

УДК 621.039.534...23

Валидация программы ТЕМПА-СК на экспериментах с пучками тепловыделяющих стержней, охлаждаемых водой сверхкритического давления

А.М. Баисов, А.Н. Чуркин,

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

Представлено краткое перечисление современных расчётных программ для моделирования теплогидравлических процессов с водой при сверхкритическом давлении. Описана программа ТЕМПА-СК и выполненная авторами статьи модернизация, связанная с внедрением новых замыкающих соотношений для теплообмена и гидравлического сопротивления трения, а также с расширением модуля расчёта теплофизических свойств, что позволило ускорить выполнение расчётов. Описаны этапы валидации программы. Представлены результаты “слепой стадии” расчётов двух задач бенчмарка с охлаждением пучков стержней различной геометрии, проводимого в рамках Международного форума Generation-IV.

Ключевые слова: поядейковая компьютерная программа, сверхкритическое давление, теплообмен, пучки стержней, валидация.

УДК 621.039.58

Разработка эмпирических корреляций для оценки величины коэффициента конверсии постулированного парового взрыва при тяжёлой аварии на реакторной установке с ВВЭР

А.В. Николаева, В.В. Астахов, А.В. Литышев, С.И. Пантюшин, Н.В. Шарый,

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

В ходе тяжёлой аварии (ТА) с расплавлением активной зоны может иметь место такое явление, как энергетическое взаимодействие расплава с теплоносителем (паровой взрыв), которое угрожает целостности корпуса реактора и может являться триггером для водородного взрыва. Одним из основных параметров, определяющих мощность парового взрыва, является коэффициент конверсии, который определяет величину энергии расплава CR (conversion ratio, другое распространённое обозначение – δ), которая будет преобразована в механическую работу в результате постулированного парового взрыва. В данном исследовании изучены результаты более 190 экспериментов, моделирующих взаимодействие расплава с теплоносителем с применением расплава кориума (TROI, FARO, KROTOS-KFC, ZREX, ANL) и модельных расплавов (KROTOS Huhtiniemi, MISTEE, SUW, WUMT, MIXA, EXPO-FITS, FITS, ALPHA, WFCI и др.). По результатам данного исследования были выведены зависимости максимального значения коэффициента конверсии от следующих параметров: масса расплава, приведённая к массе теплоносителя (M_m/M_f); отношение приведённого значения недогрева теплоносителя до температуры насыщения к приведённому значению перегрева расплава выше температуры плавления ($\Delta T_f/\Delta T_m$); соотношение компонентов в кориуме (Zr, UO₂ и др.). Полученные зависимости предполагается использовать для уточнения существующих полуэмпирических методик для оценки мощности паровых взрывов в целях снижения их консервативности в рамках обоснования безопасности для действующих и проектируемых АЭС с РУ ВВЭР.

Ключевые слова: тяжёлые аварии, ВВЭР, паровой взрыв, коэффициент конверсии, корреляции, эмпирические зависимости.

УДК 621.039

Выполнение претестовых расчётов и разработка экспериментальной программы стенда ПСБ-ВВЭР в рамках международного проекта АЯЭ ОЭСР “ETHARINUS”

Д.Ю. Латкин, И.Г. Петкевич,

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

В статье представлено описание экспериментальной программы стенда ПСБ-ВВЭР в рамках международного проекта АЯЭ ОЭСР “ETHARINUS”. Интерес проведения экспериментов заключается в расширении расчётно-экспериментальной базы данных в области явлений, связанных с несимметричной однофазной естественной циркуляцией. Описаны основные этапы проработки сценариев экспериментов. Приведены результаты претестовых расчётов, выполненных в программном комплексе КОРСАР/ГП.

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

УДК 621.039.56

Валидация кода КОРСАР/ГП по результатам испытаний маневренных режимов РУ ВВЭР с расширенным диапазоном регулирования

А.Л. Николаев, М.А. Увакин, М.В. Антипов, И.В. Махин, Е.В. Сотсков, Н.В. Шарый,

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

В докладе представлена часть большой работы по валидации кода КОРСАР/ГП в части расчёта параметров РУ ВВЭР в режимах маневрирования мощностью. Актуальность работы обусловлена новыми требованиями к энергоблокам АЭС, связанными с несением гибкого графика электрической нагрузки и возможностью её оперативного изменения, что предусмотрено как у российских, так и у зарубежных пользователей технологии ВВЭР. За последние два года был накоплен значительный объём экспериментальных результатов, полученных при испытаниях суточного графика несения электрической нагрузки на РУ ВВЭР большой мощности. Был проведён ряд испытаний 10 суточных циклов подряд для моментов начала и конца топливной кампании. Важной отличительной особенностью являлось применение расширенного диапазона регулирования давления во втором контуре, что позволяло использовать изменение температуры теплоносителя как один из основных способов воздействия на реактивность. Первый этап работ по валидации был проведён для претестовых расчётов и позволил проверить качественное совпадение основных параметров РУ с данными экспериментов. Настоящая работа посвящена валидации мощности РУ и температуры теплоносителя в циркуляционных петлях с получением количественных оценок погрешности. В работе приведены результаты валидации для различных графиков изменения мощности РУ, а также сделаны обоснованные выводы о точности расчётной модели кода КОРСАР/ГП.

Ключевые слова: маневрирование мощностью, суточный график, код КОРСАР/ГП, валидация, расширенный диапазон регулирования, интегральные параметры.

УДК 621.039.58

Анализ неопределённости при моделировании процессов для условий потери охлаждения бассейна выдержки

М.М. Бедретдинов, В.Е. Карнаухов, О.Е. Степанов,

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

Выполнен анализ неопределённости для ключевых параметров, исследуемых в аварийных режимах с потерей охлаждения бассейна выдержки с применением кода улучшенной оценки СОКРАТ/В1. По результатам анализа определены параметры, оказывающие наибольшее влияние на ключевые параметры расчёта, а также показано, что одновременное отклонение исходных параметров сначала в консервативную сторону и затем в сторону для получения наиболее благоприятного результата приводит к диапазону результатов шире трубки неопределённости. Результаты проведённого анализа показывают, что данный подход может использоваться при обосновании безопасности АЭС в аварийных режимах с потерей охлаждения бассейна выдержки в дополнение к методам, рекомендованным РБ-166-20.

Ключевые слова: бассейн выдержки, АЭС, потеря охлаждения.

УДК 621.039

Экспериментальные исследования локальных полей скоростей теплоносителя в опускном канале реактора

Д.В. Зайцев, Е.А. Лисенков, А.Н. Чуркин, С.Г. Сергеев, А.В. Селезнёв, Ю.А. Безруков,

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

А.С. Небучинов, А.В. Бильский,

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, д. 1

В статье представлены краткое описание экспериментальной установки, методики проведения экспериментов, а также результаты экспериментальных исследований локальных полей скоростей теплоносителя в опускном канале реактора в различных режимах течения. Эксперименты проводились в АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС” на четырёхпетлевой гидравлической установке с моделью реактора ВВЭР в масштабе 1:5. Результаты экспериментов предназначены для верификации CFD-кодов.

Ключевые слова: локальные параметры теплоносителя, перемешивание теплоносителя, опускной канал реактора, ГЦНА, САОЗ.

УДК 621.039.58

Совершенствование системы представления параметров безопасности с учётом современных стандартов и требований нормативной документации

В.М. Васин, М.М. Гермаш, М.А. Подшибякин,

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

В статье рассматриваются вопросы создания системы представления параметров безопасности с учётом контроля состояний АС на всех уровнях глубоко эшелонированной защиты (ГЭЗ) и нового требования в НП-001-15 о принятии в проекте АС мер по исключению пороговых эффектов. В соответствии с РБ-152-18 “основные направления снижения негативного влияния порогового эффекта на безопасность — это обоснование и применение проектных запасов, а также реализация полноценной ГЭЗ”. Эти вопросы системно рассматриваются в данной статье.

Ключевые слова: функции безопасности, система поддержки оперативного персонала, глубоко эшелонированная защита, параметры безопасности, пороговый эффект, РУ ВВЭР.

УДК 621.039

О применении фторуглеродных и углеводородных рабочих тел в теплосиловых циклах АЭС (обзорный материал)

В.М. Махин, И.В. Махин,
АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, 142103, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21,
М.С. Моркин, Ю.С. Черепнин,
АО “НИКИЭТ”, 101000, Москва, а/я 788

Рассмотрены публикации по эксплуатации реакторной установки с органическим теплоносителем АРБУС, об опыте применения углеводородов как теплоносителей АЭС. Показаны перспективность материалов с более высокой температурой применения (~500 °С) — фторуглеродов и их возможное применение в качестве теплоносителя второго контура установок типа БРЕСТ.

Ключевые слова: органический теплоноситель, углеводород, фторуглеродные рабочие тела.

УДК 621.039.546:621.039.542.34

Предложения по созданию толерантного топлива путём модификации топливной композиции МЕТМЕТ

А.М. Савченко, Л.А. Карпюк, Е.А. Дергунова, Ю.В. Коновалов,
АО “ВНИИНМ”, 123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а

Разработанная в АО “ВНИИНМ” дисперсионная топливная композиция МЕТМЕТ представляет собой равномерно распределённые в сердечнике гранулы топлива повышенной плотности из сплавов U—Mo, U—Nb—Zr, U₃Si, металлургически сцепленные между собой и с оболочкой твэла матричными сплавами на основе циркония. Рассмотрена и обоснована возможность применения топлива МЕТМЕТ как толерантного топлива для реакторов типа ВВЭР прежде всего за счёт его высокой ураноёмкости, высокой теплопроводности и жаропрочности, а также совместимости компонентов твэлов при изготовлении и в аварийных ситуациях. Рассмотрена и обоснована возможность модификации существующего топлива МЕТМЕТ, направленной на повышение его температуры плавления и радиационной стойкости.

Ключевые слова: дисперсионный твэл, циркониевый сплав, облучение, ураноёмкость, толерантное топливо, устойчивость к аварийным ситуациям.

УДК 621.039

Исследование зависимости размеров основного оборудования реакторной установки с естественной циркуляцией первого контура от типа теплоносителя

Н.В. Тарасов, С.Л. Лякишев, Н.В. Шарый, Ю.А. Безруков,
АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, 142103, Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, д. 21

В статье приведён обзор реакторной установки (РУ) с естественной циркуляцией (ЕЦ) теплоносителя, а также анализ четырёх теплоносителей на предмет применимости в качестве теплоносителя первого контура для атомной станции малой мощности с ЕЦ теплоносителя в первом контуре, что ранее не было описано в рамках одной статьи. Показаны рабочие температурные диапазоны рассматриваемых теплоносителей первого контура и достижимые параметры пара,

генерируемого реакторной установкой. Исследована зависимость размеров основного оборудования РУ с ЕЦ от типа теплоносителя. Приведены возможные размеры и массы корпусов РУ в зависимости от применяемого теплоносителя. В результате сравнения теплоносителей сделаны выводы о том, что для атомной станции малой мощности с ЕЦ теплоносителя наиболее эффективными являются водяной и свинцово-висмутовый теплоносители (СВТ). Отмечено, что по показателю безопасности РУ со свинцово-висмутовым теплоносителем в первом контуре превосходит РУ с водяным теплоносителем и относится к четвёртому поколению. Кроме этого, корпус реактора и парогенератор для атомной станции малой мощности с ЕЦ СВТ легче и дешевле в изготовлении по сравнению с атомной станцией с водяным теплоносителем в первом контуре. Учитывая теплофизические свойства жидкометаллического СВТ и имеющийся опыт технологии данного теплоносителя в реакторах малой мощности на наземных стендах-прототипах и в транспортных установках, в качестве теплоносителя для атомной станции малой мощности с ЕЦ теплоносителя в первом контуре эвтектический сплав свинца с висмутом является очень перспективным.

Ключевые слова: теплоноситель, атомная станция малой мощности, свинец, эвтектический сплав, висмут, натрий, вода, напор, естественная циркуляция, безопасность.

УДК 621.039.56

Оценка возможности использования полной загрузки МОХ-топлива в реакторе ВВЭР-600

И.Н. Трапезников, Г.Л. Пономаренко, И.Н. Васильченко,

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

Анализируется возможность использования 100% МОХ-топлива (Mixed Oxide — смешанное уран-плутониевое топливо) в реакторе ВВЭР-600 с номинальной мощностью 1600 МВт(т). Активная зона ВВЭР-600 состоит из 163 ТВС, аналогичных по конструкции ТВС ВВЭР-ТОИ. В состав МОХ-топлива входят отвалный уран (99,8% ^{238}U и 0,2% ^{235}U) и смесь изотопов плутония. Моделируется также кампания с урановым топливом (UOX – Uranium Oxide) для сравнения нейтронно-физических характеристик с вариантом МОХ. Для обоих вариантов – МОХ и UOX анализируется эффективность топливоиспользования при повышении отношения вода/топливо (W/F – Water/Fuel, отн. ед.) в сравнении с базовым вариантом. Отношение W/F повышается тремя способами. Для расчётных оценок используется программный комплекс КАССЕТА-БИПР-7. Представлены результаты расчётов отдельных нейтронно-физических характеристик (НФХ) со 100%-ным МОХ-топливом при моделировании варианта ВВЭР-ТОИ с мощностью 3300 МВт(т) для возможности сравнения с результатами расчётов по другим независимым расчётным кодам.

Ключевые слова: 100% МОХ, плутоний, ВВЭР-600, ВВЭР-ТОИ, повышение отношения W/F, выигрыш в топливоиспользовании, эффективность поглотителей нейтронов.