

**Аннотации статей**  
**журнала “Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов”,**  
**вып. № 2, 2024 г.**

УДК 621.039.56

**Вибрации и колебательная неустойчивость импульсного  
реактора ИБР-2М**

*Ю.Н. Пепельшев, Ц. Цогтсайхан,*

Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединённый институт ядерных  
исследований, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, д. 6

В результате исследований на реакторах ИБР-2 и ИБР-2М статистических характеристик колебаний энергии импульсов, колебаний подвижных отражателей модулятора реактивности, а также исследований колебаний энергии импульсов при изменении расхода натрия через активные зоны этих реакторов показано, что появление низкочастотных колебаний не связано с вибрациями модулятора реактивности или вибрациями внутризонных элементов.

**Ключевые слова:** ИБР-2М, колебания энергии импульсов, неустойчивость, подвижные отражатели.

EDN: LYZLOQ

УДК 621.039.5

**Пространственная нейтронная кинетика. Подводя итоги**

*М.Н. Зизин,*

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

Статья является развёрнутым авторским рефератом недавно вышедшей книги “Пространственная нейтронная кинетика. Тестовые задачи”, над которой автор с разной степенью интенсивности трудился последние десять лет.

Что сделано:

— в расчёты внедрена формула обращённого решения уравнения кинетики (ОРУК) с дифференциальной формой источника запаздывающих нейтронов, не содержащая интеграла и доказавшая реальность тождественности значений реактивности, получаемых из ОРУК и в прямых расчётах критичности. Это обосновало возможность использования последних как эталона при оценке точностей разных вариантов оценки реактивности;

— теоретически постулируемая тождественность значений реактивности, получаемых из обращённого решения уравнения кинетики и прямых расчётов критичности на момент окончания возмущения, с хорошей точностью подтверждена на практике;

— получение точных результатов обеспечило использование отдельных источников мгновенных и запаздывающих нейтронов на всех этапах расчёта, включая стационарные расчёты потоков и ценностей нейтронов;

— выведены и проверены на практике формулы усреднения кинетических параметров по нуклидам и физическим зонам;

— исследована информативность моделирования мгновенного сброса органов регулирования;

— реализовано моделирование движения органов регулирования с переменным шагом по времени;

— созданы программы выбора расположения ионизационных камер на основе результатов моделирования нескольких сценариев движения органов регулирования;

— исследована система из девяти тестовых задач для пространственной нейтронной кинетики с разумным сочетанием точности и времени расчёта. Все расчёты тестов проводились с помощью кратко описанной в книге интеллектуальной программной системы ShIPR.

**Ключевые слова:** пространственная кинетика, тестовые задачи, реактивность, органы регулирования, запаздывающие нейтроны, интеллектуальная программная система ShIPR.

EDN: NAOBDY

УДК 621.039.51...17

**Модификация алгоритма Франк-Каменецкого для параллельных вычислений**

**В.И. Белоусов, М.И. Гуревич, В.Д. Давиденко, М.В. Иоаннисиан, К.Ф. Раскач, К.Г. Чернов,**  
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

В статье представлено описание разработанного параллельного алгоритма Франк-Каменецкого для регулирования числа нейтронов на начало поколения в расчётах нейтронно-физических стационарных задач переноса методом Монте-Карло. Приведено его обоснование, доказывающее его непротиворечивость стандартному алгоритму Франк-Каменецкого. Алгоритм открывает возможность оптимизировать нагрузку между параллельными процессами и может использоваться для эффективного снижения систематической ошибки первого рода, связанной с размером поколения нейтронов. Представлены результаты расчётов тестовых задач с использованием локального кластера и суперкомпьютера.

**Ключевые слова:** параллельный алгоритм, метод Монте-Карло, MPI-интерфейс, нейтронно-физические расчёты, стационарные процессы, оптимизация, суперкомпьютерные вычисления.

EDN: OAJWQE

УДК 621.039

**О применении метода сеток для нейтронно-физических расчётов**

**О.Ю. Кавун, М.А. Увакин, Ю.А. Безруков, Н.В. Шарый,**  
АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, 142103, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

В статье изложен метод сеток применительно к решению уравнения переноса нейтронов в двухгрупповом диффузионном приближении, реализованном в программном комплексе (ПК) RAINBOW-TRP. Представлены результаты валидации метода и проанализированы возможности его применения к современным проектам реакторных установок.

**Ключевые слова:** метод сеток, ВВЭР, моделирование, RAINBOW-TRP, верификация расчётных программ.

EDN: SFOYBX

УДК 621.039

**Динамическая составляющая погрешности внутриреакторных термодатчиков (аналоговое моделирование)**

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

В статье приведены результаты анализа динамической составляющей погрешности внутриреакторных измерений температуры на примере термодатчиков, установленных в реакторной установке ВВЭР. Построена аналитическая аналоговая модель термодатчика. Получено аналитическое выражение для оценки постоянной времени инерции термодатчика в зависимости от собственных значений аналоговой модели. Постоянная времени инерции представлена в виде функции от конструктивных параметров термодатчика.

**Ключевые слова:** ВВЭР, термодатчик, термометр сопротивления, динамическая погрешность.

EDN: UTCLYK

УДК 621.039.5, 621.039.586

**Разработка комплекса кодов для анализа радиационной безопасности при тяжёлых авариях на АЭС с ВВЭР**

*Ю.Б. Шмельков, Ю.А. Звонарев, Ю.М. Семченков,*

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

Современные нормативные документы предъявляют жёсткие требования к обоснованию безопасности АЭС в условиях тяжёлых аварий, которые не могут быть удовлетворены с помощью консервативных подходов и требуют разработки новых реалистичных моделей. В статье приводится описание разработанного и применяемого в НИЦ “Курчатовский институт” подхода к анализу радиационной безопасности АЭС с ВВЭР в условиях тяжёлых аварий, в том числе с плавлением топлива: феноменологии поведения продуктов деления в условиях тяжёлой аварии, описание подходов к моделированию поведения продуктов деления, описание разработанных в НИЦ “Курчатовский институт” кодов для моделирования поведения продуктов деления в условиях тяжёлой аварии. В заключительной части статьи приводятся результаты моделирования поведения продуктов деления для сценария аварии “Двусторонний гильотинный разрыв главного циркуляционного трубопровода с одновременным полным обесточиванием” для проекта АЭС-2006.

**Ключевые слова:** продукты деления, тяжёлая авария, ВВЭР, безопасность.

EDN: VQTXVF

УДК 621.039.56

**Анализ аварий с выбросом ОР СУЗ на РУ ВВЭР с учётом реальных гидродинамических усилий**

*Г.А. Рябов, А.Л. Николаев, М.А. Увакин, М.В. Антипов, И.В. Махин, Н.А. Дарьин,*  
АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, 142103, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

Работа направлена на обоснование консервативного подхода, применяемого при анализе аварии на РУ ВВЭР (проект АЭС-2006) с выбросом одного кластера поглощающих элементов (ПЭЛ) из активной зоны. Решается задача о нахождении закона движения органа регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) при постулируемом его выбросе в аварии с разрывом чехла привода. Для этого используется математическая модель ОР СУЗ, в которой учитываются геометрические характеристики ПЭЛ и гидродинамическая обстановка в активной зоне при возникновении течи. Проводится анализ влияния закона движения одного кластера ОР СУЗ на вводимые возмущения в реактор при различных исходных состояниях РУ.

**Ключевые слова:** проектная авария, выброс ОР СУЗ, изменение реактивности и распределения энерговыделения, пространственная кинетика, код КОРСАР/ГП.

EDN: XCZDPQ

УДК 621.039.5

**Обоснование выбора физических характеристик и мощности  
многоцелевого тестового исследовательского реактора  
со сверхкритическими параметрами легководного теплоносителя**

*А.С. Лапин,*

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

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

*А.А. Седов, В.Ю. Бландинский, Я.А. Котов, П.А. Фомиченко, С.Б. Пустовалов,*

*В.А. Невиница, С.А. Субботин, М.В. Кормилицин,*

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

Представлены методология выбора основных параметров многоцелевого исследовательского реактора малой мощности с легководным теплоносителем сверхкритических параметров МТИР-СКД и полученные расчётные характеристики активной зоны различного объёма. Приведены условия, при которых в МТИР-СКД воспроизводятся основные рабочие параметры, физические свойства и эффекты реактивности энергетического реактора ВВЭР-СКД. Рассматриваются возможности МТИР-СКД по эффективному облучению конструкционных материалов и топливных композиций для направления ВВЭР-СКД в зависимости от максимальной установленной мощности. Представлена оценка габаритных характеристик корпуса МТИР-СКД в зависимости от объёма активной зоны.

Показано, что минимальный объём активной зоны, при котором МТИР-СКД будет обладать референтными характеристиками по отношению к энергетическому реактору ВВЭР-СКД, составляет 500 л. Кроме того, такой объём активной зоны даёт возможность размещения двух петлевых каналов, наличие которых позволит проводить экспериментальные исследования поведения твэлов в среде легководного теплоносителя при до- и сверхкритических давлениях теплоносителя в широком диапазоне температур и спектра нейтронов (от быстрого до теплового), а также моделировать аварийные процессы, связанные с потерей расхода теплоносителя, разгерметизацией и несанкционированным повышением мощности.

**Ключевые слова:** МТИР-СКД, ВВЭР-СКД, легководный СКД-теплоноситель, тестовый реактор, исследовательский реактор, мощность реактора.

EDN: XNREPI

УДК 621.039.54

**Моделирование связанных процессов теплогидравлики теплоносителя  
и термомеханики цилиндрических твэлов энергетических реакторов типа  
ВВЭР и БН в квазистационарных и переходных режимах эксплуатации.  
Часть 1. Особенности моделирования и структура программы FRB**

*А.С. Степанов, А.А. Седов, А.А. Фролов,*

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

Представлены краткое описание основных моделей и структура программы FRB для проведения расчётов связанных процессов теплогидравлики теплоносителя и термомеханики цилиндрических твэлов энергетических реакторов типа ВВЭР и БН в квазистационарных и переходных режимах эксплуатации с использованием нейтронно-физических данных, рассчитанных сторонними программными средствами.

**Ключевые слова:** программа, совмещённый расчёт, теплогидравлика, термомеханика, модель термовязкоупругого поведения цилиндрических тел, твэл, энергетический реактор.

EDN: XUNBKF

УДК 621.039.531:620.186.1

**Оценка влияния параметров структуры на характеристики длительной прочности высоконикелевой стали для корпусов перспективных реакторов типа ВВЭР**

*Е.А. Кулешова,*

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

*И.В. Федотов, А.А. Потехин, Д.А. Мальцев, С.П. Кузнецов,*

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

*И.А. Иванов,*

НПО “ЦНИИТМАШ”, 115088, Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4

В статье представлены результаты сравнительных структурных исследований стали с повышенным содержанием никеля, предназначенной для корпуса реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя ( $T \geq 400$  °С, давление  $\geq 25$  МПа), после испытаний на длительную прочность. Выявлены структурные факторы в образцах из разных групп плавок, влияющие на характеристики их длительной прочности. Сформулированы рекомендации для повышения характеристик длительной прочности высоконикелевой корпусной стали.

**Ключевые слова:** высоконикелевая сталь, корпус реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя, структурные исследования, фазовый состав, фрактография, металлография, просвечивающая электронная микроскопия, растровая электронная микроскопия, длительная прочность.

EDN: OVQLFD

УДК 621.039.531:620.186.1

**Особенности макро- и микроструктуры металла сварного шва корпуса реактора типа ВВЭР, выполненного с использованием керамического флюса, в исходном и облучённом состояниях**

*Е.А. Кулешова, Е.Д. Малиновский,*

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

*Д.А. Мальцев, И.В. Федотов, А.А. Потехин,*

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

*В.Н. Скоробогатых,*

НПО “ЦНИИТМАШ”, 115088, Москва, ул. Шарикоподшипниковская, д. 4

В данной работе выполнен сравнительный анализ особенностей макро- и микроструктуры металла сварного шва корпуса реактора типа ВВЭР, выполненного с использованием керамического флюса, в исходном и облучённом состояниях по сравнению с металлом сварного шва, выполненного по стандартной технологии. Показано, что шов, выполненный с использованием керамического флюса, характеризуется сниженным пределом текучести металла и более низким уровнем зернограницных сегрегаций. Расчётно-экспериментальная оценка радиационного упрочнения показала повышение предела текучести на 108 МПа. Данная величина радиационного упрочнения оказалась равной характерной величине для металлов сварных швов корпуса реактора ВВЭР-1000 с близким содержанием никеля, облучённых до флюенса быстрых нейтронов, соответствующего проектному значению для срока эксплуатации 60 лет. В результате сделан вывод о снижении склонности исследуемого материала сварного шва к радиационному охрупчиванию.

**Ключевые слова:** сварные швы, керамический флюс, корпус реактора, нейтронное облучение, радиационное охрупчивание, радиационное упрочнение, зернограницные сегрегации, карбиды, дислокационные петли, радиационно-индуцированные преципитаты, просвечивающая электронная микроскопия.

EDN: QJXSKH

УДК 544.3; 621.039.53

**Некоторые особенности взаимодействия нитридного топлива с оболочками твэлов из аустенитной и ферритно-мартенситной стали**

***В.А. Русинкевич, А.С. Иванов,***

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

В работе представлен сравнительный анализ результатов расчётных исследований термодинамики аустенитной ЧС68-ИД и ферритно-мартенситной ЭП823-Ш сталей при их взаимодействии с углеродом и кислородом. Особое внимание уделено поведению несвязанного хрома в зависимости от содержания примесей кислорода и углерода, поскольку именно несвязанный хром, по-видимому, является основным протектором межкристаллитной коррозии. Согласно полученным результатам ферритно-мартенситная сталь ЭП823-Ш оказывается существенно менее чувствительной к введению примесей углерода в топливо в сравнении с аустенитной сталью ЧС68-ИД. Возможная причина относительной стабилизации концентрации несвязанного Cr в оболочке из стали ЭП823-Ш заключается в перераспределении углерода между хромом и кремнием. Установлено, что влияние кислорода на содержание несвязанного хрома в системе “оболочка из стали ЭП823-Ш + топливо” и системе “оболочка из стали ЭП823-Ш + кислород” существенно отличается. Согласно проведённым расчётам вследствие окисления силицида хрома в системе “оболочка из стали ЭП823-Ш + кислород” образуется много несвязанного Cr, при этом кислород соединяется с кремнием. В системе “оболочка из стали ЭП823-Ш + топливо” кислород связывается с компонентами топлива и высвобождения Cr в оболочке не происходит.

**Ключевые слова:** термодинамика, коррозия, феррит, аустенит, мартенсит, сталь.

EDN: EZOONE

УДК 621.039;620.19

**Применение протекторной противокоррозионной защиты конструкционного материала в условиях водяного циркуляционного контура**

***И.В. Пышин, А.А. Седов,***

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

Проанализирована возможность применения электрохимической протекторной противокоррозионной защиты в среде циркуляционных контуров ядерных энергетических установок с легководным теплоносителем в широком диапазоне температуры. Показана необходимость дополнительных экспериментальных исследований. Предложена примерная схема постановки такого рода экспериментов.

**Ключевые слова:** протекторная противокоррозионная защита, коррозионная среда, ядерная энергетическая установка, водный теплоноситель.

EDN: OOKPEI

УДК 621.039.58

**Снижение выброса трития при эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах**

***О.А. Кочетков, П.П. Сурин,***

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 123182, Москва, ул. Живописная, д. 46,

***А.Ю. Максимов,***

АО “Прорыв”, 107140, Москва, пл. Академика Доллежала, д. 1, корп. 7

Рассмотрено снижение выбросов трития из реакторов на быстрых нейтронах с учётом устройств, переводящих тритий из газообразной формы в пары тритированной воды, обладающие меньшей проникаемостью через стенки оборудования и трубопроводов и облегчающие дальнейшую переработку и кондиционирование тритийсодержащих РАО. Приведён пример математической модели формирования выброса. С помощью данной модели проведена оценка влияния устройств стока трития на активность трития в технологических системах и выбросы энергоблока с реактором на быстрых нейтронах. Показано, что при выборе определённых режимов работы указанных устройств возможно значительное снижение выбросов трития.

**Ключевые слова:** быстрый реактор, тритий, радиоактивный выброс, радиоактивные отходы, радиационная безопасность, математическое моделирование.

EDN: NBINWA