

УДК 621.039.51

Исследование характеристик детекторов прямого заряда повышенной чувствительности

В.Ф. Шикалов, Л.В. Козлова, Л.О. Капитанова,

НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

В работе представлены результаты исследования характеристик детекторов прямого заряда (ДПЗ) повышенной чувствительности (ДПЧ) по определению их чувствительности к условной плотности потока нейтронов и к мощности поглощённой дозы (МПД) гамма-излучения ^{60}Co в метрологически аттестованных полях на исследовательских реакторах НИЦ “Курчатовский институт” ОР, ИР-8, критическом ядерном стенде “КВАНТ” и гамма-облучательной установке ГУТ-200М.

Ключевые слова: детектор прямого заряда (ДПЗ), характеристики, чувствительность, аттестованные поля нейтронного и гамма-излучения.

УДК 621.3.002

Экспериментальное исследование гамма-составляющей в сигнале родиевого ДПЗ

В.Н. Кочкин, А.Ю. Курченков, Е.Н. Познырев, Ю.М. Семченков,

НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Выполнено первичное комплексное экспериментальное исследование вклада реакторного гамма-излучения в полный сигнал ДПЗ с эмиттером из родия. Этот вклад оценивался сравнением сигналов родиевого ДПЗ и точно такого же ДПЗ с эмиттером из палладия, поскольку по электронно-фотонным свойствам палладий аналогичен родию, но в нём отсутствует бета-распад продуктов активации нейтронами, который является основной составляющей полезного сигнала родиевого ДПЗ. Первичные испытания по сравнению сигналов двух ДПЗ проводились на исследовательском реакторе ИР-8. Для подтверждения предположения о близости электронно-фотонных свойств родиевого и палладиевого ДПЗ выполнены специальные измерения на гамма-установке ГУТ200м.

Ключевые слова: детектор прямого заряда (ДПЗ), родий, палладий, система внутриреакторного контроля (СВРК).

УДК 621.3.002

**Детектор прямого заряда с эмиттером из металлического гафния
в реакторах ВВЭР**

А.Е. Калинушкин, А.Ю. Курченков, Д.С. Марков, И.А. Сергеев,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Исследуется детектор прямого заряда (ДПЗ) с нейтронно-чувствительным эмиттером из металлического гафния. ДПЗ был изготовлен в НИЦ “Курчатовский институт” и облучён на реакторе ИР-8 совместно с родиевыми ДПЗ. Показано, что в отличие от распространённого ДПЗ с эмиттером из окиси гафния этот ДПЗ даёт безынерционный сигнал всего на порядок меньше родиевого ДПЗ.

Ключевые слова: детектор прямого заряда, эмиттер из металлического гафния, система внутриреакторного контроля, система контроля нейтронного потока.

УДК 621.039

**Случайная составляющая погрешности калибровки внутриреакторных
термодатчиков ВВЭР**

А.С. Тимонин,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Приведены результаты анализа случайной погрешности калибровки установленных в ВВЭР внутриреакторных термопар. Показано, что с точки зрения метрологической надёжности одним из перспективных вариантов методики калибровки является вариант, основанный на сравнении показаний калибруемой термопары с температурой, которая определяется с помощью суммы показаний петлевых термометров сопротивления, взвешенных с коэффициентами влияния каждой петли на калибруемую термопару. Коэффициенты влияния могут быть определены на основе корреляционных связей, обусловленных теплогидравлическими особенностями циркуляции теплоносителя в главном циркуляционном контуре.

Ключевые слова: ВВЭР, термопара, термометр сопротивления, калибровка.

УДК 621.039.51

Результаты расчётного моделирования измерений эффективности аварийной защиты, проведённых на этапе пуска 2-й и 3-й топливных кампаний энергоблока № 6 Нововоронежской АЭС

Н.М. Жылмаганбетов, А.И. Попыкин, А.А. Смирнова, Н.А. Старова,
Федеральное бюджетное учреждение “Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности”, 107140, Москва, Малая Красносельская ул., д. 2/8, стр. 5,
Л.В. Кряквин, М.О. Денисова,
АО “Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций”, 109507, Москва, Ферганская ул., д. 25

В статье приводятся результаты расчётного моделирования измерений эффективности аварийной защиты реактора ВВЭР-1200 в начале 2-й и 3-й топливных кампаний энергоблока № 6 Нововоронежской АЭС. Расчётное моделирование измерений эффективности аварийной защиты для частично выгоревшей активной зоны проводилось по ранее разработанной в ФБУ “НТЦ ЯРБ” методике, успешно применяемой для этапа физического пуска энергоблоков атомных станций с реакторами ВВЭР. Продемонстрирована её применимость для проведения указанных расчётов с учётом выгорания топлива как при экспертизе обоснования безопасности, так и при экспертизе программ для ЭВМ. В статье представлены сравнения значений рассчитанных и измеренных токов ионизационных камер и рассчитанных по ним показаний реактиметра при измерении эффективности аварийной защиты.

Ключевые слова: ВВЭР, выгорание, реактивность, измерение реактивности, расчётное моделирование измерений, энергоблок № 6 Нововоронежской АЭС.

УДК 621.039

Методика гомогенизации групповых нейтронно-физических констант с учётом гетерогенных и кинетических эффектов

В.Н. Васекин, П.А. Фомиченко,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Приведено описание методики учёта гетерогенных и кинетических эффектов при подготовке гомогенизированных групповых нейтронно-физических констант для диффузионной модели. Представлены результаты применения предлагаемой методики для реактора на быстрых нейтронах типа БРЕСТ-ОД-300. Показано, что учёт гетерогенных и кинетических эффектов при гомогенизации повышает точность расчёта интегральных параметров и распределённых характеристик, важных для безопасности.

Ключевые слова: методика гомогенизации, гетерогенные эффекты, кинетические эффекты, нейтронно-физические константы.

УДК 621.039.52

**Методика учёта влияния нейтронного поля на эффекты реактивности
в инженерных расчётах**

Д.Г. Кресов, Е.В. Оленская,

АО “ОКБМ Африкантов”, 603074, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, д. 15

В интересах повышения точности инженерных расчётов при проектировании судовых реакторных установок повышенного энергоресурса, характеризующихся значительными величинами коэффициентов реактивности по теплоносителю и аксиальных офсетов, выполнена предварительная проработка метода уточнения зависимости плотностного эффекта реактивности от характера распределения нейтронных полей. Отмечается необходимость валидации методики на базе сопоставления расчётных и экспериментальных естественных температурных зависимостей.

Ключевые слова: инженерные расчёты, эффект реактивности, аксиальный офсет, теория возмущений, естественная температурная зависимость.

УДК 539.125.525

**Влияние эффекта термализации на нейтронно-физические характеристики ТВС
реактора ВВЭР-СКД**

В.В. Колесов, В.В. Сеница, Я.А. Котов,

НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

При проведении нейтронно-физических расчётов водоохлаждаемых реакторов на сверхкритическом давлении ВВЭР-СКД возникает вопрос учёта эффекта термализации при рассеянии нейтронов на атомах водорода в составе водяного пара высокой плотности. Поскольку на рассеяние тепловых нейтронов существенное влияние оказывает наличие связей рассеивающих атомов, в работе предпринята попытка оценить влияние модели рассеяния на нейтронно-физические характеристики ТВС этих реакторов. Были рассмотрены две модели — модель свободного газа и модель с использованием закона рассеяния $S(\alpha, \beta)$, связывающего энергию и импульс нейтрона, рассеянного на водороде в составе молекулы воды. Необходимые для расчётов данные были получены на основе библиотек JEFF-3.3 и JEFF-3.1.1 с помощью процессинговых систем NJOY и GRUCON. Расчёты ячейки и ТВС ВВЭР-СКД проводились методом Монте-Карло по программе MCNP 5.3.120. Полученные в результате расчётов с использованием разных моделей рассеяния значения K_{∞} показали, что водородные связи начинают влиять на спектр нейтронов, начиная с плотности 0,5—0,6 г/см³ и выше, при этом влияние модели рассеяния на эффект термализации не превысило 0,2%.

Ключевые слова: ВВЭР-СКД, ячейка, ТВС, рассеяние тепловых нейтронов, модель свободного газа, рассеяние на связанных ядрах, термализация нейтронов.

УДК 621.039

Программный комплекс ПРИМ-АЭС для моделирования переходных режимов на энергоблоках с реакторами ВВЭР

Д.А. Горностаев, А.В. Будников, Е.Д. Сокурено, А.В. Фомин, А.С. Колокол,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Представлено описание программного комплекса ПРИМ-АЭС (программа-имитатор АЭС) для моделирования нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в переходных режимах на энергоблоках с реакторами ВВЭР. Комплекс включает в себя среду динамического моделирования для реализации сложных алгоритмов систем автоматического управления на базе САПР SimInTech и программу ТИГР-М для связанного нейтронно-физического и теплогидравлического расчёта режимов нормальной эксплуатации и аварийных режимов, являющуюся развитием программного комплекса ТИГР-1.

В статье описана модернизация теплогидравлического модуля программного комплекса ТИГР-1, выполненная с целью расширения области применения кода в объёме энергоблока. Разработана и представлена структура нового программно-расчётного комплекса с описанием составляющих его модулей, а также интерфейс обмена данными между ними.

Определены цели и задачи применения разработанного программного комплекса, позволяющего проводить оценку соответствующих критериев динамической устойчивости для стационарных режимов нормальной эксплуатации, переходных режимов нормальной эксплуатации, включая режимы маневрирования мощностью, режимов ограничения эксплуатации при нарушении условий безопасной эксплуатации и аварийных режимов второй категории с отказами основного оборудования.

Ключевые слова: энергоблок, стационарные и динамические переходные режимы, автоматизированная система управления технологическим процессом, модернизация расчётного кода, интеграция моделей, графический редактор, адаптация и анализ данных архивов СВБУ и СВРК, система автоматизированного проектирования GET-R1.

УДК 621.039

Численное моделирование потока жидкости и теплообмена при сверхкритических давлениях водяного теплоносителя для пучка стержней с проволочным дистанционированием

В.Ю. Куканов, А.А. Седов, П.С. Поляков,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

В данной работе для оценки эффективности кода ANSYS CFX 14.0 и получения свойств потока флюида был выбран один эксперимент по теплопередаче с использованием в качестве теплоносителя воды при сверхкритических давлениях: пучок стержней 2×2 с проволочным дистанционированием по всей длине. Было проведено трёхмерное CFD-исследование потока жидкости и теплообмена при сверхкритических давлениях для геометрии пучка стержней, ключевым параметром которого была температура внутренней стенки имитатора топливного стержня. Исследовано влияние на результаты моделей турбулентности SST, $k-\omega$, BSL, а также различных видов расчётной сетки для обеспечения надёжности предполагаемой температуры стенки. После проведённого исследования полученные данные по CFD-моделям были верифицированы на экспериментальных данных. Было обнаружено, что CFD-модель способна качественно описать температуры внутренних поверхностей стержней, о которых сообщалось в экспериментах.

Ключевые слова: водо-водяной реактор, сверхкритические параметры воды, топливная сборка, проволочное дистанционирование.

УДК 621.039.54

**Верификация математической модели термовязкоупругого поведения
цилиндрических тел**

А.С. Степанов, А.А. Седов,

НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

В статье представлена верификация математической модели термовязкоупругого поведения на аналитических тестах для полого цилиндра с днищами и без, а также сплошного цилиндра для упругого состояния и состояния установившейся ползучести.

Ключевые слова: верификация, термовязкоупругая модель, сплошной и полый цилиндр.

УДК 621.039.531

**Применение миниатюрных образцов на внецентренное растяжение для определения
трещиностойкости сталей корпусов реакторов ВВЭР-1000
в зоне вязко-хрупкого перехода**

А.П. Бандура, Д.Ю. Ерак, Д.А. Журко, М.Е. Коршунов, С.А. Бубякин,

НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

В статье представлены результаты испытаний миниатюрных образцов СТ-0,16 из материалов корпусов ВВЭР-1000 в исходном и облучённом состоянии, а также после тепловой выдержки, обработанных по методу мастер-кривой (ASTM E1921). Проведён сравнительный анализ полученных переходных температур T_0 и результатов, полученных ранее для стандартных образцов на трёхточечный изгиб PCV, который показал близость этих значений.

Проведена оценка неоднородности металла на основании проведённых испытаний согласно процедуре SINTAP, которая указывает на необходимость увеличения количества образцов СТ-0,16 в серии испытаний с целью корректного определения параметра T_0 .

Сделан вывод о перспективности использования образцов типа СТ-0,16 для определения вязкости разрушения корпусных сталей в условиях ограниченного объёма металла.

Ключевые слова: СТ-0,16, mini-СТ, вязкость разрушения, ВВЭР-1000.

УДК 621.039.53

Расчётно-экспериментальные предварительные оценки возможности применения высоконикелевых сталей для корпусов ВВЭР будущих поколений

Е.А. Кулешова,

НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,
НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31,

И.В. Федотов, С.П. Кузнецов,

НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

В работе представлены экспериментально-расчётные оценки возможности использования разработанных АО “НПО “ЦНИИТМАШ” корпусных сталей с повышенным содержанием Ni в качестве материалов корпусов перспективных реакторов с учётом их структурно-фазового состояния, механических характеристик, а также возможности изготовления обечайки с толщиной стенки, освоенной в промышленном производстве. Для повышения служебных характеристик потребовалось применение комплекса мер: изменение комплексного легирования сталей, металлургическая очистка от примесей (в первую очередь от фосфора), а также оптимизация размера зерна отливок. При расчёте были учтены предполагаемая рабочая температура, давление теплоносителя, категория прочности кандидатных сталей, их термическая и радиационная стойкость.

Ключевые слова: стали корпусов реакторов, концентрация Ni, механические свойства, предварительный расчёт применимости сталей.

УДК 541.15

Радиационно-химическая фиксация азота в водном растворе H_2 и N_2 под действием ускоренных протонов. Математическая модель и её верификация

С.А. Кабакчи,

НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,

О.П. Архипов,

АО “Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала”, 107140, Москва, ул. М. Красносельская, д. 2/8,

А.О. Верховская, М.Л. Лукашенко,

АО “Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций”, 109507, Москва, ул. Ферганская, 25

Представлена математическая модель радиационно-химического синтеза аммиака в водном растворе азота и водорода. Для верификации модели были использованы собственные, ранее не публиковавшиеся данные, полученные на стенде “Протока” [1]. В экспериментах на стенде в качестве имитатора излучения ядерного реактора использовались протоны с энергией 30 МэВ циклотрона НИЦ “Курчатовский институт”. Условия облучения — температура, давление, мощность поглощённой дозы, а также состав растворов соответствовали характерным для первого контура реакторных установок с водой под давлением.

Для обоснования адекватности разработанной математической модели использовалась статистическая теория корреляции. Расчёты коэффициентов корреляции показали, что коэффициент корреляции между расчётными и экспериментальными значениями концентрации синтезированного аммиака составляет 0,90, что свидетельствует о наличии сильной положительной корреляции между расчётными и экспериментальными данными. Максимальное отклонение экспериментально полученных величин концентраций синтезированного аммиака от расчётных значений составило $\pm 80\%$. Принимая во внимание сложность эксперимента на стенде “Протока”, влияющую на погрешность экспериментальных данных, следует считать предложенную математическую модель адекватной с учётом полученной погрешности.

Ключевые слова: математическая модель, экспериментальный стенд, верификация модели, синтез аммиака.

Летучесть молекулярных форм йода и их перенос между жидкой и парогазовой фазами внутри защитной оболочки ВВЭР

К.Д. Хорошилова, А.Б. Сазонов, О.С. Быстрова, В.А. Грачев, С.К. Белусь, К.В. Царькова,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Для определения и уточнения ряда свойств летучих форм неорганического йода (I_2 и HOI) проведены эксперименты по дистилляции йодных растворов с различными концентрациями борной кислоты и рН. Использование полученных результатов для расчёта коэффициента распределения (КР) йода показало его зависимость как от температуры и рН, так и от времени, начальной концентрации общего йода и каждой из его форм в растворе. В кислой области при низких температурах летучесть йода обусловлена свойствами I_2 , а в щелочной области и при высоких температурах — свойствами HOI . Установление равновесия по йоду между жидкой и парогазовой фазами контролируется кинетикой гидролиза I_2 и HOI в растворе. Поэтому использование равновесного КР может привести к существенной ошибке при оценке выбросов радиоактивного йода при авариях с потерей теплоносителя первого контура ВВЭР. Предложена альтернативная численная модель, позволяющая рассчитывать перенос йода между фазами с учётом как кинетики химических реакций йодсодержащих частиц, так и изменения во времени температуры и состава раствора в аварийном прямке ВВЭР.

Ключевые слова: ВВЭР, теплоноситель первого контура, радиоактивные изотопы, йод, йодноватистая кислота, гидролиз, водородный показатель, коэффициент распределения, константа Генри.