

**Аннотации статей**  
**журнала “Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов”,**  
**вып. № 1, 2017 г.**

УДК 621.039.586

***Разработка методики оценки нагрузок на элементы корпуса реактора ВВЭР в ходе тяжёлой аварии с энергетическим взаимодействием расплава с теплоносителем***

***А.В. Николаева, В.В. Астахов, Д.Л. Гаспаров, С.И. Пантюшин, Н.В. Букин, М.А. Быков,***  
***Д.С. Вахлярский, Е.А. Фризен***

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

Безопасность атомной энергетики является ключевым фактором, определяющим ее конкурентоспособность по отношению к другим видам производства электроэнергии. При этом за последние 35 лет произошли три тяжелые аварии (ТА) на АЭС в разных странах. Это показывает, что вероятность ТА не является ничтожно малой и необходимо всестороннее изучение данного типа аварий. В ходе ТА может иметь место такое явление, как энергетическое взаимодействие расплава с теплоносителем (паровой взрыв), которое может угрожать целостности корпуса реактора и являться причиной водородного взрыва.

В рамках данного исследования на основе международного опыта и с учетом современного уровня знаний была разработана методика оценки нагрузок на элементы корпуса реактора РУ ВВЭР в ходе ТА с энергетическим взаимодействием расплава и теплоносителя, где ТА моделируется с применением РК СОКРАТ/В1 и расчетного модуля VAPEX-M, а энергетическое взаимодействие учитывается консервативно с применением полуэмпирических корреляций. На основе данной методики выполнен расчет нагрузок на элементы корпуса реактора ВВЭР-1200 для ряда определяющих сценариев ТА

*Ключевые слова:* энергетическое взаимодействие, расплав, теплоноситель, ТА, РУ, ВВЭР, нагрузки, СОКРАТ/В1

УДК 539.4

***Развитие и использование в практике проектирования методов расчетного обоснования прочности внутрикорпусных устройств реактора***

***В.В. Абрамов, В.В. Евдокименко, Л.А. Лякишев, М.А. Новгради, П.Г. Петкевич***

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

В статье представлены методические подходы, используемые в расчетном обосновании прочности при проектировании внутрикорпусных устройств реактора.

*Ключевые слова:* внутрикорпусные устройства.(ВКУ)

УДК 621.039

***Кроссверификация программы РОК2 на задаче с потерей охлаждения бассейна выдержки РУ ВВЭР-1000***

***Р.М. Следков, О.Е. Степанов***

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

При решении инженерных задач по обоснованию охлаждения тепловыделяющих сборок (ТВС) в бассейне выдержки (БВ) при исходном событии с потерей охлаждения БВ (и возможном наложении

течи из БВ) возникает необходимость в определении температур и времени достижения предельных температур твэлов ТВС, размещенных в БВ. Для этих целей разработана программа РОК2. Несмотря на широкое использование теплогидравлических системных кодов, в инженерной практике возникает необходимость в применении специализированных программ, позволяющих проводить большой объем вариантных расчетов. Выполнена кроссверификация программы РОК2 по результатам расчетов с использованием аттестованных системных кодов КОРСАР/ГП и RELAP5/mod.3.2 для случая потери охлаждения БВ реакторной установки ВВЭР-1000.

*Ключевые слова:* РОК2, БВ, ТВС, ВВЭР, кроссверификация, теплообмен.

УДК 539.4

### ***Аналитические результаты для коэффициента интенсивности напряжений в модели поднаплавочной трещины***

***В.В. Матковский, А.В. Андреев***

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

Одним из основных механизмов аварийного разрушения корпуса реактора ВВЭР является неустойчивый рост трещины. В расчетах на сопротивление хрупкому разрушению плакированных корпусов реакторов анализируется устойчивость постулируемых дефектов в форме поднаплавочной трещины.

На основе теории функций комплексной переменной построено сингулярное интегральное уравнение двумерной задачи о трещине конечной длины, выходящей под прямым углом на границу раздела материалов с различными упругими свойствами. Для коэффициента интенсивности напряжений получены явные в элементарных функциях зависимости от параметров задачи – отношения упругих модулей основного металла или металла сварного шва и наплавки, длины трещины, распределения напряжений вдоль линии трещины.

*Ключевые слова:* поднаплавочная трещина, коэффициент интенсивности напряжений, хрупкое разрушение, корпус реактора.

УДК 621.039.524

### ***Концептуальные предложения по водоохлаждаемому реактору со сверхкритическими параметрами (обзор зарубежных и российских разработок SCWR)***

***В.М.Махин, А.Н.Чуркин***

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

В настоящее время в России, США, Японии, Германии, Канаде, Китае и других странах выполнены или выполняются концептуальные проекты водоохлаждаемого реактора со сверхкритическими параметрами (SCWR), которые рассматриваются в данной обзорной работе. Более детально рассмотрены концепции корпусного и канального реакторов HPLWR и Canadian SCWR, разработка которых завершена за последние пять лет. Предлагается упрощение схемы энергоблока и его оборудования путем перехода на одноконтурную схему циркуляции теплоносителя со снижением капитальных затрат и эксплуатационных расходов. При указанном подходе и температуре теплоносителя на выходе из реактора 500-625°C снижение капитальных затрат на строительство энергоблоков с электрической мощностью 1000-1200 МВт оценивается в 20-40%. Рассматриваются реакторы с тепловым и быстрым, а также со смешанным спектром нейтронов в активной зоне, с различными схемами циркуляции теплоносителя.

*Ключевые слова:* водоохлаждаемый реактор, сверхкритические параметры, корпус

УДК 621.039.586

***Анализ чувствительности при моделировании тяжелых аварий  
с применением кода улучшенной оценки***

***Николаева А.В., Гаспаров Д.Л., Пантюшин С.И., Литышев А.В., Букин Н.В., Быков М.А.***  
АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142100, г. Подольск Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21

Стремительное развитие новых технологий расчётного обоснования безопасности АЭС, возможностей высокопроизводительных ЭВМ, ужесточение требований Ростехнадзора России и зарубежных заказчиков к обоснованию безопасности эксплуатируемых и проектируемых АЭС с РУ ВВЭР определяют необходимость развития отечественной расчётной методологии и средств анализа безопасности на качественно новом уровне.

В рамках данного исследования разработана методика выполнения анализа чувствительности для ключевых параметров тяжелых аварий (ТА) на АЭС с РУ ВВЭР с применением кода улучшенной оценки СОКРАТ/В1. С применением предложенной методики выполнен анализ чувствительности результатов моделирования аварии «Полное обесточивание АЭС» для РУ ВВЭР-1200. По результатам анализа определены параметры, оказывающие наибольшее влияние на ключевые параметры расчета.

*Ключевые слова:* Тяжелая авария, РУ, ВВЭР, СОКРАТ/В1, методика, анализ чувствительности

УДК 621.039.534

***CFD-моделирование динамики теплоносителя в верхней части  
экспериментального стенда В-200***

***Ю.С. Кругликов; А.В. Авдеенков; О.В. Супотницкая***  
АО «ГНЦ РФ-ФЭИ имени А.И. Лейпунского», 249033, г. Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1

В статье представлены результаты CFD-моделирования экспериментов, проведенных на стенде В-200 (ГНЦ РФ-ФЭИ) с водным теплоносителем для изучения процессов смешения струй теплоносителя разной температуры в верхней камере реактора баковой компоновки. По результатам моделирования и их сопоставления с экспериментальными данными сделаны выводы о характере течения, температурных пульсациях и их влиянии на оборудование. Проведена оценка возможностей и ресурсоемкости моделирования подобных явлений, предложены подходы к моделированию подобных явлений, а также экспериментальным исследованиям для его верификации.

*Ключевые слова:* CFD-моделирование, вычислительная гидродинамика, стенд В-200, РУ БН, конвекция, смешение теплоносителя, температурные пульсации.

УДК 620.17

***К вопросу о применении некоторых решений вариационной задачи  
в исследовании термонапряженного состояния тонких оболочек  
под действием локальных тепловых нагрузок***

***Л.И. Миронова***  
ФГБОУ ВО Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II  
(МИИТ), 129626, Москва, Кучин пер, 14

***А.С. Зубченко***  
АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142100, г. Подольск Московской обл., ул. Орджоникидзе, 21

В статье рассмотрена задача об определении температурных экстремалей в тонкой упругой цилиндрической оболочке при локальном осесимметричном нагреве, взятой за основу в расчетах оптимальных характерных параметров пространственных оболочечных конструкций. Формулируется

соответствующая вариационная задача и получены соотношения для определения экстремальной температурной нагрузки. Приведена математическая модель для исследования термонапряженного состояния в контуре пересечения двух сочлененных оболочек

Ключевые слова: локальный нагрев, температурное поле, термонапряженное состояние, цилиндрическая оболочка, температурные напряжения, сварное соединение

УДК 621.039.52

### ***Уточнение понятия границы устойчивости реактора ВК-50***

***Махин В.М.***

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

***Семидоцкий И.И., Орешин С.В.***

АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов»,  
433510, г. Димитровград-10 Ульяновской обл.

В практике эксплуатации корпусных кипящих реакторов широко используется понятие границы устойчивости: Значение этого понятия определяется тем, что выход за границу устойчивости, как правило, приводит к срабатыванию аварийной защиты по уровню мощности или скорости роста мощности. Причина срабатывания аварийной защиты - рост до недопустимых значений амплитуды флюктуаций нейтронного потока. По мере снижения рабочего давления корпусного кипящего реактора фактор устойчивости все больше влияет на выбор эксплуатационного предела по уровню мощности реактора. Поэтому при разработке проектов энергетических установок с пониженным рабочим давлением (например, атомных станций теплоснабжения, атомных ТЭЦ) необходимо иметь надежный расчетный инструментарий для прогнозирования запаса устойчивости их рабочих режимов. Опыт экспериментальных исследований устойчивости реактора ВК-50, также как и опыт эксплуатации этой установки на пониженном рабочем давлении показывает, что для создания соответствующего расчетного инструментария необходимо, прежде всего, уточнить сами понятия запаса устойчивости и границы устойчивости. Основания для такого пересмотра излагаются в данной работе.

*Ключевые слова:* реактор водяной кипящий, циркуляция естественная, корпус, флюктуации плотности нейтронного потока, устойчивость, нестабильность, передаточная функция, резонанс, автокорреляционная функция, инженерная граница устойчивости.

УДК 621.039.536.2

### ***Макетирование технологии отжига корпуса реактора ВВЭР-1000***

***Д.А.Кочетков, В.Я.Беркович, М.П.Никитенко, О.Е. Степанов,***

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

***Д.А. Журко, А.В. Алтынбаев, Д.Ю. Ерак,***

НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Курчатова, 1

Продление сроков эксплуатации атомных электростанций (АЭС) является актуальным вопросом в России и за рубежом. Блоки с ВВЭР-1000, пущенные в начале 80-х годов, вплотную подошли к проектному сроку службы. В первую очередь это относится к 1-му блоку Балаковской АЭС и к 1-му блоку Калининской АЭС. Главным конструктивным элементом энергоблока с ядерной энергетической установкой, определяющей его ресурс, является корпус реактора (КР). Отжиг КР является компенсирующим мероприятием для продления его срока эксплуатации. Продление срока службы большого количества КР ВВЭР-440 обеспечено реализацией восстановительного отжига облучаемого шва корпуса реактора. Для продления срока службы корпуса реактора блока 1 Балаковской АЭС также необходимо реализовать восстановительный отжиг облучаемых сварных швов КР. Конструктивные отличия КР ВВЭР-1000 от ВВЭР-440 и разница в химическом составе материалов этих типов корпусов реакторов не позволили применить разработанную для ВВЭР-440 технологию и оборудование для отжига КР ВВЭР-1000. В статье представлено обоснование

необходимости и конструктивные аспекты полномасштабного экспериментального стенда для макетирования и отладки технологии отжига металла КР ВВЭР-1000.

*Ключевые слова:* продление срока эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000, отжиг КР ВВЭР-1000, полномасштабный экспериментальный стенд отжига металла сварных швов КР.

УДК 621.039.534

***Экспериментальные исследования гидродинамики потока теплоносителя за дистанционирующей и перемешивающей решетками ТВСА–12PLUS реактора ВВЭР–1000***

***С.М. Дмитриев, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов, Сухарев Ю.П.***

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

В работе представлены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики и межъячеечного массообмена потока теплоносителя в активной зоне ядерного реактора ВВЭР с ТВСА–12PLUS. Цель работы заключалась в исследовании распределения локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока в тепловыделяющей сборке за перемешивающей и дистанционирующей решетками. Исследования проводились на аэродинамическом стенде методом диффузии трассера при помощи пневмометрических зондов. По результатам проведенных исследований было получено распределение аксиальных составляющих скорости по ячейкам, распределение концентрации трассера в экспериментальной модели. Полученные данные позволили детализировать и визуализировать картину течения теплоносителя за перемешивающей и дистанционирующей решетками ТВСА–12PLUS. Результаты исследований приняты для практического использования в АО «ОКБМ Африкантов» при оценке теплотехнической надежности активных зон реакторов ВВЭР–1000 с ТВСА–12PLUS.

*Ключевые слова:* тепловыделяющая сборка, дистанционирующая и перемешивающая решетки, гидродинамика, тепломассоперенос.

УДК 621.039.564

***Результаты применения метода наименьшей ошибки при восстановлении мощности РУ ВВЭР по показаниям блоков детектирования АКНП***

***Томилин А.А., Увакин М.А., Петкевич И.Г., Синегрибова А.И.***

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

***Семенов А.А.***

ЭНИКО ТСО (МИФИ), 115409, г. Москва, Каширское ш. д.31

Рассмотрены результаты моделирования с применением метода наименьшей ошибки при определении нейтронной мощности реактора с помощью внереакторных блоков детектирования аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) в аварийных режимах (без применения алгоритмов коррекции показания АКНП).

*Ключевые слова:* АКНП, блоки детектирования, метод наименьшей ошибки.

УДК 001.2

***Совершенствование геометрических опций SN-кода PMSNSYS-II***

***А.А Николаев***

АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, 142103, г. Подольск Московской обл., ул Орджоникидзе, 21

В  $S_N$ -программе PMSNSYS-II реализована LD-схема программы ODETTA решения уравнения переноса на неструктурированных тетраэдральных сетках. Выполнена верификация программной реализации и проведено исследование точности указанной численной схемы.

*Ключевые слова:*  $S_N$ -метод, PMSNSYS-II, ODETTA, ATTILA, LD-схема, произвольные тетраэдральные сетки.