

УДК 621.039.514

**Пространственная интегральная модель нейтронной кинетики
с использованием метода Монте-Карло**

А.А. Панченко, В.В. Тебин,

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

В статье описана модель пространственной кинетики на основе интегрального представления уравнения Больцмана. Метод базируется на интегрировании матриц деления по времени жизни нейтронов с учётом запаздывающих нейтронов. Введено понятие коэффициента критичности, который характеризует размножающие свойства системы в нестационарном процессе.

Модель пространственной кинетики реализована как часть пакета программ САПФИР. С помощью программы GS63, входящей в состав пакета, решается спектральная задача для фрагментов размножающей системы и рассчитываются макросечения в 26-групповом приближении. С помощью программы XT26 выполняется расчёт размножающей системы методом Монте-Карло.

Выполнен тестовый расчёт модельной задачи.

Ключевые слова: пространственная нейтронная кинетика, метод Монте-Карло, ядерный реактор.

EDN: EKUBGZ

УДК 621.039.5

**Расчёты трёхмерных тестов пространственной кинетики
бенчмарка C5G7-TD с мгновенным выбросом групп стержней
по программе SUHAM-TD**

В.Ф. Бояринов,

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

Бенчмарк C5G7-TD (модель водо-водяного реактора) разработан в рамках проекта Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ ОЭСР) с целью верификации программ, предназначенных для решения нестационарного уравнения переноса нейтронов без обратных связей. В последних спецификациях бенчмарка C5G7-TD (v. 1.8, 1.9) дополнительно введено описание тестов с положительной введённой реактивностью. Введение положительной реактивности достигается удалением групп управляющих стержней из активной зоны. По программе SUHAM-TD рассчитано три трёхмерных теста с мгновенным выбросом трёх различных групп стержней. Для каждого теста рассчитаны зависимости от времени следующих величин: полной мощности бенчмарк-модели реактора, мощности топливных сборок, реактивности.

Цель работы — привлечь внимание к возможности сравнения различных методов и программ трёхмерного расчёта пространственной кинетики (при введении положительной реактивности) с использованием бенчмарка C5G7-TD и предоставить первые результаты расчётов для такого сравнения.

Ключевые слова: бенчмарк C5G7-TD, метод поверхностных гармоник, уравнение переноса нейтронов, программа SUHAM-TD, тесты с мгновенным выбросом групп стержней.

EDN: IH5OQO

УДК 621.039.5

Активная зона канального реактора для накопления кобальта-60

И.А. Базулин, Г.Б. Давыдова, И.А. Тупотилов, А.М. Федосов,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Представлена концепция уран-графитового реактора для производства кобальта-60 (^{60}Co) и других радиоактивных изотопов, позволяющая существенно повысить скорость производства ^{60}Co по сравнению с РБМК-1000 за счёт увеличения потока нейтронов и увеличения числа сборок с кобальтом. Повышение энергонапряжённости активной зоны достигается за счёт уменьшения диаметра твэлов и размещенияборок с кобальтом в каналах контура СУЗ с относительно низкой температурой воды. Предлагаются меры, предохраняющие от появления трещин в графитовых блоках и искривления каналов.

Ключевые слова: радиоактивный кобальт, канальный реактор, графит, удельная активность.

EDN: MBFKKG

УДК 621.039

Совершенствование методики обработки результатов измерений парового коэффициента реактивности реакторов РБМК

И.Е. Иванов, И.Ф. Моисеев, В.Е. Дружинин,
АО “ВНИИАЭС”, 109507, Москва, ул. Ферганская, д. 25,
И.А. Прохоров,
АО “ВНИИАЭС”, 109507, Москва, ул. Ферганская, д. 25,
ФГБОУ ВО “НИУ “МЭИ”, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1

Паровой коэффициент реактивности является одной из наиболее важных нейтронно-физических характеристик реакторов РБМК-1000, характеризующей безопасность реакторной установки и в значительной мере определяющей решения по формированию загрузки активных зон. В связи с этим к контролю величины парового коэффициента реактивности предъявляются высокие требования. Оценка парового коэффициента реактивности выполняется методом косвенных измерений реактивности и технологических параметров реактора при возмущениях расхода питательной воды на энергетическом уровне мощности. В статье рассмотрен подход, позволяющий снизить неопределённость оценки парового коэффициента реактивности, обусловленную “экспертным” выбором значений технологических параметров, используемых для теплогидравлического расчёта и вычисления парового коэффициента реактивности.

Ключевые слова: РБМК-1000, реактивность, паровой коэффициент реактивности, неопределённость измерений.

EDN: OBLTMB

УДК 621.039.51

Температурные режимы обезвоженного бассейна выдержки отработавшего топлива РБМК

А.М. Федосов, А.М. Осипов, А.В. Глембоцкий, Л.Н. Захарова,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

В статье анализируется изменение температуры в бассейне выдержки отработавшего топлива РБМК в аварии с его полным обезвоживанием. Для этого была разработана двумерная модель бассейна, учитывающая конвекцию и излучение, реализованная в программе TRANS.

При управлении запроектной аварией бассейна выдержки с потерей теплоносителя применяется охлаждение стен водой с подключением мобильной техники. Однако при экстремальных воздействиях система охлаждения может быть разрушена. Расчётами показано, что в некоторых случаях теплоотвод за счёт конвекции воздуха позволяет сохранить целостность оболочек твэлов, бетона и балок щелевого перекрытия. Необходимым условием является поступление в объём бассейна достаточного количества холодного воздуха либо через отверстие на дне, либо из центрального зала при открытии крышек щелевого перекрытия.

Ключевые слова: РБМК, бассейн выдержки отработавшего топлива, запроектная авария, обезвоживание бассейна, конвекция, излучение.

EDN: ZDNQNI

УДК 621.039

Моделирование режима с функциональным отказом основного регулятора уровня в деаэраторе питательной воды на энергоблоке с реактором ВВЭР-1200

Д.А. Горностаев, А.В. Будников, А.С. Колокол, П.А. Логинов, А.В. Фомин,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Математическое моделирование является одним из наиболее широко применяемых инструментов для решения задач различных отраслей науки и производства, в частности, в атомной энергетике. В качестве инструментария для моделирования в данной работе используется программный комплекс ПРИМ-АЭС, разработанный в НИЦ “Курчатовский институт”. Применяемое программное средство ориентировано на моделирование режимов нормальной эксплуатации АЭС и нарушений условий нормальной эксплуатации АЭС и обладает широким спектром возможностей в части расчётного анализа нейтронно-физических, теплогидравлических и автоматизированных процессов систем управления на энергоблоках АЭС с реакторами ВВЭР.

Выполнено расчётное моделирование аварийного режима на энергоблоке с реактором ВВЭР-1200, произошедшего вследствие отказа регулятора уровня в деаэраторе питательной воды. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов с архивными данными. По итогам моделирования сделаны выводы в отношении корректности работы программного комплекса, а также о перспективах его дальнейшего использования.

Ключевые слова: математическое моделирование, теплогидравлический расчёт, динамические процессы, энергоблок, система управления, функциональный отказ, системы безопасности.

EDN: FIVWFZ

УДК 621.039.586

Моделирование теплообмена излучением применительно к процессу локализации расплава в УЛР ВВЭР-ТОИ

И.А. Мельников, Г.Б. Шмельков, М.А. Голубев,

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

В настоящей работе представлены результаты моделирования теплообмена излучением на внекорпусной стадии тяжёлой аварии в ходе локализации расплава в устройстве локализации расплава (УЛР) проекта ВВЭР-ТОИ. Расчёт теплообмена излучением проведён программным модулем THERA пакета прикладных программ TSAR, разрабатываемым в НИЦ “Курчатовский институт”. В основе реализованной в THERA расчётной методики лежит зональный метод расчёта теплообмена излучением с учётом поглощающих свойств парогазовой смеси в объёме расчётной области с помощью модели взвешенной суммы серых газов на основе спектральных линий SLWSGG (spectral line based weighted sum of gray gases — SLWSGG). Получены и проанализированы зависимости осреднённой плотности теплового потока результирующего излучения от времени для характерных поверхностей расчётной области УЛР.

Ключевые слова: ВВЭР, тяжёлая авария, УЛР, теплообмен излучением, расплав, кориум.

EDN: GBGVEP

УДК 621.039

Применение нейронных сетей для получения быстрых расчётных оценок последствий аварии в рамках задач аварийного реагирования

М.И. Делова, А.Е. Киселев, М.Ф. Филиппов, А.А. Канаев,
ФГБУН ИБРАЭ РАН, 115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52

Статья посвящена анализу использования применения нейронных сетей для предварительного прогнозирования результатов расчётов проектных и запроектных аварий. Представлено описание разработанного подхода, а также продемонстрированы результаты применения созданной и обученной в рамках данного подхода нейросетевой модели на примере аварии “Обесточивание при работе реакторной установки на энергетических уровнях мощности на АЭС с ВВЭР-1000”.

Ключевые слова: аварийное реагирование, нейронные сети.

EDN: PKJPMQ

УДК 621.039.586

Применение нейронной сети для отбора состояний при анализе ядерной безопасности в запроектной аварии с потерей теплоносителя

А.С. Глазков, А.Э. Борисенков, Д.Т. Иванов,
НИЦ “Курчатовский институт”, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

В статье рассматривается вопрос возможности использования искусственных нейронных сетей для оптимизации анализа ядерной безопасности. В соответствии с требованиями нормативных документов анализ ядерной безопасности при запроектных авариях на атомных станциях должен проводиться с использованием реалистичного подхода, который в большинстве случаев подразумевает под собой экспертную оценку. Для рассмотрения запроектной аварии с выкипанием теплоносителя в реакторе типа ВВЭР-1000 в момент перегрузки применение экспертной оценки затруднительно. Предложена методика, позволяющая проводить анализ ядерной безопасности с использованием элементов искусственного интеллекта в рамках реалистичного подхода без применения экспертной оценки.

Ключевые слова: анализ ядерной безопасности, ВВЭР, запроектная авария, повторная критичность, метод Монте-Карло, нейронные сети.

EDN: QZLFPL

УДК 004.896

Разработка методики оценки чувствительности и неопределённости для анализа тяжёлых аварий на РУ с ВВЭР

А.В. Николаева,

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

Проведение анализов неопределённости и/или чувствительности для анализов безопасности, включая детерминистические расчёты тяжёлых аварий (ТА), в Российской Федерации является обязательным в соответствии с НП-001-15, РБ-166-20. Несмотря на то, что методология анализов чувствительности и неопределённости успешно развивается, все ещё существует ряд нерешённых вопросов в части анализов ТА.

Приведена методика анализа чувствительности и неопределённости на основе применения метода Монте-Карло, разработанная для внутрикорпусной стадии ТА на реакторной установке (РУ) с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР), а также результаты её апробации. Перечень входных параметров, варьируемых в рамках их неопределённостей, основан на данных из проектной и справочной документации. Необходимое количество расчётов в рамках анализа неопределённости устанавливается на основе формулы Уилкса и уточняется на основе оценки сходимости средних значений всех значимых параметров расчёта и их нормальных отклонений. Для определения наличия корреляции между величиной значимого параметра и варьируемыми входными параметрами вычисляются коэффициенты корреляции (Спирмана, Пирсона и Кендалла). Основные принципы применения предлагаемой методики показаны для сценария ТА “Полное обесточивание АЭС с отказом дизель-генераторов” на АЭС с ВВЭР-1000.

Ключевые слова: тяжёлая авария, анализ, неопределённость, чувствительность, методика, ВВЭР, СОКРАТ.

EDN: TJGGLJ

УДК 621.039.531, 620.186.1

Закономерности радиационно-индуцированного фазообразования в сталях реакторов ВВЭР

С.В. Федотова,

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

Е.А. Кулешова,

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

На основании атомно-зондовых исследований применяемых и перспективных материалов корпусов реакторов (КР) и внутрикорпусных устройств (ВКУ) после нейтронного облучения в различных условиях проанализированы и выявлены общие закономерности фазообразования. Предположено, что в сталях КР и ВКУ в зависимости от состава и условий облучения образуются два типа преципитатов: на основе Cu в КР и Ni—Al—Cu—Ti (γ' -фаза) в ВКУ, зарождающиеся в каскадах, а также на основе Ni—Si—Mn в КР и Ni—Si—Ti (G-фаза) в ВКУ, образующиеся в результате радиационно-индуцированной сегрегации на различных стоках. Темп накопления преципитатов снижается по мере увеличения накопленной дозы, что указывает на снижение вклада фазообразования в изменение свойств КР и ВКУ при продлённом сроке эксплуатации.

Ключевые слова: корпус реактора, внутрикорпусные устройства, перлитная сталь, аустенитная сталь, нейтронное облучение, радиационно-индуцированная сегрегация, фазообразование, атомно-зондовая томография.

EDN: UAARDD

УДК 621.039

**Разработка модели сухого осаждения в коде РОМ и её применение
на многолетних метеорологических данных для территорий
вокруг 10 АЭС**

А.А. Киселев, В.В. Сушков,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного
развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН),
115191, Москва, ул. Большая Тульская, д. 52

Представлены результаты разработки резистивной модели сухого осаждения аэрозоля для новой версии кода РОМ, созданного на базе кода НОСТРАДАМУС. Выполнена валидация модели на экспериментальных данных с учётом особенностей подготовки исходных данных. На базе кода РОМ проведена оценка скоростей сухого осаждения негигроскопичного аэрозоля вокруг 10 российских АЭС (на 2021—2023 гг.) для размерного спектра аэрозоли, соответствующего условному аварийному выбросу. Результаты оценки показали, что абсолютные значения скоростей осаждения отличаются в зависимости от региона для вегетирующих поверхностей до 9 раз, для не вегетирующих — до 3 раз, при этом корреляция между скоростями осаждения сохраняется и соответствует принятым в международных моделях поправочным множителям.

Ключевые слова: АЭС, аварийный выброс, атмосферный перенос, сухое осаждение, резистивная модель.

EDN: XAYTJF