

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-HTR**

*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-HTR, 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-HTR.

**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  $^{232}\text{Th}$  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  $^{232}\text{Th}$ , 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  $^{232}\text{Th}$  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  $^{232}\text{Th}$ , 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  $\geq 25$  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. Кощев, 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