителя (рис. 5, б).



а)



б)

Рис. 5. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели в межкассетном пространстве (а), и в ряду твэлов ТВСА–12 PLUS, прилегающем к межкассетному пространству (б)

Установлено, что перераспределение потока теплоносителя из межкассетного зазора в соседние ТВСА–12 PLUS и из кассеты ТВСА–12 PLUS в смежную кассету ограничивается двумя периферийными рядами твэлов. Данный факт говорит о том, что интенсивность межкассетного взаимодействия между соседними ТВСА–12 PLUS ниже, чем между ТВСА-Т и ТВСА-12 PLUS.

Конструкция ПР ТВСА–12 PLUS предусматривает два варианта взаимного расположения дефлектора и зубчатого края обода ПР, организующих течение потока теплоносителя: противоположное расположение и сонаправленное расположение.

Анализ распределения расходов теплоносителя позволил заключить, что в областях кассеты ТВСА–12 PLUS с противоположным расположением дефлектора и зубчатого края обода ПР расход теплоносителя уменьшается на 10%, а в областях с сонаправленным расположением дефлектора и зубчатого края обода ПР наблюдается увеличение расхода теплоносителя на 10%.

Выводы

Полученные экспериментальные данные позволили детализировать картину обтекания потоком теплоносителя дистанционирующих и перемешивающих решеток ТВСА и сделать следующие выводы:

1. Максимальное значение поперечной составляющей вектора скорости (около 40–50% от среднерасходной скорости) реализуется в зазорах между твэлами ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS, прилежащими к межкассетному пространству.

2. В области межкассетного пространства ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS значение поперечной составляющей вектора скорости не превышает 30% от среднерасходной скорости.

3. Распространение возмущений потока теплоносителя в ТВСА–Т и ТВСА–12 PLUS ограничивается четырьмя периферийными рядами твэлов, что говорит о высокой интенсивности перераспределения потока теплоносителя между соседними кассетами.

4. Уменьшение расхода теплоносителя на 10% наблюдается в областях кассеты ТВСА–12 PLUS с противоположным расположением дефлектора и зубчатого края обода ПР, а в областях с сонаправленным расположением дефлектора и зубчатого края обода ПР наблюдается увеличение расхода теплоносителя на 10%.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве базы данных для верификации CFD–кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 02. G25.31.0124 от 3 декабря 2014 г. в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

Список литературы

1. Бых О.А., Дмитриев С.М., Панов Ю.К., Сорокин Н.М., Зверев Д.Л., Фарафонов В.А. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник / – М.: Машиностроение. – 2013.

2. Баринов А.А., Бородина В.Е., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 2. – С. 98–108.

3. Бородин С.С., Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР // Атомная энергия. – 2012. – Т 113. – Вып. 5. – С. 252-257.

4. Варенцов А.В., Дмитриев С.М., Добров А.А., Доронков Д.В., Самойлов О.Б., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками // Теплоэнергетика. – 2014. – № 8. – С. 20–27.

5. Жуков А.В, Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: Теоретические основы и физика процесса. – М.: Энергоатомиздат. – 1989.

6. Бородин С.С., Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками // Тепловые процессы в технике. – Москва: Наука и Технологии. – 2013. – Т. 5. – Вып. 3. – С. 98–107.