

Аннотации статей
журнала “Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов”,
вып. № 4, 2024 г.

УДК 621.039.56

Обоснование безопасности ядерных реакторов в режимах маневрирования
как новый класс вычислительных задач

М.А. Увакин,

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

В статье представлен обзор отечественной и мировой практики развития средств и методов, направленных на обоснование безопасности ядерных реакторов с учетом работы в маневренных режимах. На конкретных примерах показано, что исторически сложившееся решение такой задачи проводилось фактически для условия значительных ограничений и приближений в части продолжительности и скорости маневрирования, а также динамического поведения поля энерговыделения. При этом определяется и обосновывается ряд факторов, имеющих принципиальное значение для безопасности ядерного реактора при маневрировании мощностью. В результате обзора делается практически значимый вывод о том, что выполнение современных требований к маневренным режимам формирует новый класс задач в области обоснования безопасности, относящийся к более высокому уровню вычислительной сложности. Решение таких задач выполняется для значительно увеличенного объема исходных данных, который позволяет полноценно учитывать влияние маневрирования на безопасность.

Ключевые слова: обоснование безопасности, маневренные режимы, математическое моделирование, динамическое исходное состояние, ошибка оператора, локальные защиты, искусственный интеллект.

EDN: YEDZZC

УДК 621.311.25:621.039.5

Испытания режима естественной циркуляции теплоносителя
на энергоблоках с ВВЭР-1200

Ю.В. Саунин, Д.В. Маркин,

АО “Атомтехэнерго”, Нововоронежский филиал “Нововоронежатомтехэнерго”,
396072, Нововоронеж, Воронежская обл., Южное шоссе, д. 1

По результатам испытаний на четырёх энергоблоках с ВВЭР-1200 подтверждены переход на режим естественной циркуляции при прекращении принудительной циркуляции теплоносителя и возможность достижения максимально допустимого уровня мощности реактора для данного испытания. Внесены изменения в критерии успешности испытаний, обеспечивающие более корректную оценку достижения целей испытаний. Показана целесообразность внедрения методологии моделирования в практику физических и динамических испытаний при вводе энергоблоков АЭС с ВВЭР в эксплуатацию. Получены данные для валидации расчётной модели, используемой в расчётах по обоснованию безопасности проекта АЭС-2006, даны рекомендации по внедрению в систему внутриреакторного контроля алгоритмов, обеспечивающих более представительный контроль в режимах на малых уровнях мощности и в режиме естественной циркуляции.

Ключевые слова: естественная циркуляция, реактор, парогенератор, мощность реактора, холодная нитка, горячая нитка, тепловыделяющая сборка, внутриреакторный контроль.

EDN: LNEYFD

УДК 621.039.56

Метод оценки коэффициентов неравномерности энерговыделения РУ ВВЭР в динамических процессах при маневрировании мощностью

М.В. Антипов, Г.А. Рябов, М.А. Увакин, А.Л. Николаев, И.В. Махин

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 142103, Подольск, Московской обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

Материалы доклада относятся к серии работ, выполняемых в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» в рамках развития методов, алгоритмов и программ для численного моделирования процессов на реакторе ВВЭР с учётом особенностей ряда физических процессов в условиях маневренных режимов [1]. В настоящей статье рассматривается проблема расчета коэффициентов неравномерности поля энерговыделения реактора, основной особенностью которой является корректный переход от модели расчета нейтронно-физических характеристик к модели расчета динамических процессов. Для связанного моделирования процессов в РУ ВВЭР используется программный комплекс КОРСАР/ГП [2]. Для расчета нейтронно-физических характеристик активной зоны используется программа САПФИР_95&RC.

Предлагается универсальный подход для оценки коэффициентов пространственной неравномерности для наиболее теплонапряженных твэлов в условиях динамического процесса маневрирования мощностью. Модель динамического расчета имеет детализацию до уровня тепловыделяющей сборки, и оценка экстремальных параметров проводится при помощи модели «горячих каналов» [1]. Предлагаемый подход основан на построении многомерного фазового пространства, в котором коэффициенты потвэльной неравномерности представлены как функция нейтронной мощности активной зоны и положения управляющих групп органов регулирования. Опорные точки для построения пространства выбираются по результатам стационарного нейтронно-физического расчета с детализацией до уровня отдельного тепловыделяющего элемента. При проведении связанного динамического расчета для максимального значения коэффициента пространственной неравномерности строится фазовая траектория, описывающая его приращение при изменении мощности реактора и перемещении задействованных в переходном процессе групп органов регулирования.

По результатам работы делается ряд практически значимых выводов, касающихся наиболее корректного использования модели «горячих каналов» для проведения консервативных оценок параметров локального энерговыделения при маневрировании. Также анализируются перспективные направления развития использованного подхода для современных типов реакторов ВВЭР.

Ключевые слова: обоснование безопасности, маневренные режимы, математическое моделирование, коэффициента неравномерности, многомерное фазовое пространство.

EDN: YTCAPH

УДК 004.896

Разработка моделей виртуальных датчиков с применением свёрточных нейронных сетей

А.В. Николаева, А.В. Литышев, И.Н. Гриценко, С.И. Пантюшин,

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

Исследование посвящено созданию виртуальных датчиков, работающих как сложный аппроксиматор данных на основе имеющихся на атомной электростанции (АЭС) контрольно-измерительных приборов (КИП). Предлагаемый подход позволяет моделировать параметры АЭС, которые затруднительно или невозможно измерить с применением имеющихся технических средств. В частности, разработанные в рамках данного исследования модели нейронных сетей предназначены для определения таких важных при управлении аварией параметров, как уровень теплоносителя в реакторе (в отличие от текущих возможностей КИП, подразумевающих дискретное измерение величины, модели машинного обучения позволяют получить ее непрерывное распределение во времени) и максимальная температура оболочек твэлов (до настоящего момента отсутствовала возможность определения данного параметра).

На данном этапе исследования модели нейронных сетей рассматриваемых двух типов обучались на базе данных, полученных в результате численного моделирования с применением интегрального теплогидравлического кода СОКРАТ-В1/В2. В дальнейшем планируется дообучение моделей на реальных данных с КИП.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, CNN, виртуальные датчики, КИП, ВВЭР, СОКРАТ.

EDN: TLRNVI

УДК 004.896

**Диагностика работы датчиков контрольно-измерительных приборов
на основе моделей автоассоциативных нейронных сетей**

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

Достоверность результатов любой диагностики в значительной степени зависит от данных, на основе которых она проводится. Действует принцип «ложь на входе – ложь на выходе». Другими словами, если попытаться провести анализ некорректных данных (какой-либо датчик контрольно-измерительных приборов (КИП) вышел из строя), то выводы будут ложными. Поэтому в процессе эксплуатации необходимо выполнять непрерывную верификацию работы датчиков и оборудования на основе данных от КИП.

Для решения данной задачи наряду с общепринятыми методами существует множество подходов с применением машинного обучения (МО). В рамках настоящего исследования разработана модель для ранней диагностики КИП на основе автоассоциативных нейронных сетей (AANN) [1] для поиска аномалий в работе датчиков. На текущей стадии исследования модели обучались на данных, полученных в результате численного моделирования с применением star-csm^+ (теплогидравлический код в приближении распределенных параметров). В дальнейшем планируется обучение моделей на реальных данных, полученных по результатам опроса датчиков.

Исследование является частью серии работ, выполненных в АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС” в рамках анализа возможностей и перспектив применения методов машинного обучения для решения актуальных проблем управления атомной электростанцией в условиях аварий [2, 3].

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, AANN, диагностика, датчики, КИП, ВВЭР, CFD.

EDN: MGLBZZ

УДК 621.039.51

**О методической погрешности расчёта эксперимента Jasper Radial Shield
на основе DDL-схем метода дискретных ординат для случая сферической
формы источника**

А.А. Николаев, А.Ю. Тарасов,
АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, 142103, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

При решении задачи валидации защитных кодов могут быть эффективно использованы данные эксперимента JASPER (база данных МАГАТЭ SINBAD-2010). Эксперимент JASPER моделирует защиту реактора на быстрых нейтронах (сталь, карбид бора). Но групповой источник нейтронов с угловым распределением плотности потока определен нестандартным способом – не объемным, не точечным, а исходящим с испускающей поверхности (поверхностным), и при этом исходящим в воздух (в слабо рассеивающую среду). При расчете эксперимента в трехмерной постановке по программе FRIGATE выявлен численный эффект, состоящий в том, что использование численных DDL-схем DS_N -метода дискретных ординат для расчета переноса излучения от подобного поверхностного источника приводит к занижению расчетных результатов в поверхностных слоях защитной композиции до 50% для сферического источника. В настоящей работе для снижения методической погрешности численной схемы предложено применить известный прием о представлении поверхностного источника как объемного в малой области. Предложенный способ протестирован на модельной задаче и показал себя очень эффективным.

Ключевые слова: FRIGATE, DS_N -метод, поверхностный источник, TDMCC, тестирование, валидация, защитный эксперимент, численные схемы, перенос излучения в воздухе, реактор на быстрых нейтронах.

EDN: BZWKCE

УДК 621.039

Актуализация области применения программного комплекса JARFR для нейтронно-физических расчётов быстрых натриевых реакторов

В.Е. Каширина, В.А. Невиница, П.А. Фомиченко,

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

Представлены результаты верификации программного комплекса (ПК) JARFR [1] с целью актуализации его области применения для расчётов текущего состояния активной зоны реактора БН-800 с использованием результатов измерений. Для верификации использованы данные по измерению нейтронно-физических характеристик активной зоны БН-800 для 8—11-й микрокампаний. Показано, что отклонения результатов расчётов от результатов экспериментов не выходят за пределы паспортной погрешности расчётов по программе JARFR в области допустимого применения.

Ключевые слова: БН-800, быстрые натриевые реакторы, моделирование реакторных экспериментов, программный комплекс JARFR, распределение энерговыделения, расчёт активности ^{140}La .

EDN: DICGFC

УДК 004.896

Особенности выполнения анализов неопределённости для целей вероятностного анализа безопасности

А.В. Николаева, И.Н. Гриценко, А.В. Литышев, С.И. Пантюшин,

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

Анализ неопределённости (АН) является одной из основных задач вероятностных анализов безопасности (ВАБ) уровня 2 [1, 2], решаемых с учётом характеристик неопределённости параметров надёжности элементов реакторной установки: отказов элементов и систем, событий тяжёлой аварии (ТА) и др.

Многие отказы систем реакторной установки зависят от сценария ТА. Оценка таких вероятностных показателей аварийных состояний, как вероятность зависимых отказов, невозможна без дополнительных расчётных оценок. Поэтому ВАБ уровня 2, как правило, сопровождаются серией детерминистических поддерживающих расчётов с соответствующими АН [3].

В данном исследовании разработана методика оценки вероятности зависимых отказов систем реакторной установки на основе рекомендаций по оценке неопределённостей результатов расчётных анализов безопасности [3] с учётом задач ВАБ уровня 2.

Ключевые слова: ВАБ, анализ неопределённости, статистические методы, ВВЭР.

EDN: VTIVVI

УДК 621.039

Анализ неопределённостей при обосновании безопасности РУ ВВЭР посредством математической оптимизации

Д.Д. Касаткин, В.Р. Рудчук, И.Г. Петкевич, А.А. Рогов,

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

В статье представлен новый метод для анализа неопределённостей, заключающийся в использовании оптимизации для нахождения экстремального значения границы исследуемой неопределённости. Предложенный метод был опробован при рассмотрении аварии с непреднамеренным закрытием быстродействующего отсежного клапана на паропроводе парогенератора. Оптимизация проводилась с помощью инструментов программной платформы pSeven.

Ключевые слова: анализ неопределённостей, метод GRS, КОРСАР/ГП, детерминистический анализ безопасности, ВВЭР, математическая оптимизация, pSeven.

EDN: KYUUAU

Анализ чувствительности для запроектных аварий энергоблока с ВВЭР-1200*М.В. Гамагин, Д.С. Гордеев, С.И. Пантюшин, П.В. Ягов,*

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

В соответствии с актуальными требованиями российских и зарубежных регулирующих органов моделирование запроектных аварий должно сопровождаться анализом чувствительности результатов расчёта. Результатом анализа чувствительности является определение степени влияния каждой из неопределённостей на исследуемые параметры.

В рамках проделанной работы был предложен подход к проведению анализа чувствительности с помощью программы SUSA и программного комплекса ТРАП-КС на примере запроектных аварий “Отключение различного числа главных циркуляционных насосных агрегатов с отказом по общей причине систем программируемой автоматики”, “Потеря вакуума в конденсаторе или другие случаи, приводящие к останову турбины с отказом по общей причине систем программируемой автоматики”, “Потеря неаварийного питания переменным током вспомогательного станционного оборудования (обесточивание АЭС) с отказом по общей причине систем программируемой автоматики”. Рассматриваемые режимы были выбраны, исходя из условия достижения в них максимальных значений приёмочных критериев: максимальной температуры оболочек, максимального давления первого и второго контура соответственно.

Результатами представленного в работе анализа чувствительности являются:

- значения, характеризующие разброс критериальных параметров (максимальная температура оболочек, максимальное давление первого и второго контура);
- коэффициенты ранговой корреляции Спирмена;
- графики плотности распределения и графики распределений результатов расчёта.

Рассмотренный в статье подход позволяет учесть актуальные требования международных и российских надзорных органов, а в дальнейшем может быть распространён на все проекты АЭС с реакторными установками ВВЭР. Также этот подход может в дальнейшем применяться для запроектных аварий с отказом аварийной защиты (АТWS) и отказом промконтура по общей причине.

Ключевые слова: анализ чувствительности, запроектная авария, ВВЭР, SUSA, неопределённость, приёмочный критерий.

EDN: KZKJTN

Анализ теплогидравлики различных вариантов конструкций тепловыделяющих сборок в двухзаходной активной зоне реакторной установки ВВЭР-СКД*А.М. Баисов, А.Н. Чуркин,*

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

К.Н. Кадырова, В.С. Харитонов,

НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Каширское ш., д. 31

В статье представлен краткий обзор разрабатываемых тепловыделяющих сборок зарубежных и отечественных проектов реакторных установок со сверхкритическими параметрами теплоносителя. Приведены результаты анализа теплогидравлики различных вариантов конструкций тепловыделяющих сборок в двухзаходной активной зоне одноконтурной установки ВВЭР-СКД с использованием программы ТЕМПА-СК. Предварительные расчёты выявили существование неравномерности распределения температуры теплоносителя по сечению тепловыделяющих сборок, возникающей вследствие различных гидравлических диаметров и проходных сечений центральных и периферийных ячеек. Для устранения данного эффекта были рассмотрены варианты изменения конструкции чехла тепловыделяющей сборки. Показана необходимость проведения связанных нейтронно-физических, теплогидравлических и прочностных расчётов тепловыделяющих сборок для подтверждения обнаруженных закономерностей и выбора реализуемой конфигурации.

Ключевые слова: ВВЭР-СКД, ТВС, ТЕМПА-СК, сверхкритическое давление, теплогидравлические характеристики.

EDN: NTXNBO

УДК 621.039.58

Оценка использования каналов геликоидальной ориентации в выгородке реактора ВВЭР-1200

А.С. Воронин, В.В. Королев, Г.С. Сорокин, И.А. Дерябин, И.В. Шишин, А.В. Сидоров, А.Д. Джаландинов,

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

В данной статье представлена дальнейшая проработка оценки использования охлаждающих каналов геликоидальной ориентации в конструкции выгородки реактора ВВЭР-1200 на снижение температуры металла с целью увеличения срока службы данного элемента внутрикорпусных устройств.

Ключевые слова: ВВЭР, ВКУ, выгородка, распухание, распределение температур по сечению, геликоидальные охлаждающие каналы, флюенс нейтронов, аддитивные технологии.

EDN: FGVBVG

УДК 620.193.4+519.216.3

Оценка показателей надёжности элементов контура теплоносителя реактора для модели накопления повреждений

О.М. Гулина, А.В. Меркун, В.П. Семишкин, Н.В. Шарый,

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

Данные эксплуатационного контроля на основе постоянного совершенствования мониторинга процессов старения, деградации и повреждений оборудования и трубопроводов РУ отражают реальное, а не планируемое нагружение, поэтому прогноз остаточного ресурса становится более реалистичным. Учёт этого факта, включая погрешности методик расчёта параметров нагружения, позволяет оценить техническое состояние оборудования как вероятностные характеристики надёжности с соблюдением принципа консерватизма.

В работе рассматриваются вопросы оценки показателей надёжности элементов контура теплоносителя реактора (КТР), включая показатели остаточного ресурса, как основы для реализации управления старением этих элементов. Разработанная авторами методика применена к элементам двух блоков реакторной установки с ВВЭР-1000, работающим в условиях накопления усталостных повреждений. Характеристики нагружения и значения повреждений получены на основе показаний датчиков АСУ ТП, используемых САКОР. Предлагаемая методика дополняет устоявшиеся вычислительные традиции в данном направлении (методики расчёта) вычислением вероятностных показателей надёжности: вероятность безотказной работы (ВБР), интенсивность и частота отказов, средний остаточный ресурс.

Ключевые слова: усталость, процесс накопления повреждений, контур теплоносителя реактора, остаточный ресурс, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов.

EDN: FJXPJT

УДК 621.039.564.3:004.032.26

Определение теплового состояния трубопроводов РУ ВВЭР с помощью нейронной сети

И.А. Дерябин, В.В. Королев, С.В. Курбатова, Г.С. Сорокин,

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

В работе рассмотрены основные аспекты применения нейронной сети для прогнозирования теплового состояния трубопроводов и узлов врезок в трубопроводы РУ с ВВЭР. Полученные результаты показывают хорошее совпадение предсказанных значений температур с истинными значениями. Отдельно показаны примеры обработки температурных датчиков, где получены физически обоснованные результаты предсказаний. Работа направлена на развитие предиктивной способности систем мониторинга ресурса трубопроводов и расширения её функционала. Также разрабатываемый подход может быть применён при обработке показаний наружных термопар, полученных при проведении пусконаладочных испытаний, которые могут использоваться в дальнейшем при проведении расчётного обоснования прочности оборудования.

Ключевые слова: ВВЭР, трубопроводы, температурное поле, обратная задача теплопроводности, нейронная сеть.

EDN: WOWHMS

УДК 539.3

Эффективный численно-аналитический метод расчёта коэффициентов интенсивности напряжений в приграничных вершинах трещин для вероятностного анализа разрушения оборудования и трубопроводов

В.В. Матковский, А.В. Андреев,

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

Обоснование сопротивления хрупкому разрушению и вероятностный анализ разрушения оборудования и трубопроводов АЭС требуют расчёта параметров механики разрушения в многофакторных условиях нормальной эксплуатации и при протекании аварийных процессов. Разработаны новые численно-аналитические подходы к расчёту коэффициентов интенсивности напряжений, основанные на численном решении точных интегральных уравнений двумерных упругих задач о трещинах, в том числе с аналитическим учётом возмущения напряжённого состояния, обусловленного близостью фронта трещины и границы тела или раздела материалов. Выполнено сравнение с точным решением для одной задачи механики разрушения, продемонстрированы точность и эффективность предложенных подходов для других задач механики разрушения, моделирующих расчётные трещины вблизи поверхности оборудования или трубопровода или в области границы раздела основной металл—наплавка.

Ключевые слова: хрупкое разрушение, коэффициент интенсивности напряжений, интегральное уравнение.

EDN: TFIFNO

УДК 621.039.4

Математическое моделирование контактного взаимодействия в роликовой опоре парогенератора ПГВ-1200МР в ПО “ЛОГОС”

Р.Р. Абдуллин, С.Л. Лякишев,

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

В атомных электростанциях с легководными реакторами ВВЭР важным элементом первого конура реакторной установки (РУ) является парогенератор (ПГ), который устанавливается в боксе на опорные конструкции, фермы.

Опорная конструкция ПГВ-1000М используется на многих ПГ реакторов типа ВВЭР. Исследование распределения нагрузок в роликовой опоре ПГВ-1000М для нормальных условий эксплуатации с учётом податливости опорной конструкции показало, что нагрузка между телами качения распределена неравномерно — наибольшая нагрузка приходится на крайние ряды роликов.

Ключевые слова: опорная конструкция, ПГВ-1000М, роликовая опора.

EDN: ХОРМВН