

УДК 621.039

**Расчётное моделирование кинетических экспериментов
на полномасштабном стенде РБМК с использованием различных
алгоритмов на основе метода Монте-Карло**

А.С. Зинченко, В.Д. Давиденко, В.Е. Житарев,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Представлены результаты нестационарных расчётов на основе метода Монте-Карло, моделирующих эксперименты на критическом стенде РБМК. Экспериментальная информация получена на сборке № 1, представляющей собой фрагмент полномасштабной начальной загрузки реактора со 191 ТВС, 32 борными поглотителями и шестью имитаторами поглощающих стержней.

Использованы разработанные в НИЦ “Курчатовский институт” программные комплексы для расчёта кинетики реакторов методом Монте-Карло:

— КИР — реализует прямой расчёт кинетики ядерных установок без использования приближений [1];

— КИР-П — реализует расчёт кинетики ядерных установок с использованием адиабатического или квазистатического приближения [2, 3].

Расчётные результаты сравниваются с экспериментальными, и на этом основании оценивается применимость использованных алгоритмов. Даны рекомендации по использованию того или иного алгоритма расчёта кинетики реакторов на основе метода Монте-Карло для различных переходных процессов.

Ключевые слова: кинетика, кинетика реактора, ядерный реактор, адиабатическое приближение, квазистатическое приближение, метод Монте-Карло, динамика ядерного реактора, динамика, временная зависимость, метод Монте-Карло с временной зависимостью, уран-графитовый реактор.

EDN: ZKVBMM

УДК 539.125.523.43

**CHARM: параллельный трёхмерный нейтронно-физический код,
основанный на методе характеристик**

И.А. Базулин, А.М. Федосов, А.С. Мязин, А.С. Федотов,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

В статье приведено описание программы, основанной на методе характеристик. Кратко описаны теоретические основы заложенных в программу методов и приближений. Приведены результаты расчётов модельных задач реакторной физики и задач радиационной защиты. Проведён анализ полученных результатов.

Ключевые слова: перенос нейтронов, физика ядерных реакторов, радиационная безопасность, программы для ЭВМ.

EDN: GTTGWB

УДК 621.039.586

**Расчётное исследование эффективности повторного залива водой
разогретой активной зоны реактора ВВЭР-1000 на начальной стадии
запроектной аварии с большой течью теплоносителя**

*И.С. Ахмедов, К.С. Долганов, Н.И. Рыжов, Д.Ю. Томащук,
А.Е. Тарасов, А.Е. Киселев,*

ФГБУН ИБРАЭ РАН, 115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52

В статье представлены результаты параметрического исследования эффективности повторного залива, выполненного на примере представительной аварии типа “большая течь теплоносителя” на энергоблоке с РУ ВВЭР-1000. Исследование выполнено с использованием программы для ЭВМ СОКРАТ/ВЗ по отношению к двум параметрам: температура оболочек твэлов перед подачей теплоносителя в опускной участок реактора и расход охлаждающей воды. В качестве критерия эффективности рассматривается уровень радиационных последствий согласно шкале ИНЕС. Анализ позволил сформулировать выводы об эффективности применения повторного залива в качестве меры по управлению аварией в соответствии с современным уровнем знаний.

Ключевые слова: запроектная авария, ВВЭР, большая течь, повторный залив, СОКРАТ, моделирование, водород.

EDN: ONEEVE

УДК 621.039.52

**Применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования
неравномерности распределения энерговыделения в активной зоне
исследовательского реактора ИРТ-Т**

*Н.В. Смольников, М.Н. Аникин, И.И. Лебедев, А.Г. Наймушин,
И.А. Ушаков, Д.В. Пасько,*

Томский политехнический университет, 634050, Томск, пр. Ленина, д. 30

Исследовательские ядерные реакторы эксплуатируются в режиме частичных перегрузок, что является причиной локального увеличения энергонапряжённости в ячейках со свежим топливом и перераспределения энерговыделения по всей активной зоне. Образование участков с высокой неравномерностью энерговыделения оказывает влияние на эффективность топливоиспользования и ресурсную надёжность активной зоны, что обуславливает важность определения закономерностей формирования энерговыделения в гетерогенной структуре активной зоны. В настоящей статье представлен подход к применению алгоритмов машинного обучения для прогнозирования неравномерности распределения энерговыделения по ТВС активной зоны реактора ИРТ-Т. Подход основан на результатах статистического анализа особенностей формирования энерговыделения в ТВС при различных значениях выгорания с использованием более 500 уникальных картограмм загрузок активной зоны. Показано, что применение концепции обучения с учителем и регрессии на гауссовских процессах позволяет прогнозировать неравномерность распределения энерговыделения по ТВС для любой топливной загрузки с общей точностью более 99%.

Ключевые слова: неравномерность распределения энерговыделения, машинное обучение, исследовательский реактор ИРТ-Т, MCU-PTR.

EDN: OPVYZ

УДК 621.039; 621.039.524.2.034.3

Моделирование нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора ВТГР в течение топливной кампании с помощью прецизионного расчётного кода MSU-NTR

А.Н. Лепехин, В.Ю. Галицких, С.Е. Сорокин, Г.С. Филиппов,
АО “ОКБМ Африкантов”, 603074, Нижний Новгород, пр. Бурнаковский, д. 15,
А.В. Гроль, М.И. Гуревич, П.А. Фомиченко, Д.А. Шкаровский,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

В статье представлен методологический подход к расчёту нейтронно-физических характеристик в процессе выгорания активной зоны ВТГР блочного типа с использованием кода MSU-NTR, основанного на методе Монте-Карло. Дано описание разработанной полномасштабной трёхмерной модели активной зоны, используемых расчётных приближений, а также некоторые результаты расчётов для демонстрации возможностей обработки и визуального представления выходных данных кода MSU-NTR.

Ключевые слова: высокотемпературный газоохлаждаемый реактор, микросферическое топливо, нейтронно-физические расчёты, метод Монте-Карло.

EDN: PEBOCF

УДК 621.039.56

Оценка неопределённостей современных библиотек ядерных данных ^{232}Th в области энергии термоядерного нейтрона

В.Д. Давиденко, И.И. Дьячков, М.В. Иоаннисиан,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

В статье приведён сравнительный анализ нейтронных сечений ^{232}Th , представленных в современных файлах оцененных ядерных данных в области энергии термоядерного нейтрона (14,1 МэВ). Рассматриваются разные версии библиотек ENDF-B, JEFF, JENDL и TENDL, отечественные библиотеки BROND и РОСФОНД, а также китайская библиотека CENDL. Общее число рассмотренных систем файлов оцененных ядерных данных равно 21. Для расчётного анализа использовались специально подготовленные многогрупповые библиотеки программного комплекса UNK с более детальным групповым описанием сечений в быстрой области энергий (область реакций (n, 2n), (n, 3n)). Также разработан специальный модуль расчёта замедления нейтронов в бесконечной среде для решения задачи с источником по поколениям. Выявлены существенные расхождения в оценках сечений ^{232}Th в области энергий 14,1 МэВ. Различия в оценке сечений реакций (n, 2n) и (n, 3n) составляют порядка 50%, упругого и неупругого рассеяния — 9 и 95% соответственно, полного сечения — 5%. Различия в оценке числа вторичных нейтронов, образующихся в результате деления ^{232}Th , составляют 3,5%, а в сечении деления — 6%.

Ключевые слова: оцененные ядерные данные, нейтронные сечения, термоядерный реактор, бланкет, термоядерный нейтрон.

EDN: QWHABV

УДК 621.039.531:620.186.1:539.374.1

Расчётно-экспериментальные оценки прочностных характеристик и сопротивления хрупкому разрушению корпуса реактора ВВЭР-СКД из кандидатных материалов с различной категорией прочности

С.П. Кузнецов,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,
АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, 142103, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21,
Е.А. Кулешова,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,
НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31,

А-др С. Киселев,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,
П.А. Ведерников,
АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, 142103, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

Рассмотрены традиционные стали корпусов реакторов ВВЭР-1000/1200 с категорией прочности КП-45 и разрабатываемая сталь с повышенным содержанием никеля и категорией прочности КП-65 с точки зрения их работоспособности в качестве материалов корпуса реактора в условиях теплоносителя ВВЭР-СКД при температуре ~400 °С и давлении ≥ 25 МПа, а также с учётом технологической возможности изготовления из них удлиненной обечайки активной зоны реактора без наличия сварного соединения. На основе анализа обоснован предварительный выбор стали 10ХН5МФБА-А с повышенной категорией прочности в качестве обечайки ВВЭР-СКД, обусловленной повышенными значениями кратковременной и длительной прочности данной стали при сохранении толщины стенки обечайки ~200 мм, освоенной в промышленном производстве, а также с самым высоким из кандидатных материалов сопротивлением хрупкому разрушению в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: высоконикелевая сталь, ВВЭР-СКД, корпус реактора, категория прочности, кандидатные материалы, кратковременная и длительная прочность, сопротивление хрупкому разрушению, коэффициент интенсивности напряжений.

EDN: SJKFQ

УДК 621.039.531, 620.17

Методология механических испытаний материалов оболочек твэлов российских ядерных реакторов

А.С. Фролов, И.В. Федотов,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

В статье представлен обзор различных методов испытаний материалов оболочек твэлов российских ядерных реакторов, а также выявлены проблемные вопросы отечественной методологии испытаний кольцевых образцов на растяжение и сжатие. Выявлены возможные пути совершенствования методологии на основе формирования единого методического подхода, направленного на повышение информативности, представительности и сопоставимости результатов испытаний. Предложена структура данного подхода и обозначены необходимые для её формирования направления работ.

Ключевые слова: оболочки твэлов, механические испытания, методы испытаний, испытания кольцевых образцов на растяжение, испытания на сжатие, начальная расчётная длина, кратковременные механические характеристики, остаточная пластичность.

EDN: UCARWG

УДК 544.3, 621.039.531

Кремний как эффективный карбидообразователь в (U, Pu)N-топливе, содержащем примеси углерода и кислорода

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

В результате термодинамического анализа установлено, что углерод, присутствующий в составе (U, Pu)N-топлива, может находиться в нём как в связанном состоянии в форме карбидов, так и растворяться в топливе в несвязанной форме. При этом (U, Pu)N-топливо оказывается источником углерода, который может привести к коррозионным повреждениям стальной оболочки твэла. Одним из возможных способов снижения влияния углерода на прочностные характеристики стали является блокирование его проникновения в оболочку. Связывание свободного углерода в топливе путём введения в его состав эффективных карбидообразующих элементов уменьшает количество несвязанного углерода. Это позволяет подавить коррозионные повреждения стальной топливной оболочки. Настоящая работа посвящена изучению влияния кремния, введённого в состав свежего топлива, и анализу его воздействия на состояние примесей кислорода и углерода.

Ключевые слова: (U, Pu)N-топливо, термодинамика, коррозия, примеси углерода и кислорода, кремний.

EDN: INUSOG

УДК 621.039

**Оценка коэффициента диффузии ксенона в ядрах микротвэлов
из диоксида урана**

М.А. Агульник, Н.С. Безрук, А.В. Гроль, А.С. Иванов,

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

На базе экспериментов по измерению выхода газообразных продуктов деления выполнена оценка коэффициента диффузии ксенона в ядрах из диоксида урана при температуре 1100 °С. Проведено сравнение полученного результата с результатами других экспериментальных работ по исследованию диффузионных процессов в двуокиси урана. Оценено время выхода ксенона из UO_2 ядра при температуре 1100 °С. Отмечено, что для получения данных об энергии активации диффузии и частотном коэффициенте, позволяющих в рамках модели Аррениуса рассчитывать температурную зависимость коэффициента диффузии, необходимо проведение экспериментов, по крайней мере, при двух температурах. По результатам оценки сделан вывод о необходимости учёта диффузионного переноса при расчёте количества ксенона, вышедшего из топливного ядра в буферный слой микротвэла.

Ключевые слова: ксенон, коэффициент диффузии, двуокись урана, радиоактивный распад.

EDN: LIALWZ

УДК 621; 544.63; 544.65

**Электрохимический подход к изучению кинетики окисления циркониевых
реакторных сплавов**

А.И. Максимов, П.А. Калашикова, А.С. Иванов,

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

В работе представлен последовательный анализ электрохимической модели окисления циркониевых сплавов. На базе модифицированной модели Макдональда разработан алгоритм оценки скорости окисления циркония для различных исходных концентраций компонентов H_2 , O_2 , H_2O_2 теплоносителя первого контура ВВЭР. Определены кинетические параметры уравнения Батлера—Фольмера, которые позволили построить анодные поляризационные кривые для различных концентраций компонентов H_2 , O_2 , H_2O_2 теплоносителя. По точкам пересечения соответствующих катодных и анодных кривых определены коррозионный потенциал и коррозионный ток при заданных значениях концентраций окислительных компонентов. Выполнены оценки концентрационных зависимостей скоростей окисления циркония при изменении концентраций O_2 и H_2O_2 .

Ключевые слова: коррозия, цирконий, кислород, перекись водорода, поляризационная кривая, электрохимия.

EDN: MURZHE

УДК 621.039.58

**Критерии для оценок режимов горения смесей,
содержащих H_2 и CO , в ГО АЭС.
ЧАСТЬ I. Воспламеняемость**

Т.А. Юдина, А.Е. Киселев, В.Н. Семёнов, А.И. Гавриков,

ФГБУН ИБРАЭ РАН, 115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52,

А.В. Кошечев, А.В. Авдеенков,

АО “ВНИИАЭС”, 109507, Москва, Ферганская ул., д. 25,

Е.В. Безгодов, В.А. Симоненко, О.В. Шульц,

ФГУП “РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина”, 456770, Снежинск,

Челябинская обл., ул. Васильева, д. 13, а/я 245,

И.А. Мельников, Ю.А. Звонарев,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

В статье представлены результаты анализа и обобщения отечественных и зарубежных экспериментальных программ по исследованию концентрационных пределов распространения пламени в водородсодержащих смесях применительно к проблематике обеспечения водородной взрывобезопасности на АЭС с ВВЭР в ходе тяжёлых аварий. На основе опыта моделирования тяжёлых аварий для различных проектов АЭС с ВВЭР (ВВЭР-1000/1200/ТОИ) оценен характерный диапазон значений параметров парогазовой среды в герметичном ограждении. Приведены рекомендации по оценке верхнего и нижнего концентрационных пределов распространения пламени в смесях, содержащих водород и монооксид углерода, в том числе в бедных по кислороду смесях. Результаты данной работы актуальны для задач обоснования водородной взрывобезопасности на АЭС, включая создание, верификацию и практическое применение специализированных программ для ЭВМ.

Ключевые слова: концентрационные пределы распространения пламени, водородная взрывобезопасность, АЭС, тяжёлые аварии.

EDN: OBUTGX

УДК 621.039.58

Критерии для оценок режимов горения смесей, содержащих H_2 и CO , в ГО АЭС. Часть II. Ускорение пламени и детонация

Т.А. Юдина, А.Е. Киселев, В.Н. Семёнов, А.И. Гавриков,
ФГБУН ИБРАЭ РАН, 115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52,
А.В. Кощеев, А.В. Авдеенков,
АО “ВНИИАЭС”, 109507, Москва, Ферганская ул., д. 25,
Е.В. Безгодов, В.А. Симоненко, О.В. Шульц,
ФГУП “РФЯЦ — ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина”, 456770, Снежинск,
Челябинская обл., ул. Васильева, д. 13, а/я 245,
И.А. Мельников, Ю.А. Звонарев,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Представлены результаты анализа и обобщения отечественных и зарубежных экспериментальных программ по исследованию режимов горения водородсодержащих смесей применительно к проблематике обеспечения водородной взрывобезопасности на АЭС с ВВЭР в ходе тяжёлых аварий. Сформулирован подход к критериальным оценкам режимов ускорения пламени и перехода дефлаграции в детонацию для смесей, содержащих водород и монооксид углерода. Обсуждается влияние мелкодисперсной влаги на горючесть и режимы горения водородных смесей. Результаты данной работы актуальны для задач обоснования водородной взрывобезопасности на АЭС, включая создание, верификацию и практическое применение специализированных программ для ЭВМ.

Ключевые слова: концентрационные пределы распространения пламени, режимы горения, водородная взрывобезопасность, АЭС, тяжёлые аварии.

EDN: BGZSZY

УДК 621.039.58

О совершенствовании отечественной регулирующей базы вывода из эксплуатации блоков АЭС

Б.К. Былкин, Ю.А. Зверков,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,
А.А. Бундин, В.Л. Тихоновский,
АО Группа компаний “НЕОЛАНТ”, 105062, Москва, ул. Покровка, д. 47 А

В статье представлены результаты анализа основных положений, требований и рекомендаций, в том числе терминов и определений, используемых в основополагающих нормативных документах и руководствах по безопасности при использовании атомной энергии, которые образуют отечественную базу регулирования вывода из эксплуатации АЭС и регламентируют деятельность, связанную с планированием, подготовкой к выводу и выводом из эксплуатации блоков АЭС с реакторными установками ВВЭР. Осуществлён их сравнительный анализ с аналогичными рекомендациями, имеющимися в документах МАГАТЭ, а также Агентства по ядерной энергии стран — членов Организации экономического сотрудничества и развития (NEA OECD). Сформулированы предложения по совершенствованию отечественной базы регулирования вывода из эксплуатации блоков АЭС.

Ключевые слова: блоки АЭС, реакторные установки ВВЭР, вывод из эксплуатации, концепция вывода из эксплуатации, вариант вывода из эксплуатации, конечное состояние, нормы и правила, руководства по безопасности, термины и определения, цифровое сопровождение вывода из эксплуатации.

EDN: CZMTTP