

Аннотации статей  
журнала “Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов”,  
вып. № 2, 2016 г.

УДК 621.039.534.63:621.18

***Моделирование теплообменных процессов в парогенераторах реакторных установок со свинцово – висмутовым теплоносителем при межконтурных течах***

***А.А. Рогов***

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142100, г. Подольск Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21

***А.В. Дедуль***

ИТЦП «Прорыв», 115230, г. Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8

В статье представлены результаты моделирования теплообменных процессов, протекающих в парогенераторах реакторных установок со свинцово-висмутовым теплоносителем. Моделирование производилось с помощью программы TRIANA-6/Ver2.0 в неравновесном одномерном приближении двухкомпонентного движения теплоносителей свинец-висмут и вода.

*Ключевые слова:* свинец-висмут, парогенератор, межконтурная течь, теплообмен, TRIANA-6/Ver2.0.

УДК 621.039.58

***Оценка влияния зависимых отказов ОР СУЗ на вероятность выполнения системой аварийной защиты РУ ВВЭР функций аварийного останова***

***С.Г. Лаптев, А.Н. Козлачков***

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142100, г. Подольск Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21

В статье рассматривается возможность учета множественных зависимых отказов органов регулирования системы управления активной зоны (ОР СУЗ) при нестационарных режимах в РУ ВВЭР. Основная цель – анализ влияния отказов на параметры, определяющие безопасность реакторной установки. Исследование проведено на примере аварии с исходным событием «Разрыв паропровода». Данная оценка проведена путем сравнения результатов для двух случаев: отказы распределены по всей активной зоне с одинаковой вероятностью и сконцентрированы в прилегающем к аварийной петле секторе активной зоны. Второй вариант наиболее вероятен в случае зависимых отказов.

*Ключевые слова:* ВВЭР, реактор, множественный отказ, зависимый отказ, аварийная защита, разрыв паропровода.

УДК 620.178

**Статистическое моделирование реалистичной оценки радиационного охрупчивания корпусных материалов ВВЭР-1000**

**А.В. Дуб, В.Н. Скоробогатых, Н.П. Аносов, Л.Ю. Гордюк**

АО НПО «ЦНИИТМАШ», 115088, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4

**А.С. Зубченко**

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142100, г. Подольск Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21

**В.К. Шамардин**

АО ГНЦ «НИИАР», 433510, г. Димитровград-10 Ульяновской обл.

Реалистичная оценка сопротивления хрупкому разрушению корпусных материалов по результатам испытаний образцов-свидетелей основного металла и металла сварных швов корпусов ВВЭР-1000 гарантирует минимальный уровень консервативности  $T_k$  в границах полосы разброса данных. Предлагается аддитивная статистическая модель аппроксимирующей дозозависимости (ДВЗ)  $T_k = (T_{k0} + A_F \cdot F^n) + \delta T_k$  в виде верхней огибающей полосы разброса данных. Предложенная модель реалистично отражает процессы, протекающие в материалах ВВЭР-1000 при эксплуатации корпусов, изготовленных из стали 15Х2НМФА-А, несмотря на применение сдвиговых критериев, определяющих радиационное охрупчивание металла. Предлагаемая статистическая модель аппроксимирующей дозозависимости  $\Delta T_k = A_F \cdot F^n + \delta T_k$  не является линейной от аргумента  $F^n$ , так как коэффициент радиационного охрупчивания  $A_F$  не является константой и зависит от  $n$  - показателя степени флюенса (дозы)  $F(t)$ , который в свою очередь является линейной функцией времени облучения при эксплуатации корпусов ВВЭР-1000. Произведен анализ уровней консервативности параметров дозозависимостей  $\Delta T_k$  при моделировании радиационного охрупчивания корпусных материалов ВВЭР с учетом:

- показателя степени  $m$  в зависимости от  $T_{k0}$ ;
- соотношения  $\gamma$  нормативных и фактических значений  $A_F$ ;
- завышенных  $\delta T_{ка}$  относительно фактических запасов консервативности.

*Ключевые слова:* Сопротивление хрупкому разрушению, радиационное охрупчивание, образцы-свидетели, корпус ВВЭР.

УДК 621.039

**Дифференциальная методика оценки коэффициентов реактивности реактора ВВЭР с применением кодов КОРСАР/ГП и ТРАП-КС**

**М.А. Увакин, А.П. Демехин, Г.В. Алехин, В.В. Брюхин; А.Н. Устинов**

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21

Актуальной задачей, является подготовка стационарных состояний реакторной установки с ВВЭР для выполнения взаимосвязанных нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов динамических процессов. Показан способ оценки коэффициентов реактивности по температуре топлива и плотности теплоносителя на основе конечно-разностной аппроксимации. Разработанная модель базируется на структуре библиотеки макроскопических констант и принципах их параметризации по параметрам обратной связи. Методика применима для кодов связанного расчета КОРСАР/ГП и ТРАП-КС, использующих комплекс САПФИР\_95 для подготовки нейтронно-физических данных. Приведены результаты применения разработанной методики.

*Ключевые слова:* коэффициенты реактивности, код ТРАП-КС, код КОРСАР/ГП, параметры обратной связи, динамические процессы.

УДК 621.039

***Разработка вычислительной программы CORE\_1 моделирования деформирования всех ТВС в составе активной зоны***

***С.А. Кушманов, Д.Н. Пузанов, Д.В. Вьялицын***

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21

Рассматриваются особенности вычислительной программы CORE\_1, предназначенной для моделирования термомеханического поведения всех ТВС в составе активной зоны в режимах нормальной эксплуатации. Программа CORE\_1 позволяет выполнять расчет напряженно-деформированного состояния (расчет искривления ТВС, продольных усилий в твэлах и направляющих каналах (НК), моментов в контактных парах «НК-дистанционирующая решётка (ДР)» и «твэл-ДР» и определение реакций в опорах) для всех бесчехловых ТВС, составляющих активную зону, а также выполнять расчет межкассетных зазоров при воздействии на группу ТВС силовых и температурных нагрузок, характерных для режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации с учётом радиационного роста и ползучести конструкционных материалов, а также контактного взаимодействия соседних ТВС друг с другом и периферийных ТВС с выгородкой.

*Ключевые слова:* вычислительная программа, термомеханическое поведение ТВС, межкассетные зазоры.

УДК 621.039

***Кроссверификация модели поячеечного расчета ТВС кода ТИГРСП с применением CFD кода на примере 7-стержневой сборки***

***О.Е. Степанов, И.Ю. Галкин, М.М. Курносов, В.В. Королев, Н.А. Стребнев***

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21

Рассмотрена теплогидравлика течения теплоносителя в 7-стержневой сборке с параметрами, близкими к номинальным условиям в ТВС реактора ВВЭР-1000. Протестирована и верифицирована CFD-модель по экспериментальным данным и по эмпирическим корреляциям для определения гидравлического сопротивления, турбулентного поперечного перемешивания и теплообмена со стенкой. Выполнена кроссверификация кода ТИГРСП с результатами CFD-расчета по распределению массовой скорости по поперечному сечению 7-стержневой сборки. Результаты работы могут быть использованы для кроссверификации одномерных кодов и при разработке конструкции ТВС реакторов типа ВВЭР.

*Ключевые слова:* ТИГРСП, CFD, ТВС, ВВЭР, ядерный реактор, гидравлическое сопротивление, теплообмен.

УДК 620.178.3

***Виброисследование приводов СУЗ реакторной установки ВВЭР-1000/1200***

***В.У. Хайретдинов, А.Ю. Саратов, П.А. Вахрушев***

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21

Система управления и защиты (СУЗ) реакторной установки (РУ) ВВЭР-1000/1200 служит для управления реактором при его пуске, работе на мощности, а также при плановых и аварийных остановах. Комплекс, состоящий из блока перемещения и блока электромагнитов ШЭМ-3, датчика перемещения шагового (ДПШ), штанги, чехла, поглощающих стержней (ПС) СУЗ и направляющих каналов (НК) тепловыделяющих сборок (ТВС) образует канал регулирования реактивности (КРР), обеспечение работоспособности и функциональной надежности которого является важнейшим фактором, определяющим безопасность РУ ВВЭР-1000/1200. В обеспечение анализа вибрационного

поведения привода СУЗ проведены стендовые модальные исследования привода СУЗ ШЭМ-3, а также получены данные по эксплуатационной вибронгруженности с последующим диагностированием и моделированием различных вибросостояний объекта.

*Ключевые слова:* привод, кинематика, диагностирование, вибродинамика, вибросостояние, надежность, безопасность.

УДК 621.039.51

## ***Особенности нейтронно-физических характеристик интегрального реактора ВВЭР малой мощности***

***Г.Л.Пономаренко, Д.О.Веселов, Д.Н.Ермаков***

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21.

Анализируются нейтронно-физические характеристики (НФХ) стационарной топливной загрузки активной зоны интегрального реактора ВВЭР с малой мощностью 600 МВт (тепл.) и около 200 МВт (эл.), моделируемые по программе БИПР-7. Конструкторские решения по активной зоне и ТВС, а также регулирование реактора в основном аналогичны серийному реактору ВВЭР-1000, однако имеются существенные отличия в сравнении с ВВЭР-1000:

- в активной зоне размещаются 85 ТВС (163 в ВВЭР-1000) с активной длиной 250 см (355 см в ВВЭР-1000);

- используется 24-месячная кампания реактора и 48-месячная кампания топлива (в ВВЭР-1000 используется 12-18-месячная кампания реактора и 36-48-месячная кампания топлива);

- для снижения утечки нейтронов на периферии активной зоны размещаются выгоревшие ТВС с наименьшими размножающими свойствами, а также ТВС имеют аксиальные бланкеты с меньшим обогащением (в ВВЭР-1000 используется в меньшей степени или не используются);

- для управления реактором и обеспечения аварийной защиты (АЗ) в разных ТВС размещены чёрные, либо серые, либо составные чёрно-серые ОР СУЗ (в ВВЭР-1000 используются только чёрные ОР СУЗ для обеспечения АЗ);

- для компенсации запаса реактивности на выгорание топлива и для обеспечения подкритичности остановленного реактора в ТВС широко используются выгорающие поглотители (ВП) – 18-30 твэлов с 8% ест. Gd (твэги), а также серые и черные ОР СУЗ, и не используется растворённый бор в теплоносителе (в ВВЭР-1000 в основном используется растворённый бор в теплоносителе и в меньшей степени твэги);

- в условиях безборного регулирования, для обеспечения минимальных коэффициентов неравномерности энерговыделения в активной зоне подбирается оптимальное аксиальное профилирование обогащения ТВС и ВП в твэгах, а также аксиальное профилирование концентрации составных поглотителей в ОР СУЗ (в ВВЭР-1000 не используется).

Исследовались НФХ в процессе выгорания топлива в базовом режиме работы на номинальной мощности для варианта безборного регулирования. Они сравнивались с НФХ для варианта обычного борного регулирования. Для варианта безборного регулирования также анализировался режим суточного маневрирования в широком диапазоне изменения мощности 100-30-100% от номинальной мощности, и с использованием различных способов дополнительного температурного регулирования (режимы "P2=const", "t<sub>in</sub>=const", "t<sub>av</sub>=const"). В результате получены позитивные результаты, позволяющие сделать вывод об относительно несложной осуществимости интегрального реактора малой мощности по технологии ВВЭР в аспекте НФХ.

*Ключевые слова:* НФХ, борное и безборное регулирование, температурное регулирование, технология ВВЭР, базовый и маневренный режимы.

УДК 536: 621.039.51

## ***Моделирование теплофизических процессов в активной зоне водоохлаждаемого реактора***

***О.В. Семенович***

ГНУ «Объединённый институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси,  
220109, г. Минск, а/я 109, Беларусь

Рассмотрены некоторые аспекты математического моделирования термогидродинамических процессов в активной зоне водоохлаждаемого реактора. Представлена трёхполевая двухжидкостная субканальная модель и результаты её применения для исследования термогидродинамических процессов в твэльном пучке. Такая модель пригодна для исследования теплогидравлических процессов в ТВС во всех возможных режимах работы. Для численной реализации используется полуневьяная численная схема. Для дискретизации по пространственной (аксиальной) переменной используется “шахматная” сетка. Представлены результаты вычислительных экспериментов. Предложен вариант решения проблемы стыковки интеграции субканального и системного теплогидравлических кодов.

*Ключевые слова:* теплогидравлический расчёт стержневых сборок; субканальное приближение; трёхполевая двухжидкостная математическая модель.

УДК 621.039.586

## ***Стратегия удержания внутрикорпусного расплава для эксплуатируемых блоков с ВВЭР-1000***

***И. Ждарек, В. Кроунок, Д. Батек, С. Влчек, Дж. Уандрол***

Научно-исследовательский институт Ржеж, 25068, г. Гусинец, Чешская Республика

В статье приводится информация о состоянии дел в исследованиях института, направленных на подтверждение стратегии удержания внутрикорпусного расплава для эксплуатируемых блоков с ВВЭР-1000. Вначале описывается разработка маломасштабной экспериментальной установки и состояние проектных работ по разработке крупномасштабной экспериментальной установки THS-15. По результатам работ над маломасштабной экспериментальной установкой получена кривая критического теплового потока для чистой поверхности стали корпуса реактора и для поверхности с пористым покрытием, нанесенным методом «холодного распыления». Аналогичные испытания будут также проводиться на крупномасштабной экспериментальной установке, полностью воспроизводящей конфигурацию ВВЭР-1000.

*Ключевые слова:* Стратегия удержания внутрикорпусного расплава, охлаждение корпуса реактора, маломасштабная экспериментальная установка, крупномасштабная экспериментальная установка (THS-15), сварка взрывом, пористое покрытие методом холодного распыления, кривая критического теплового потока, результаты аналитических расчетов, реперные вычислительные расчеты JRC (Joint Research Center), HORIZON 2020, Европейский проект стратегии удержания внутрикорпусного расплава для эксплуатируемых и будущих АЭС.

УДК 621.039.519.22

***Экспериментальные исследования влияния перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» на гидродинамику потока теплоносителя в ТВСА реактора ВБЭР***

***С.М. Дмитриев, А.А. Добров, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов***

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д.24

Представлены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики теплоносителя за перемешивающей решеткой в ТВСА реактора ВБЭР. Исследования проводились моделированием течения потока в ТВСА на аэродинамическом стенде методом диффузии трассера при помощи пневмометрических зондов. Целью работы являлось определение влияния перемешивающей решетки на гидродинамические характеристики потока в области стандартных ячеек и в районе направляющего канала. По результатам проведенных исследований было получено распределение локальных полей скорости за дефлекторами перемешивающей решетки, распределение расходов теплоносителя и концентрации трассера по ячейкам экспериментальной модели. Полученные данные позволили определить закономерности и выявить особенности течения теплоносителя за перемешивающей решеткой ТВСА.

*Ключевые слова:* тепловыделяющая сборка, дистанционирующая и перемешивающие решетки, направляющий канал, гидродинамика, тепломассоперенос.

УДК 001.2: 621.18

***Расчетное моделирование экспериментов на однотрубной модели прямооточного парогенератора для РУ БН***

***Г.В. Лосевской, М.В. Смирнов***

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21

Представлена модель теплогидравлического расчета для однотрубной модели крупномодульного парогенератора по коду «КОРСАР/ГП» с подключенным программным модулем «ПГН-2К» для расчета тракта теплоносителя, а также результаты расчетного моделирования режимов стендовых испытаний однотрубной модели крупномодульного парогенератора и их сравнение с экспериментальными данными однотрубной модели с целью верификации программы теплогидравлического расчета парогенераторов с жидкометаллическим теплоносителем.

*Ключевые слова:* однотрубная модель, КОРСАР/ГП, ПГН-2К, парогенератор с натриевым теплоносителем, распределение температур, теплогидравлический код.

УДК 001.2

***К вопросу применения DDL-схем GQ3D-метода для расчета переноса ионизирующего излучения в сетках из произвольных гексаэдрических ячеек с неплоскими гранями***

***А.А. Николаев***

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, г. Подольск Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21

Представлен подход к применению DDL-схем GQ3D-метода для решения  $DS_N$ -уравнений на произвольных трехмерных гексаэдрических сетках с неплоскими гранями ячеек. Представлены численные результаты, демонстрирующие точность и эффективность данного подхода.

*Ключевые слова:*  $DS_N$ -метод, DDL-схемы, GQ3D-метод, произвольные гексаэдрические сетки, гексаэдры с неплоскими гранями.