

Аннотации статей
журнала “Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов”,
вып. № 3, 2023 г.

УДК 621.039.5; 004.8

Искусственный интеллект в области использования атомной энергии — существующие возможности и перспективы

*А.В. Николаева, М.А. Увакин, С.И. Пантюшин, Е.В. Сотсков, М.В. Антипов,
А.Л. Николаев, А.В. Литышев, Ю.А. Безруков, О.Ю. Кагун, М.А. Быков,*
АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, 142103, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

В статье представлен обзор имеющихся отечественных и зарубежных практик применения технологий искусственного интеллекта для проектирования, обоснования и эксплуатации объектов использования атомной энергии. Понятие искусственного интеллекта трактуется в общем виде, охватывающем целый набор информационных технологий и программно-вычислительных методов.

В настоящее время во всём мире наблюдается рост интереса к использованию технологии “искусственный интеллект” (ИИ) практически во всех технологических областях. Атомная энергетика как крайне наукоёмкая отрасль имеет свои особенности по сравнению с областями массового применения ИИ (медицина, экономика и финансы, маркетинг, дизайн, логистика, анализ дорожного трафика и др.). Корректная постановка задач для использования ИИ в атомной отрасли требует чётко определить возможности и ограничения использования ИИ. В данном исследовании авторами проанализированы различные аспекты применения ИИ для проектирования, обоснования и эксплуатации ядерных реакторов. Основное внимание уделено возможностям развития отрасли и повышения эффективности технологических процессов.

Приведены примеры разработки и апробации методов на основе ИИ в области деятельности АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”. Сделаны выводы о перспективных направлениях использования ИИ как современной информационной технологии, так и в качестве направления развития на долгосрочную перспективу.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, перспективы атомной энергетики.

УДК 621.039.56

Метод машинного обучения для валидации расчётной модели нестационарных ксеноновых процессов в реакторе ВВЭР на основе алгоритма разделения переменных

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

В статье представлен метод для выполнения валидации программного комплекса КОРСАР/ГП в части математической модели нестационарных ксеноновых процессов в реакторе ВВЭР, основанный на разделении пространственной и временной переменных. Используются данные, полученные с различных установок с ВВЭР большой мощности при выполнении экспериментов по исследованию пространственного распределения энерговыделения в условиях нестационарного отравления реактора, вызванного действием различных регуляторов.

В основу модели заложена классификация средств воздействия на реактивность по типу переменной в энерговыделении, которая претерпевает значимые для процесса изменения в результате данного воздействия. Рассматриваются нестационарные процессы отравления ксеноном, в которых задействованы органы регулирования СУЗ, операции водообмена с изменением концентрации борной кислоты, а также оба перечисленных способа, причём как при наличии изменения нейтронной мощности реактора, так и при поддержании постоянного её значения.

Разработан метод машинного обучения на основе регрессионного анализа, позволяющий оценивать погрешность расчётов параметров поля энерговыделения в условиях пространственной, временной и пространственно-временной обратной связи концентрации ксенона и регуляторов. На основе обработанных экспериментальных данных сформирован обучающий массив, который использован для машинного обучения данной модели. В результате работы созданного алгоритма производится оценка погрешности для модели расчётного кода, учитывающая парциальное воздействие различных средств изменения реактивности в заданном расчёте.

Ключевые слова: математическая модель, машинное обучение, регрессионный анализ, нестационарное отравление, изменение реактивности, пространственно-временная зависимость поля энерговыделения, код КОРСАР/ГП, валидация.

УДК 621.039.534...23

Программа MATADOR для расчёта локальных неоднородных процессов теплопереноса в пучках тепловыделяющих стержней

А.С. Залесов, А.Н. Чуркин,

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

В статье представлено краткое описание программы MATADOR. В основе программы лежит поканальная (поячейковая) методика анализа теплогидравлических процессов в пучках тепловыделяющих стержней, охлаждаемых однофазным теплоносителем при наличии локальных неоднородностей. Математическая модель программы основана на трёхмерных уравнениях переноса массы, энтальпии и импульса, записанных в интегральной форме. Уравнения переноса решаются численным методом, основанным на алгоритме SIMPLE.

Представлено испытание программы на тестовых задачах и приведено сравнение результатов расчётов по программам MATADOR и ТЕМПА-1Ф. Выполнен начальный этап валидации программы MATADOR и приведены результаты расчётов охлаждения пучков стержней различной геометрии. Произведена оценка затраченного машинного времени на решение тестовой задачи по программам MATADOR и ТЕМПА-1Ф.

Ключевые слова: поканальная (поячейковая) компьютерная программа, теплоперенос, пучки стержней, испытание программы, валидация.

УДК 621.039

Экспериментальные исследования конденсационных гидравлических ударов в трубопроводе аварийного впрыска в компенсатор давления

*А.Н. Чуркин, А.С. Богданов, Е.А. Лисенков, Д.Г. Толмачев, Ю.Б. Хрипачев,
М.А. Быков, В.И. Крыжановский, А.М. Баисов, Ю.А. Безруков,*

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

А.В. Евдокименко,

Филиал АО “Концерн Росэнергоатом” по реализации капитальных проектов, 115093,
Москва, ул. Люсиновская, д. 38,

Е.И. Смола,

АО “Атомэнергопроект”, 197183, Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 55

В статье представлены краткое описание экспериментальной установки, методики проведения экспериментов, а также результаты экспериментальных исследований конденсационных гидравлических ударов в трубопроводе аварийного впрыска в компенсатор давления в различных режимах. Исследования проводились в АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС” на экспериментальной установке “Гидроудар” с моделями трубопровода аварийного впрыска различных АЭС в масштабе 1:1. Результаты экспериментов показали, что полученные значения конденсационных гидравлических ударов малой интенсивности не влияют на работоспособность трубопроводов аварийного впрыска.

Ключевые слова: экспериментальная установка, трубопроводы, компенсатор давления, конденсационный гидравлический удар.

УДК 004.896

Применение машинного обучения для ранней диагностики аварий на АЭС с ВВЭР. Концепция интерактивного руководства по управлению аварией

А.В. Николаева, А.В. Литышев, В.В. Астахов, С.И. Пантюшин, О.В. Шебанова, Н.А. Власенкова,
АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, 142103, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

Концепция применения моделей машинного обучения для диагностики аварий была предложена более 20 лет назад. Однако ввиду ряда факторов до последнего времени её применение и развитие были малорентабельными, а в ряде случаев и невыполнимыми задачами. Совершенствование вычислительной техники и программного обеспечения, а также целенаправленное финансирование исследований по применению искусственного интеллекта привели к экспоненциальному росту количества исследований с применением машинного обучения (МО) в атомной отрасли последние 2—3 года. Концепции МО в атомной отрасли начали переход от фундаментальных научных исследований в плоскость реального промышленного применения. Большие надежды в этой связи возлагаются на применение МО для ранней диагностики аварийных последовательностей с применением моделей МО.

В рамках данного исследования разработана концепция виртуальных руководств по управлению запроектной аварией (ЗПА), позволяющая проводить раннюю диагностику и выдавать рекомендации персоналу по управлению аварией в режиме реального времени. В основу концепции заложена система взаимосвязанных моделей МО с учётом данных с атомной электростанции (АЭС) о работоспособности оборудования и о теплогидравлических параметрах, доступных на рассматриваемой стадии аварии. Согласно данной концепции разработан ряд моделей искусственных нейронных сетей, в частности, для определения типа исходных событий аварийной ситуации, положения места течи, диаметра течи и времени достижения максимального проектного предела повреждения твэлов. Для обучения моделей использованы наборы исходных данных, полученных на основе численных исследований для ВВЭР-1000 с применением расчётного кода СОКРАТ-В1/В2.

Ключевые слова: машинное обучение, искусственные нейронные сети, диагностика, инструкции, аварии, ВВЭР, СОКРАТ.

УДК 621.039.534

Водно-химический режим ВВЭР-СКД и основные системы его обеспечения

Е.Б. Юрчевский, А.Н. Чуркин, В.П. Семишкин, И.А. Чусов, Н.В. Шарый, О.Ю. Кавун,
АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, 142103, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

Для эксплуатации инновационного атомного энергоблока с прямоточным водоохлаждаемым энергетическим реактором на сверхкритические параметры пара ВВЭР-СКД предложен бескоррекционный нейтральный водно-химический режим (ВХР). Для обоснования выбора использован анализ результатов длительной эксплуатации более 120 прямоточных энергоблоков сверхкритического давления в тепловой энергетике России, опыт эксплуатации атомных установок АМБ-100 и АМБ-200 с ядерным перегревом пара на слабощелочном и нейтрально-бескоррекционном ВХР, а также ВХР одноконтурных атомных энергетических установок на докритические параметры теплоносителя. Рекомендованы значения показателей качества питательной воды для реактора, а также показатели качества подпиточной воды. Рассмотрена работа основных систем обеспечения заданного водно-химического режима. Обозначены основные научно-технические проблемы, требующие проведения дополнительных исследований.

Ключевые слова: прямоточный энергетический реактор ВВЭР-СКД, водно-химический режим, системы обеспечения водно-химического режима.

УДК 621.039.534...23

Анализ условий охлаждения твэлов в элементарных ячейках ТВС ВВЭР-СКД различной конструкции

А.Н. Чуркин, А.М. Баисов, Т.И. Крыжановская,
АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, 142103, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

В статье поставлена задача расчётного анализа условий охлаждения твэлов в элементарных ячейках ТВС ВВЭР-СКД. Описана методика упрощённого расчёта, которая позволяет проводить экспресс-анализ условий охлаждения твэлов в ТВС. Предложенная методика была проверена с помощью вычислительной программы ТЕМПА-СК. Представлены результаты расчётного анализа условий охлаждения твэлов в элементарных ячейках ТВС различной конструкции для одноконтурной ЯЭУ ВВЭР-СКД.

Ключевые слова: ВВЭР-СКД, тепловыделяющая сборка, охлаждение твэлов, вода сверхкритического давления, программа ТЕМПА-СК.

УДК 621.039.58

Оценка предложений по изменению конструкции выгородки с целью снижения максимальной температуры металла и увеличения срока службы

А.С. Воронин, В.В. Королев, И.А. Дерябин, Г.С. Сорокин, А.Д. Джаландинов, А.В. Панфилов,
АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, 142103, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

В данной статье представлена оценка предложений по изменению конструкции выгородки с целью снижения максимальной температуры металла и увеличения срока службы данного элемента внутрикорпусных устройств (ВКУ). В качестве путей по улучшению текущей конструкции были предложены возможные типы изменений или добавлений в существующую конструкцию выгородки для увеличения теплосъёма в проблемных участках. В работе были проведены расчёты энерговыделений и температурных полей в сечении выгородки для различных вариантов изменения конструкции для базового стационарного режима при номинальной мощности. Результаты расчётов для предлагаемых способов изменения конструкции показали существенное снижение температуры металла выгородки и, как следствие, снижение степени распухания металла, что, в свою очередь, ведёт к увеличению срока службы.

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

УДК 621.039.58

Посттестовые расчёты экспериментов для условий потери охлаждения бассейна выдержки на стенде повторного залива по коду КОРСАР/ГП

О.Е. Степанов, М.М. Бедретдинов, А.Г. Каретников, Н.В. Ардатова, М.А. Быков,
АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, 142103, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

В рамках данного исследования проведена серия экспериментов на модернизированной экспериментальной интегральной установке “Стенд повторного залива” применительно к условиям долговременной потери охлаждения бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива. Полученные экспериментальные данные были использованы при проведении посттестовых расчётов, результаты которых включают основные моделируемые теплогидравлические процессы по исследованию охлаждения твэлов в бассейне выдержки. Получено хорошее количественное совпадение результатов расчётов с опытными данными как по моменту начала кипения теплоносителя в колонке, так и по моменту начала оголения (роста температуры) стержней, а также по максимальной температуре стержней.

Ключевые слова: АЭС, бассейн выдержки (БВ), ВВЭР, ОЯТ, ТВС, КОРСАР/ГП.

УДК 620.193.4+519.216.3

Оценка остаточного ресурса как меры эффективности мероприятий в задачах управления старением

О.М. Гулина, А.В. Меркун, В.П. Семешкин,

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

Современные методологии управления ресурсом [1, 2] построены на принципе недопущения предельных состояний элементов оборудования и трубопроводов реакторной установки (РУ) в течение назначенного ресурса путём организации контроля и проведения профилактических мероприятий по смягчению условий эксплуатации и снижению интенсивности процессов деградации в материале элементов. Управление ресурсом связано с мероприятиями по улучшению условий эксплуатации, по изменению состояния элемента (отмывки, ремонт, замена и др.), с периодичностью контроля и его объёмом, затратами ресурсов на проводимые мероприятия. Эффективность управления ресурсом с точки зрения рассмотренных аспектов тесно связана с оценками результативности возможных мер. Предлагается методика оценки эффективности некоторых мероприятий по управлению старением на основе значения остаточного ресурса. В качестве примера рассмотрена теплообменная сборка парогенератора (ПГ). Рассмотрены вопросы вероятностной оценки остаточного ресурса с учётом неопределённостей, связанных с неполнотой контроля, изменениями параметров эксплуатации и т.д. Методики построены на использовании распределения Вейбулла для относительного количества заглушенных теплообменных труб (ТОТ). При обосновании допустимости использования модели Вейбулла использована методика построения доверительных интервалов (ДИ) для статистических оценок заглушенных труб. Разработанные авторами методики опробованы на данных глушения ТОТ 1ПГ-1 Калининской АЭС

Ключевые слова: управление ресурсом, процессы старения, остаточный ресурс, эффективность проводимых мероприятий, теплообменные трубки парогенератора, доверительные интервалы.

УДК 621.039

Статистический и параметрический анализ результатов ультразвукового контроля в целях получения исходных данных для вероятностного анализа разрушения корпуса реактора ВВЭР

А.В. Андреев, М.Н. Киселев,

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

В статье представлены результаты статистической обработки данных по ультразвуковому контролю корпусов реакторов ВВЭР-440, включающей консервативную схематизацию результатов контроля и построение распределения Вейбулла глубин схематизированных дефектов. На основе двухпараметрической функции выявляемости дефектов разработана математическая модель перехода от обнаруженного распределения глубин и плотности дефектов к соответствующим прогнозируемым величинам. Серия параметрических расчётов дала возможность выделить максимум вероятности разрушения в области реалистических значений функции выявляемости, позволив тем самым построить консервативную модель дефектности сварных швов и основного металла корпуса реактора ВВЭР-440.

Ключевые слова: корпус реактора, ультразвуковой контроль, статистический анализ результатов контроля, вероятность разрушения.

УДК 621.039

Результаты посттестового моделирования эксперимента “Закрытие отсечных клапанов при естественной циркуляции” на стенде ПСБ-ВВЭР

Д.Ю. Латкин, И.Г. Петкевич,

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

В статье представлен сценарий эксперимента “Закрытие отсечных клапанов при естественной циркуляции” на стенде ПСБ-ВВЭР, а также результаты посттестового моделирования в программном комплексе КОРСАР/ГП. Оценено влияние тепловых и гидравлических потерь на результаты эксперимента.

Ключевые слова: ETHARINUS, ВВЭР, ПСБ-ВВЭР, несимметричная однофазная естественная циркуляция, потеря теплоотвода, расхолаживание реакторной установки, экспериментальная база данных, претестовое моделирование, КОРСАР/ГП, валидация расчётных программ.