

УДК 621.039.514.4+621.039.51...17

**Анализ и валидация алгоритмов моделирования нейтронной кинетики на основе методов Монте-Карло**

**В.И. Белоусов, М.В. Иоаннисиан, А.Н. Писарев, К.Ф. Раскач,**  
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,

Представлены результаты расчётов нестационарных процессов, выполненных методом Монте-Карло. Приведённые расчёты моделируют результаты экспериментов, проведённых на реакторных установках SPERT III и CROCUS. Исследовано влияние числа поколений нейтронов на точность предсказания кинетических параметров, которые определяют динамику кинетического процесса. Также изучено влияние общего количества нейтронных историй, используемых в программе КИР-С при проведении расчётов методом Монте-Карло.

**Ключевые слова:** адиабатическое приближение, многозонное приближение, прямой метод, число поколений нейтронов, статистика, метод Монте-Карло, программа КИР-С, кинетические параметры, реакторная установка SPERT III, реакторная установка CROCUS.

EDN: DNICLG

УДК 621.039.51...12+621.039.51...17

**Моделирование нейтронной кинетики в трёхмерных тестах бенчмарка C5G7-TD по программе КИР**

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

Представлены результаты расчёта трёхмерных тестов нестационарного бенчмарка C5G7-TD по программе КИР с использованием группового физического модуля MAGMA. Для решения нестационарного уравнения переноса в программе КИР используется прямой метод Монте-Карло. В тестах рассматриваются быстрые переходные процессы, вызванные изменением положения органов регулирования.

Результаты, полученные по программе КИР, предлагается использовать в качестве реперных. Приведено сопоставление результатов расчётов по программам SUNAM-3D-TD, RMS, MPACT и PCI\_nTRACER с результатами, полученными по программе КИР.

**Ключевые слова:** нейтронная кинетика, нестационарное уравнение переноса нейтронов, бенчмарк C5G7-TD, метод Монте-Карло, прецизионные расчёты, программа КИР, программный модуль MAGMA.

EDN: EFWAMAM

УДК 621.039.524.2.034.3

**Влияние конструктивных параметров микротвэлов на характеристики ВТГР в нестационарных режимах**

**А.О. Гольцев, И.Н. Гераскин,**  
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

В статье приведены результаты расчётных исследований влияния диаметра зерна микротвэлов (МТ) и термического сопротивления его защитных покрытий на характеристики ВТГР с шаровыми твэлами в стационарных и нестационарных режимах. Показано, что размер зерна МТ оказывает существенное

влияние на стационарные характеристики реактора, а величина термического сопротивления оболочек МТ позволяет в значительной степени предсказать поведение реактора и его характеристик в течение всего нестационарного процесса.

**Ключевые слова:** ВТГР, микротвэл, диаметр ядра микротвэла, перенос тепла, стационарный процесс, нестационарный процесс, эффективное термическое сопротивление, нейтронно-физические константы.

EDN: IETGQR

УДК 621.039.514

## **Расчёты методом дискретных ординат 1D-моделей реактора ПИК с использованием библиотек ENDF/B-7.0 и ENDF/B-7.1**

**М.С. Онегин,**

ФГБУ “Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, 188300, Гатчина, Орлова роща, стр. 1

Для пяти тестовых конфигураций реактора ПИК, представляющих собой цилиндрические модели реактора ПИК различной сложности, выполнены сравнительные расчёты эффективного коэффициента размножения по методу Монте-Карло и методу дискретных ординат. Показано, что различие между значениями эффективного коэффициента размножения, рассчитанного с использованием кодов KENO-6 и PARTISN (библиотека ядерных данных ENDF/B-7.0), не превышает 0,03 для 1D-моделей реактора. Расчёт с библиотеками ядерных данных ENDF/B-7.1 и ENDF/B-7.0 даёт близкие значения эффективного коэффициента размножения. 238-групповые константы для программы PARTISN рассчитаны двумя методами: с использованием программы XSDRN пакета SCALE и программы SERPENT-2. Использование этих наборов констант приводит к практически совпадающим расчётным значениям эффективного коэффициента размножения тестовых конфигураций. Таким образом, показано, что программа PARTISN с 238-групповой системой констант, основанной на библиотеке ядерных данных ENDF/B-7.0, может использоваться для нейтронно-физических расчётов реактора ПИК.

**Ключевые слова:** метод дискретных ординат, библиотека оцененных ядерных данных, коэффициент размножения.

EDN: IRNEMQ

УДК 621.039.56

## **Анализ способов снижения неравномерности энерговыделения при использовании серых органов регулирования для РУ ВВЭР большой мощности**

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

В статье анализируется влияние использования групп серых органов регулирования, необходимых для компенсации ксеноновых процессов с целью исключения операций водообмена при маневрировании мощностью реакторной установки (РУ), на распределение энерговыделения в активной зоне реактора ВВЭР большой мощности. Предложены технические решения, позволяющие снизить коэффициенты неравномерности поля энерговыделения и увеличить запасы линейной мощности до лимитной кривой в стационарном состоянии при погружённых серых группах органов регулирования в условиях стандартного 18-месячного топливного цикла, а также проведён расчёт выгорания топлива. Полученные результаты позволяют оптимизировать алгоритмы маневрирования в части соблюдения локальных параметров и сделать следующий шаг к решению задачи по реализации унифицированного алгоритма управления мощностью и аксиальным офсетом в режимах следования за нагрузкой.

**Ключевые слова:** режимы следования за нагрузкой, проект АЭС-2006, алгоритмы маневрирования, аксиальный офсет, пространственная кинетика, код КОРСАР/ГП, серые органы регулирования.

EDN: LXTOMI

УДК 621.039.5

## **Влияние местоположения твэгов на неравномерность внутрикассетного микрополя энерговыделения в тепловыделяющих сборках ВВЭР-440**

*Ж.Ю. Ливенцева, А.А. Гагаринский, Д.А. Олексюк, А.А. Арестова,*  
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

В статье обсуждаются вопросы профилирования обогащения топлива в поперечном сечении топливного пучка кассет ВВЭР-440. Исследуется влияние схемы расстановки твэгов и твэлов разного обогащения на неравномерность внутрикассетного микрополя энерговыделения. Представлены новые варианты оптимизированного профилирования обогащения топлива кассет ВВЭР-440 второго и третьего плюс поколения. Приведены значения основных нейтронно-физических характеристик топливных циклов, разработанных с использованием новых кассет РК-2 и РК3+. Проведены сравнительные теплогидравлические расчёты топливныхборок РК3+ нового профилирования 468JA и РК-2 47W. Результаты расчётов показали преимущества ТВС 468JA РК3+ с точки зрения стационарной теплогидравлики.

**Ключевые слова:** ВВЭР-440, ТВС, твэл, твэг, коэффициент неравномерности энерговыделения, микрополе энерговыделения, обогащение топлива, коэффициент размножения нейтронов, РК-2, РК3+, тип профилирования JA.

EDN: OWJXMH

УДК 004.896

## **Разработка расчётной модели фильтрации шумов в показаниях датчиков КИП на основе нейронных сетей применительно к стратегии управления ЗПА**

*А.В. Николаева, И.Н. Гриценко, А.В. Литышев, С.И. Пантюшин, В.В. Астахов,*  
АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

На показания датчиков всегда накладываются шумы и помехи. Это обусловлено рядом объективных внешних и внутренних причин. Для снижения уровня шума в показаниях используется множество разноплановых решений: оптимизация выбора места установки и типа измерительного оборудования, защита измерительного оборудования от внешних воздействий, аппаратная и программная фильтрация.

В рамках настоящего исследования рассмотрен ряд традиционных способов программной фильтрации шумов: среднее арифметическое, медианный фильтр, экспоненциальное бегущее среднее с адаптивным коэффициентом, фильтр Калмана. Показано, что при использовании данных фильтров происходят искажение и смещение данных, потеря существенных признаков сигналов. Это может стать причиной неточности результата (или даже возникновения ошибок) работы диагностических моделей для поддержки оператора в условиях запроектных аварий на атомной электростанции.

Для решения проблемы рассмотрен альтернативный метод фильтрации шумов с применением архитектуры AANN и разработана соответствующая модель, применение которой при тех же временных затратах на фильтрацию данных позволяет решить проблемы смещения и искажения данных с существенным повышением качества фильтрации (удалось снизить значение метрик качества MAE минимум в 4 раза и MSE минимум в 22 раза по сравнению с рассмотренными традиционными подходами к программной фильтрации шумов при сопоставимых вычислительных затратах).

**Ключевые слова:** шумы, программное шумоподавление, медианный фильтры, фильтр Калмана, нейронная сеть.

EDN: RIERQA

УДК 621.039.50

## Область маневрирования ВВЭР-ТОИ при работе в суточном графике нагрузки

*А.А. Дубов, Т.В. Кузнецова,*

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

В статье рассматривается вопрос о влиянии технологических ограничений со стороны системы подпитки-продувки первого контура при работе в режиме борного регулирования и ограничения по максимально допустимой скорости увеличения мощности на работу в суточном графике нагрузки.

**Ключевые слова:** ВВЭР-ТОИ, программа ИР, алгоритм, офсет, маневрирование.

EDN: RSRQJU

УДК 504.064.3, 551.46.077, 621.039.764

## Исследование выхода радиоактивности из АПЛ “Комсомолец” с помощью подводной гамма-спектрометрической аппаратуры

*А.Ю. Казеннов, С.А. Калмыков, О.Е. Кикнадзе, Н.Я. Книвель, А.В. Королев,  
А.О. Никитин,*

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

В статье приведён обзор основных результатов многолетнего изучения выхода радиоактивности из АПЛ К-278 “Комсомолец” в окружающую акваторию с помощью подводных гамма-спектрометров серии РЭМ, разработанных в НИЦ “Курчатовский институт”. Исследована динамика выхода радиоактивности из реакторного отсека АПЛ в морскую среду и сделаны выводы о состоянии защитных барьеров. Особое внимание уделено наиболее актуальным результатам, полученным во время обследования в 2022—2024 гг., которые могут служить основой для оценки угрозы для экосистемы Норвежского моря и показали необходимость долгосрочного мониторинга из-за продолжающейся коррозии ядерного топлива в активной зоне реактора. Предложена разработка автономной подводной станции для непрерывного мониторинга.

**Ключевые слова:** радиационное обследование, подводные гамма-спектрометры, АПЛ “Комсомолец”.

EDN: SOHJKR

УДК 621.039

## Кинетика накопления газообразных продуктов деления в буферном слое микротвэлов ВТГР

*Н.С. Безрук, А.С. Иванов,*

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

Проведён теоретический анализ механизмов выхода газообразных продуктов деления (ГПД) из топливного ядра в буферный слой микротвэла ВТГР — термически активируемой диффузии, радиационно-стимулированной диффузии, “прямой отдачи” и “нокаута”. Разработан расчётный код, с помощью которого выполнена оценка кинетики роста избыточного давления ксенона в температурном диапазоне 1000—1300 °С. Показано, что при низких температурах около 1000 °С вклад эффекта “прямой отдачи” в формирование давления сопоставим с диффузионным, а при температурах выше диффузия начинает доминировать. Выполнен анализ зависимости коэффициента диффузии от выгорания. Установлено, что наибольший вклад в выход ГПД вносит термически активируемая диффузия, усиливающаяся по мере выгорания топлива.

**Ключевые слова:** микротвэл, ксенон, криптон, диффузия, “нокаут”.

EDN: TIYGVA

УДК 621.039.53

## Динамический изгиб тепловыделяющих элементов в реакторах пульсирующего типа

*М.М. Подлесный, Е.П. Шабалин, А.А. Хассан,*

Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ), 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, д. 6

В статье представлен эффект динамического изгиба, характерный для пульсирующих реакторов вследствие наличия периодических импульсов мощности и неравномерного нейтронного потока в активной зоне реактора. Построена модель теплопередачи в одиночном твэле и рассмотрено нестационарное уравнение теплопроводности в изотропном приближении. Полученная функция распределения температуры топливных таблеток и оболочки в зависимости от времени, которая задаётся в качестве входного параметра с коэффициентом, соответствующим градиенту энерговыделения, используется в математической модели твэла для расчёта динамического поперечного изгиба оболочки. Обсуждаются результаты оценки динамического изгиба твэлов проектируемого реактора НЕПТУН.

**Ключевые слова:** пульсирующий ядерный реактор, твэл, динамический изгиб.

EDN: TWDOJL

УДК 621.039.536.2

## Оценка неоднородности свойств металла обечаек современных корпусов реакторов ВВЭР поколений 3 и 3+

*А.А. Чернобаева, Д.Ю. Ерак, О.Д. Чеботарёв, А.Д. Ерак, В.Б. Папина, Р.О. Полякова,*  
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,

*О.Б. Максимов,*

Филиал АО “АЭМ-технологии” “Ижора”, 196650, Санкт-Петербург, Колпино, ул. Финляндская, д. 13

Выполнен анализ результатов испытаний на ударный изгиб образцов из металла штатных заготовок для обечаек корпусов реакторов ВВЭР-1000/ВВЭР-1200. Показано, что значения критической температуры хрупкости ( $T_k$ ), полученные после термической обработки по “минимальному” и “максимальному” циклу, можно рассматривать как единый массив данных. Проведена оценка различий в значениях  $T_k$ , полученных с использованием двух методик, указанных в ПНАЭ Г-7-002-86 и ГОСТ Р 50.05.12-2018, которая показала, что значения  $T_k$ , определённые в соответствии с ГОСТ Р 50.05.12-2018, систематически ниже на 19—39 °С значений  $T_k$ , определённых в соответствии с ПНАЭ Г-7-002-86. Значения  $T_k$ , полученные при испытаниях металла пробного кольца даже с учётом методической поправки, регулярно ниже значений  $T_k$ , получаемых при испытаниях образцов-свидетелей, которые вырезаются из кольца, примыкающего непосредственно к металлу обечайки и на расстоянии не менее 70 мм от теплового барьера. Показано, что неоднородность металла пробного кольца выше, чем металла кольца для образцов-свидетелей. Выполнена оценка величины неоднородности металла обечаек корпусов реакторов ВВЭР-1000/1200 в азимутальном направлении.

**Ключевые слова:** ВВЭР, обечайка корпуса реактора, термическая обработка, критическая температура хрупкости, стандартное отклонение.

EDN: UKHYSG

УДК 532.529

## **Инженерная методика оценки повышения давления при конденсационном гидравлическом ударе**

*А.Н. Чуркин,*

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

В статье рассматривается актуальная задача по анализу конденсационных гидравлических ударов (КГУ) в трубопроводах реакторных установок ВВЭР. Поскольку КГУ является существенно неравновесным процессом и протекает в условиях неустойчивой структуры двухфазного потока, в настоящее время не существует достаточно надёжных методик предсказания их возникновения, особенно для сложной геометрии реальных трубопроводов. Поэтому в ряде случаев при выполнении обоснования конструкции приходится постулировать возникновение КГУ. При этом появляется другая важная задача — оценка значения ударного давления, т.е. оценка повышения давления при КГУ. В статье представлено описание разработанной автором инженерной методики расчётной оценки повышения давления при возникновении КГУ в трубопроводах. Рассмотрено несколько вариантов методических допущений, и на тестовой задаче оценены отличия результатов расчётов для каждого варианта методики. По результатам работы делается вывод о возможности применения инженерной методики в расчётах по обоснованию проектов реакторных установок.

**Ключевые слова:** конденсационный гидравлический удар, трубопровод, ударное давление, скорость водяной пробки, инженерная методика расчёта, ВВЭР.

EDN: VMVHMR

УДК: 621.039.58

## **О технологиях и оборудовании для обезжелезивания водного теплоносителя одноконтурного ВВЭР-СКД.**

### **Часть 2. О целесообразности дозирования цинка в теплоноситель ВВЭР-СКД**

*Е.Б. Юрчевский, И.А. Чусов, В.П. Семишкин, О.А. Алёшина,*

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

*В.М. Кузнецов,*

ООО “Группа Компаний ИнтеллектСервис”, 115088, Москва, ул. Угрешская, д. 2

В первой части настоящей статьи [1] рассмотрены системы обезжелезивания питательной воды для одноконтурного реактора ВВЭР-СКД с использованием насыпных высокотемпературных фильтров, загруженных пористым титаном, а также электромагнитных обезжелезивающих фильтров. Во второй части статьи проанализирована возможность использования дозирования соединений цинка в теплоноситель для снижения радиационных полей, интенсивности общей коррозии и коррозионного растрескивания под напряжением применительно к условиям эксплуатации ВВЭР-СКД. Рассмотрен российский опыт в этой области, полученный в процессе изучения нейтрального и кислородного режимов на отечественной атомной энергоустановке ВК-50. Приведён зарубежный опыт дозирования цинка в водный теплоноситель. Авторами статьи показано, что дозирование ацетата цинка в теплоноситель ВВЭР-СКД неизбежно повысит удельную электропроводимость теплоносителя. Радиационное и термическое воздействие на дозируемый ацетат цинка обусловит появление в теплоносителе уксусной кислоты и других веществ кислого характера, что повысит коррозионную агрессивность этой среды. Разложение ацетата цинка также может приводить к образованию опасных углеродистых отложений на поверхности оболочек твэлов. Важнейшей проблемой для всех технологий дозирования цинка в теплоноситель прямоточного ВВЭР-СКД станет вывод из теплоносителя радиоактивных продуктов коррозии, вытесняемых из поверхностных плёнок на металле после дозирования цинка, а также всплески активности радионуклидов, в первую очередь,  $^{60}\text{Co}$  и  $^{58}\text{Co}$ . По названным причинам дозирование цинка в водный теплоноситель не может быть рекомендовано для ВВЭР-СКД.

**Ключевые слова:** корпусной одноконтурный атомный энергетический водоохлаждаемый реактор, сверхкритические параметры, водно-химический режим, дозирование цинка в водный теплоноситель.

EDN: XSNPOM