

УДК 621.039

**СТАРТ4 — программа комплексного расчёта ядерного реактора
в R — Z -геометрии**

А.О. Гольцев,

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

Программа СТАРТ4 (Calculation Transient Atomic Power and Temperature, version 4) предназначена как для моделирования стационарного состояния реактора со всеми основными обратными связями, так и для проведения расчётных исследований нестационарных процессов любой длительности (выгорание и перегрузка топлива, ксеноновые процессы, пуск и остановка реактора, ряд аварийных процессов) без учёта влияния оборудования внешнего контура. Эта программа разрабатывалась специально для проведения расчётных исследований характеристик реактора на этапе выработки его концепции и выбора основных конструктивных решений: размеров реактора, вида твэлов (плоские, цилиндрические, сферические), структуры активной зоны (однородная или кластерно-канальная), режима перегрузок топлива, типа теплоносителя (газ, жидкость, жидкий металл) и пр.

Ключевые слова: ядерный реактор, нестационарные процессы, расчётное моделирование, обратные связи, R — Z -геометрия.

EDN: TDXUOA

УДК 621.039.524.2.034.3

**Двухтемпературная модель теплопроводности для твэла
с гетерогенными источниками тепла в программе СТАРТ4**

А.О. Гольцев, И.Н. Гераскин, С.В. Попов,

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

Представлена математическая модель расчёта теплопереноса в шаровых твэлах с микротвэлами с гетерогенными источниками тепла. Модель была разработана в ИАЭ им. И.В. Курчатова применительно к расчёту ВТГР более 30 лет назад и используется в программе СТАРТ4. Ключевым параметром модели является так называемое “эффективное термическое сопротивление оболочек микротвэла”, которое в данной модели принимается константой, хотя на самом деле не должно быть таковым. В работе выполнена подробная оценка поведения этого определяющего параметра, точное знание которого в значительной степени определяет характеристики реактора в быстрых нестационарных (аварийных) процессах.

Ключевые слова: ВТГР, микротвэл, термическое сопротивление, оболочка микротвэла, перенос тепла, нестационарный процесс, распределение температур.

EDN: UWIEOX

УДК 621.039.586

**Расчёт запроектной аварии исследовательского ядерного реактора
при различных моделях разрушения топлива**

А.О. Гольцев, И.Н. Гераскин, Д.А. Олексюк,

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

В данной статье на примере расчёта гипотетического аварийного процесса при вводе реактивности $>1\beta_{эф}$ в исследовательском ядерном реакторе показано, что для более реалистичного моделирования такой аварии необходимо учитывать эффект реактивности, обусловленный разрушением части твэлов. Рассмотрены две простейшие модели процесса разрушения топлива. В одной модели началом разрушения твэла считается начало плавления оболочки. Другая модель базируется на результатах экспериментов по разрушению твэлов при тепловых потоках больше критических.

Ключевые слова: ИЯУ, авария, эффект реактивности, ядерное топливо, твэл, критический тепловой поток.

EDN: GIWHFP

УДК 621.039

Оценка неопределённостей коэффициентов реактивности активной зоны ВВЭР большой мощности на основе обработки экспериментов по ксеноновым колебаниям

М.И. Сальников, А.А. Пинегин, Д.В. Афанасьев, А.А. Рыжов,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

На основе метода Байеса с использованием данных эксперимента по возбуждению свободных ксеноновых колебаний разработана процедура оценки неопределённостей нейтронно-физических параметров моделей инженерных расчётных кодов. Процедура включает в себя анализ чувствительности характеристик переходного процесса к параметрам модели, выбор априорных гипотез для параметров модели, построение упрощённой полиномиальной модели для ряда характеристик процесса и построение апостериорной плотности вероятности для параметров модели методом Байеса с использованием цепей Маркова. Приводятся результаты применения указанной процедуры для уточнения нейтронно-физических параметров с использованием программного средства Nostra и данных эксперимента по возбуждению свободных ксеноновых колебаний в реакторе ВВЭР-1200. Полученные апостериорные распределения для неопределённостей нейтронно-физических параметров сравниваются с априорными гипотезами.

Ключевые слова: аксиальные ксеноновые колебания, метод Байеса, МСМС, анализ неопределённостей, коэффициенты чувствительности, машинное обучение.

EDN: QQSJNU

УДК 621.039.544.8

Совместное использование выгорающих поглотителей на основе гадолиния и эрбия при удлинённых топливных кампаниях в реакторах типа ВВЭР-1000

А.Р. Музафаров, В.И. Савандер,
НИЯУ “МИФИ”, 115409, Москва, Каширское ш., д. 31

Увеличение длительности топливной кампании ВВЭР-1000 может быть обеспечено за счёт повышения начального запаса реактивности. Дальнейшее увеличение весового содержания гадолиния при используемой схеме размещения твэгов в ТВС не приводит к росту компенсируемого запаса реактивности поглотителем. При этом значительно повышается неравномерность поля энерговыделения в ТВС. Применение выгорающего поглотителя на основе эрбия напрямую влияет на запас реактивности. Однако в этом случае возникают потери в выгорании топлива. Исследована возможность совместного использования выгорающих поглотителей на основе гадолиния и эрбия в реакторах типа ВВЭР-1000. Рассмотрены различные варианты размещения поглотителей. Полученные результаты демонстрируют возможность совместного использования выгорающих поглотителей при переходе на более длительные топливные кампании с повышенным запасом реактивности.

Ключевые слова: гадолиний, эрбий, коэффициент размножения, выгорание, ВВЭР, полиячейка, неравномерность энерговыделения, запас реактивности, топливная кампания, весовое содержание, Serpent.

EDN: ZIAYTO

УДК 621.039, 51-74

Усовершенствованный метод исключённого ДПЗ

Н.О. Блохин, Д.Н. Скороходов, В.А. Мильто,

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

Подробно рассмотрена практика применения существующего метода исключённого ДПЗ системы внутриреакторного контроля активной зоны ВВЭР. Описаны границы применимости и недостатки существующего метода. Описан новый усовершенствованный метод исключённого ДПЗ. Приведены результаты апробации нового метода на действующих энергоблоках.

Ключевые слова: детектор прямого заряда (ДПЗ), система внутриреакторного контроля (СВРК), ВВЭР, выявление отказов.

EDN: CRNRXU

УДК 621.3.002

Экспериментальное исследование фоновых токов в линиях связи ДПЗ

**А.С. Колокол, В.Н. Кочкин, А.Ю. Курченков, Е.Н. Познырев, А.А. Решетников,
А.С. Федотов,**

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

В статье приведены результаты экспериментального исследования фоновых токов в линиях связи ДПЗ в поле гамма-излучения. Кратко описаны конструкции использованных экспериментальных установок, а также двух образцов кабелей, используемых для линий связи. Приведены результаты измерений тока жил в различных сериях экспериментов. Проведён анализ полученных результатов. В некоторых экспериментах обнаружена смена полярности тока жил.

Ключевые слова: линия связи, фоновый ток, детектор прямого заряда (ДПЗ), система внутриреакторного контроля (СВРК), гамма-чувствительность линии связи, ВВЭР.

EDN: HZVVKY

УДК 539.1.08

Метод измерения объёмной активности инертных радиоактивных газов в аварийном режиме на АЭС

В.О. Небольсин,

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

Обеспечение безопасности современных атомных электростанций требует достоверных измерений объёмной активности инертных радиоактивных газов в широком диапазоне при нарушении нормальной эксплуатации и в аварийных режимах. Существующие технические средства для аварийных режимов преимущественно используют косвенные методы измерения, что приводит к большой погрешности измерения. Применяемые технические средства, основанные на методах прямых измерений, имеют ряд принципиальных конструктивных недостатков, что делает их непригодными для применения в аварийных ситуациях. Предлагается новый метод прямых измерений в условиях высокого внешнего гамма-фона и других факторов, который сможет обеспечить проектную точность измерения во всём диапазоне значений объёмной активности.

В статье представлен анализ возможных значений объёмной активности инертных газов для современных проектов атомных электростанций, проанализированы существующие методы измерения и детекторы, приведены их ограничения при измерении активности до 10^{17} Бк/м³.

Ключевые слова: объёмная активность, инертные радиоактивные газы, выбросы АЭС, контроль радиационной обстановки, ионизационная камера, полупроводниковый детектор, сцинтилляционный детектор, прямой метод измерения, бета-излучение, чувствительность детектора, аварийные условия.

EDN: XGAALS

УДК 621.039.587

Результаты предварительного анализа пускового режима одноконтурной ЯЭУ ВВЭР-СКД

А.М. Баусов, А.Н. Чуркин,

АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, 142103, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

На основе предварительного расчётного анализа предложен алгоритм пуска при постоянном давлении одноконтурной ядерной энергетической установки ВВЭР-СКД. Проведены исследования устойчивости течения теплоносителя в периферийной части двухзаходной активной зоны ВВЭР-СКД, в которой осуществляется течение теплоносителя сверху вниз. С использованием системного кода КОРСАР определена граница потери устойчивости течения теплоносителя и продемонстрировано, что режимы нормальной эксплуатации находятся в области устойчивого течения. Теплогидравлический анализ периферийной ТВС, выполненный с помощью поярковой программы ТЕМПА-СК, подтвердил устойчивость течения теплоносителя также и внутри ТВС. Представлен обзор схем пуска зарубежных проектов реакторных установок со сверхкритическими параметрами водяного теплоносителя в соответствии с двумя вариантами режимов — при скользящем и при постоянном давлении.

Ключевые слова: ВВЭР-СКД, сверхкритическое давление, пусковой режим, устойчивость течения, КОРСАР, ТЕМПА-СК.

EDN: ZZXSMT

УДК: 536.2

Моделирование охлаждения ядерной энергетической установки с помощью лунного реголита

*В.А. Кириш, А.В. Беклемишева, М.Г. Коломытова, Ю.Н. Кузнецов, В.Г. Саркисов,
В.Н. Беклемишев, С.Е. Стельмак, П.А. Александров,*

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

Теоретически изучена возможность отвода тепла от второго контура ядерной энергетической установки (ЯЭУ) в лунный реголит, находящийся в кратерах на затенённой стороне Луны с начальной аномально низкой температурой, равной 73 К. Дан обзор теплофизических свойств реголита и выполнено численное моделирование теплопередачи в каналах с горячим флюидом при добавлении в поток взвеси гранул реголита и при контакте внешних стенок канала с гранульным слоем. Показано, что полярный реголит может быть дополнительно использован для охлаждения реакторной установки с одновременным получением воды.

Ключевые слова: ядерная энергетическая установка (ЯЭУ), полярный реголит, конвективный теплообмен.

EDN: XGIARX

Способы повышения динамической устойчивости энергоблока с ВВЭР-1200**П.В. Поваров, М.Ю. Тучков,**

Филиал АО “Концерн Росэнергоатом” “Нововоронежская атомная станция”,
396071, Воронежская обл., Нововоронеж, Промышленная зона, ул. Южная, д. 1

Результаты пусконаладочных испытаний и опыт эксплуатации энергоблоков с ВВЭР-1200 на Нововоронежской, Ленинградской и Белорусской АЭС подтверждают необходимость корректировки защит и оптимизации алгоритмов разгрузки энергоблока при отключении основного оборудования. Повышение динамической устойчивости при отключении ключевых агрегатов — питательных электронасосов, конденсатных насосов, циркуляционных насосов и главных циркуляционных насосов может быть достигнуто за счёт:

— оптимизации уставок технологических защит и блокировок для исключения избыточного включения систем безопасности, приводящего к снижению нагрузки или отключению энергоблока от сети;

— изменения способов разгрузки блока при отключении насосных агрегатов конденсатно-питательного тракта и циркуляционных насосов для более мягкого протекания переходных процессов, связанных с отключением нерезервируемого оборудования;

— модернизации оборудования, позволяющей минимизировать эффекты изменения уровня в парогенераторах, связанные с переходными процессами.

В статье представлены конкретные предложения по корректировке проектных алгоритмов, направленные на повышение динамической устойчивости энергоблоков с ВВЭР-1200 при работе в базовом режиме на номинальной мощности, что позволит повысить их надёжность и безопасность при эксплуатации.

Ключевые слова: динамическая устойчивость энергоблока, технологические защиты и блокировки, ускоренная предупредительная защита, регулятор ограничения мощности, автоматический регулятор мощности, питательные, конденсатные электронасосы, циркуляционные насосы, главные циркуляционные насосы.

EDN: XBUXNL

**Температурные зависимости растворения и выделения гидридов
в оболочках твэлов из сплава Э110 в необлучённом состоянии
при различных температурных сценариях**

А.В. Рожков, Р.А. Курский, А.С. Брагин,

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

О.О. Забусов,

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

НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31,

А.А. Шишкин, М.М. Грехов,

Акционерное общество “ТВЭЛ”, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 49

Проведены измерения температур растворения и выделения гидридов в необлучённом сплаве Э110 с содержанием водорода 20—180 wppm с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) в температурном диапазоне, соответствующем условиям сухого хранения. Получены зависимости предела растворимости водорода в сплаве Э110 при растворении (TSSD) и при выделении (TSSP). Показано, что значение температуры выделения гидридов зависит от температурной истории образца. Также измерены температуры выделения гидридов в режиме частичного растворения. Эксперименты с частичным растворением гидридов показали, что скорость растворения гидридов при температуре 250—340 °С выше, чем при температуре 380—425 °С.

Ключевые слова: сплавы циркония, сплав Э110, оболочка твэла, сухое хранение, гидриды циркония, растворимость водорода, дифференциальная сканирующая калориметрия.

EDN: TWNEQU

УДК 621.039.564.3:004.032.26

Определение напряжённого состояния оборудования РУ ВВЭР по показаниям наружных температурных датчиков с применением методов машинного обучения

И.А. Дерябин, В.В. Королев, С.В. Курбатова, М.М. Курносов, Г.С. Сорокин,
АО ОКБ “ТИДРОПРЕСС”, 142103, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

В статье рассмотрено применение нейронной сети для расчёта напряжений в контрольных точках оборудования и трубопроводов РУ с ВВЭР. Приведены основные аспекты построения расчётных моделей и их возможные модификации. Результаты, полученные на тестовых примерах, свидетельствуют о высокой точности решения. Показано, что приведение нейросетевой расчётной модели к рекуррентному виду положительно сказывается на её устойчивости к возмущениям в исходных сигналах. Приведённый подход может использоваться как при оценке ресурса узлов РУ, так и при определении реальных нагружающих факторов при обосновании целостности оборудования.

Ключевые слова: ВВЭР, оборудование, напряжения, обратная задача термоупругости, нейронная сеть.

EDN: UJTMEI

УДК 504.054; 504.3.054; 504.4.054; 539.16.04; 629.039.58

Варианты оценки предварительных значений предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ с целью выполнения требований к размеру санитарно-защитной зоны проектируемых АЭС

И.А. Родионов, Д.К. Сапрыкин,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Основной задачей обоснования безопасности проектируемой АЭС является оценка радиационного воздействия на население при нормальной эксплуатации. В статье представлены оценки значений предельно допустимых выбросов (ПДВ) и возможные варианты установления значений ПДВ на этапе проектирования АЭС с учётом требований к радиусу санитарно-защитной зоны. Рассмотрены варианты определения численных значений ПДВ для проектного источника выброса в соответствии с требованиями действующих санитарных правил, а также рекомендациями руководств по безопасности, методик и правил Ростехнадзора. В статье приведён предварительный перечень радионуклидов, учёт которых необходим на этапе проектирования при отсутствии информации об ожидаемом расчётном выбросе в технической документации.

Показано, что на раннем этапе проектирования возможно оценить и/или ограничиться рассмотрением радиационного воздействия АЭС в режиме нормальной эксплуатации.

Ключевые слова: санитарно-защитная зона, атомные электростанции, радиоактивные вещества, выбросы радиоактивных веществ, предельно допустимые выбросы, радиационная безопасность.

EDN: IYDGNL