

УДК 621.039

**О технологической платформе нового этапа ядерной энергетики**

*А.Ю. Гагаринский,*

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

В экспертном сообществе растут ожидания нового этапа в использовании атомной энергии, когда широко предсказываемый “энергетический переход” к низкоуглеродным технологиям будет сопровождаться качественным ростом ядерного сектора. Темпы предсказываемого роста использования возобновляемых источников энергии, сильно зависящие от политики национальных правительств в области декарбонизации, будут сдерживаться отсутствием развитых эффективных технологий длительного хранения энергии и, как следствие, создавать стимул для “тандема” ядерной энергии и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергетических системах. В статье обсуждается технологическая платформа, с которой ядерная энергетика предполагает вступить в новый этап своего развития, а также “лист ожидания” перспективных реакторных технологий.

**Ключевые слова:** ядерная энергетика, реакторная технологическая платформа, водоохлаждаемые ядерные реакторы, реакторы на быстрых нейтронах.

УДК 621.039.53; 621.039.633

**Экспериментальный комплекс НИЦ “Курчатовский институт” для испытаний конструкционных материалов ЖСР**

*С.С. Абалин, А.М. Березов, В.А. Загрядский, В.В. Игнатъев, П.Н. Ивлиев, С.А. Конаков, Я.М. Кравец, Т.Ю. Маламут, В.И. Новиков, А.В. Овчаров, И.И. Скобелин, А.И. Суренков, И.Н. Трунькин, В.Н. Унежьев, О.С. Фейнберг, А.В. Шинкарёв,*

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

На площадке НИЦ “Курчатовский институт” создан экспериментальный комплекс, предназначенный для проведения многофакторных испытаний материалов ЖСР. Комплекс позволяет имплантировать гелий и(или) водород в образцы конструкционных материалов на циклотроне У-150, имитируя результат длительного нейтронного воздействия, проводить механические испытания и микроструктурные исследования до и после имитационного воздействия, испытывать совместимость конструкционных материалов до и после имитационного воздействия с топливной солью в неизотермических динамических условиях при температурах до 750 °С с контролем окислительно-восстановительного потенциала расплава. Предварительные испытания образцов никель-молибденового сплава ХН80МТ продемонстрировали работоспособность предлагаемой методики. Концентрация ядер гелия в образцах сплава составила ~150 ppm примерно за 10 часов облучения.

**Ключевые слова:** никель-молибденовые сплавы, высокотемпературное гелиевое охрупчивание, жидкосольевой ядерный реактор, коррозия, расплавы солей фторидов металлов, циклотрон, ядра <sup>4</sup>He, активационная методика, гамма-спектрометр, экспериментальный комплекс, имитационное воздействие.

УДК 621.039.5

## Определение энерговыделения от гамма-излучения в экспериментальных каналах реактора ИР-8

**В.В. Трофимчук, В.А. Насонов, Д.Ю. Ерак, Ю.Е. Песня, А.Е. Кругликов, О.В. Михин,**  
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

В работе представлен подход к расчётно-экспериментальному определению энерговыделения от поглощения гамма-излучения в различных материалах в экспериментальных каналах исследовательского реактора ИР-8. В ходе расчётного сопровождения экспериментов определяются основные параметры облучения, в том числе энерговыделение за счёт поглощения гамма-излучения в образцах и элементах конструкции облучательных устройств. Полученные значения используются для предварительного определения температурного режима облучения образцов, а также для подтверждения требуемых условий облучения. Для проверки получаемых расчётным путём параметров облучения образцов проведена серия calorиметрических экспериментов по определению гамма-разогрева в экспериментальных каналах активной зоны и отражателя реактора ИР-8.

**Ключевые слова:** ИР-8, облучательные эксперименты, calorиметрические устройства, гамма-излучение, радиационное энерговыделение, температура образцов.

УДК 621.039-78

## Пропускание нейтронов монокристаллом германата висмута

**П.П. Паршин, П.А. Борисова, В.П. Глазков, Е.В. Дюжева-Мальцева, В.Т. Эм,**  
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Экспериментально и теоретически исследовано влияние неупругого рассеяния на пропускание нейтронов монокристаллом  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (BGO). Приводятся результаты эксперимента по измерению температурной зависимости пропускания монохроматических нейтронов монокристаллом BGO. Зависимость, полученная в эксперименте, хорошо описывается расчётом, основанным на учёте неупругого рассеяния нейтронов на фонах. Проведённый анализ указывает на существование не зависящего от температуры вклада в полное сечение взаимодействия нейтронов с монокристаллом BGO. Предполагается, что этот вклад обусловлен присутствием в исследованном образце небольшого количества примесей, сильно поглощающих нейтроны.

**Ключевые слова:** монокристалл германата висмута, пропускание нейтронов, парциальные спектры тепловых колебаний атомов, сечение неупругого рассеяния нейтронов.

УДК 621.039.517

## Энерговыделение делящихся изотопов урана и плутония в активной зоне ядерного реактора

**В.И. Копейкин,**  
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,  
**Д.В. Попов, М.Д. Скорохватов,**  
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1,  
НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Каширское ш., д. 31

На основании уточнения энергетических характеристик излучения реакторных антинейтрино был выполнен новый расчёт энергии, выделяемой в процессах деления изотопов  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$  в активной зоне ядерного реактора. В расчётах были использованы данные реконструкции спектров антинейтрино [1] по результатам эксперимента НИЦ “Курчатовский институт” [2] на

исследовательском реакторе ИР-8, а также расчётные спектры антинейтрино [3, 4] и обновлённая информация баз ядерных данных [5–8].

**Ключевые слова:** энергия деления, ядерный реактор, мощность реактора, антинейтрино.

УДК 621.039.52

### **Об условиях развития нейтронно-физических механизмов неустойчивости на части групп излучателей запаздывающих нейтронов**

**Д.Г. Кресов,**

АО “ОКБМ Африкантов”, 603074, Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, д. 15

Для ряда известных моделей-механизмов, образованных цепью отрицательных обратных связей “мощность–температура (плотность)–реактивность–мощность”, теоретически подтверждена возможность реализации колебательной неустойчивости на части групп запаздывающих нейтронов с малыми периодами распада. При этом для реализации неустойчивости на меньшем количестве групп требуется больший коэффициент усиления цепи обратной связи. Отмечены параметрические и режимные условия, стабилизирующие систему.

**Ключевые слова:** кинетика, группа излучателей запаздывающих нейтронов, фазовое запаздывание, неустойчивость, теплогидравлическая инерционность.

УДК 621.039.562

### **Оптимальная стабилизация мощности реактора с предварительной идентификацией его характеристик в условиях неконтролируемых внешних воздействий**

**А.М. Дегтярев,**

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

Рассмотрена принципиальная возможность идентификации кинетических характеристик реактора в квазистационарных условиях работы по наблюдению за флюктуациями его мощности под влиянием контролируемых изменений реактивности, а также возможность оптимальной стабилизации мощности реактора. Анализ проводится в условиях воздействия на реактивность реактора и измерение его мощности мешающих возмущений в виде неконтролируемых случайных процессов. Используется модель точечной кинетики реактора с одной группой запаздывающих нейтронов и мгновенной обратной связью по мощности. Представлены примеры, иллюстрирующие предложенный метод идентификации и эффективность оптимального регулятора.

**Ключевые слова:** реактор, идентификация, стабилизация мощности, оптимизация управления, случайные помехи.

УДК 621.039.51

### **Валидация библиотеки ENDF/B-7.1 в расчётах критических сборок ПИК-04**

**М.С. Онегин,**

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

Для критическихборок ПИК-04, представляющих собой кольцевые зоны из твэлов типа ПИК в воде, выполнены расчёты эффективного коэффициента размножения  $k_{эф}$ . Среднее значение  $k_{эф}$  для семиборок, рассчитанное по программам MCNP-6.1 и SCALE-6.2.4 с библиотекой ядерных данных ENDF/B-7.1, равняется 1,0016 со статистическим разбросом  $\pm 0,0004$ . Среднее значение  $k_{эф}$ , рассчитанное с использованием библиотеки ENDF/B-6.2, больше на 0,0023.

**Ключевые слова:** критическая сборка, твэлы типа ПИК, библиотека ENDF/B-7.1, валидация.

УДК 621.039.55

**Сравнение влияния неопределённостей ядерных данных на точность предсказания изотопного состава для UO<sub>2</sub>- и MOX-топлива в расчётах выгорания на примере ячейки реактора PWR**

*А.Н. Писарев, В.В. Колесов,*

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

Проведена оценка погрешности расчётных значений ядерных концентраций нуклидов при выгорании UO<sub>2</sub>- и MOX-топлива в ячейке PWR, обусловленной погрешностью в плотности потока нейтронов и неопределённостями сечений из библиотеки JEFF-3.3. Показано, что имеет место разница между константными компонентами погрешности для указанных видов топлива. Эта разница уменьшается с ростом глубины выгорания топлива.

**Ключевые слова:** среднеквадратичные отклонения ядерных концентраций нуклидов, выгорание топлива, неопределённости ядерных данных.

УДК 621.039

**Верификационные исследования программы MNT-CUDA на водо-водяных и быстрых системах**

*В.А. Варфоломеева, Н.А. Грушин, И.Е. Иванов, С.А. Бычков,*

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

В статье приводятся результаты первого этапа верификации инженерной программы повышенной точности MNT-CUDA на периодических решётках водо-водяных и быстрых систем. В данной программе используется распараллеливание вычислений на графических процессорах, что позволяет значительно сократить время расчётов. MNT-CUDA (версия 2.0) решает уравнение переноса нейтронов методом Монте-Карло и позволяет детально описывать геометрию всей системы или её отдельных частей при расчёте. Проводится сравнение коэффициентов размножения, а также детальное сравнение полей и скоростей реакций в различных зонах систем в групповом представлении с соответствующими значениями, полученными по прецизионной программе MCU-6.

**Ключевые слова:** метод Монте-Карло, программа MNT-CUDA, графические процессоры, MCU, верификация, нейтронно-физические характеристики.

УДК 621.039.58

**О радиоуглероде в уран-графитовых реакторах**

*Г.Б. Давыдова, А.В. Краюшкин, А.К. Смирнова,*

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

Обсуждаются вопросы обращения с реакторным графитом. Проводится сравнение содержания <sup>14</sup>C в графите РБМК с природным содержанием и выбросами от других техногенных воздействий. Обсуждаются масштабы естественных колебаний природного содержания <sup>14</sup>C и их соотношение с техногенными воздействиями. Оцениваются возможные дозы за счёт выхода <sup>14</sup>C из гипотетического приповерхностного хранилища реакторного графита при нормальной эксплуатации и авариях.

**Ключевые слова:** графит, радиоуглерод, уран-графитовые реакторы.

УДК 629.039.58

## **Запроектная авария с полным обесточиванием РБМК. Анализ возможности возникновения повторной критичности**

*А.В. Краюшкин, И.А. Тупилов,*

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

С использованием трёхмерной программы STEPAN-T, разработанной специально для моделирования аварии с полным обесточиванием РБМК, исследуется влияние различных аварийных событий на величину реактивности в ходе тяжёлой стадии аварии. Приведены максимальные и средние температуры для графита и топлива, температуры металлоконструкций нижней опоры и биологической защиты (схемы ОР), а также хронология разрушений элементов активной зоны до начала разрушения топлива. Показан эффект реактивности от разогрева графита. Рассмотрены эффекты реактивности от плавления алюминиевых гильз стержней кластерного регулирующего органа (КРО), оболочек укороченных стержней поглотителя (УСП) и стержней аварийной защиты (АЗ). Проведён анализ сценария, когда вследствие ухода алюминиевых гильз стержней КРО поглощающие элементы, теряя дистанцирование, образуют плотный пучок. Рассмотрен сценарий с обрывом лент сервоприводов стержней КРО и уходом поглощающих элементов под активную зону, оценено влияние данного инцидента на реактивность. Оценено влияние на реактивность образования “топливных столбов”, получившихся в результате разрушения ТВС. Оценено влияние выхода продуктов деления и эрбия на величину реактивности. Также был проведён расчёт реактивности для всех описанных случаев, но при сниженных температурах, которые могут иметь место при охлаждении аварийного реактора.

**Ключевые слова:** тяжёлая авария, эффекты реактивности, РБМК, STEPAN-T.

УДК 621.039.564

## **Использование оптоволоконных измерительных систем при управлении ресурсными характеристиками АЭС с РБМК-1000**

*А.Н. Бирюков, А.В. Слободчиков,*

АО “НИКИЭТ”, 107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8,

*И.Н. Ложников,*

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

*А.В. Шутиков,*

АО “Концерн Росэнергоатом”, 115191, Москва, Холодильный пер., д. 3а

Обсуждаются два способа контроля топливных (технологических) каналов на завершающих этапах эксплуатации АЭС с РБМК-1000 для оценки их пространственного искривления. Контроль выполняется с целью оценки формоизменения графитовой кладки, определения необходимости и объёма ремонта элементов активной зоны реактора в рамках работ по управлению ресурсными характеристиками (УРХ), планирования послеремонтного периода эксплуатации реакторной установки. Представленный в статье способ контроля с использованием оптоволоконной измерительной системы ИКС-49 не требует выгрузки тепловыделяющих сборок из каналов и позволяет существенно сократить сроки выполнения плановых ремонтных работ на АЭС, обеспечивая при этом достаточную степень точности. Приведены описание принципа действия измерительной системы на основе оптоволоконных датчиков и основные технические характеристики. Выполнена оценка фактического сокращения срока ремонта реакторной установки и оценен экономический эффект при применении системы ИКС-49 на примере референтного календарно-сетевого графика ремонта с внутрореакторным контролем при УРХ графитовой кладки энергоблока № 3 Ленинградской АЭС в 2020 г.

**Ключевые слова:** РБМК, искривление, управление ресурсом, внутрореакторный контроль, оптоволоконная измерительная система.

УДК 621.3.002

**Анализ показаний фоновых жил внутриреакторных детекторов**

*А.М. Мусихин, Н.В. Мильто, А.Ю. Курченков, Д.Н. Скороходов, Д.А. Карасев,  
А.И. Верещака, Д.С. Марков,*

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

Анализируются показания фоновых жил ДПЗ. Предлагается к рассмотрению новый способ независимой оценки тепловой мощности реактора.

**Ключевые слова:** детектор прямого заряда (ДПЗ), фоновый детектор, система внутриреакторного контроля (СВРК).

УДК 621.039.5

**Программа РС расчёта доз от радиоактивных выбросов в атмосферу**

*И.Н. Гераскин, А.В. Краюшкин, А.К. Смирнова,*

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

Представлено описание модели для расчёта доз внешнего облучения от поверхности и облака, внутреннего облучения за счёт ингаляции и по пищевым цепочкам, заложенной в программном средстве РС, которое используется для расчётов доз облучения населения при аварийных кратковременных выбросах и непрерывных выбросах при нормальной эксплуатации объектов использования атомной энергии. В статье описываются особенности программного средства, такие как учёт аэродинамической тени и модели линейного источника. Приведены результаты верификации программы с использованием экспериментальных данных по переносу аэрозолей и результатов расчётов по аттестованной программе НОСТРАДАМУС. Также проведено сравнение результатов расчётов и измерений доз после аварии на ЧАЭС и в результате непрерывных выбросов реакторов НИИАР.

**Ключевые слова:** дозы облучения, авария, радиационная безопасность, радиоактивный выброс.

УДК 621.039.536.2

**Анализ причин измельчения аустенитного зерна в металле ЗТВ в процессе термического цикла сварки**

*А.А. Чернобаева, Д.Ю. Ерак, Р.О. Полякова, О.Д. Чеботарёв, Ю.Е. Песня,  
В.В. Трофимчук,*

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

Детально исследовано распределение размеров “бывших” аустенитных зёрен в металле ЗТВ сварного соединения из стали 15Х2НМФАА. Выполнено расчётное моделирование термического цикла сварки с целью оценки распределения максимальных значений температуры и скорости нагрева в зоне термического влияния. Работа направлена на анализ причин измельчения аустенитного зерна металла обечайки в ЗТВ за счёт термического цикла сварки.

**Ключевые слова:** корпус реактора, зона термического влияния, моделирование цикла сварки.

УДК 621.039.56

**Особенности опыта организации и выполнения работ по выводу из эксплуатации блоков АЭС за рубежом: анализ, выводы и рекомендации**

***Ю.М. Семченков, Б.К. Былкин, Ю.А. Зверков,***

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

***П.Л. Ипатов, В.Г. Волков, Ф.Т. Морозов,***

АО “Концерн Росэнергоатом”, 109507, Москва, ул. Ферганская, д. 25,

***Н.Н. Сафронова,***

Ассоциация организаций строительного комплекса атомной отрасли, 117342, Москва, ул.

Профсоюзная, д. 65/1, стр. 1,

***И.И. Корнеев,***

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

В статье представлены итоговые результаты анализа особенностей опыта организации и выполнения работ при выводе из эксплуатации блоков АЭС за рубежом. Среди зарубежных стран в качестве референтных были рассмотрены США, Германия, Франция, Великобритания, Швеция, Япония и некоторые другие. Сделаны выводы и даны рекомендации по учёту накопленного зарубежного опыта применительно к выводу из эксплуатации российских АЭС.

**Ключевые слова:** АЭС, вывод из эксплуатации, рост рынка работ и услуг, рекомендации МАГАТЭ, реализуемые подходы и технические решения, внедрение инновационных технических решений и технологий, энергетические компании, эксплуатирующие организации, организационная и структурная трансформация.