

ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Научно-исследовательский технологический институт им. А. П. Александрова»

ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА
ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

№ 3 (13) 2018 г.

Сосновый Бор
2018

ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Периодический рецензируемый научно-технический сборник
№ 3 (13) 2018

Издается с 2015 года

Сборник распространяется на территории Российской Федерации

Редакционная коллегия

Главный редактор — **В. А. Василенко**, доктор технических наук, генеральный директор
ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».
Заместитель главного редактора — **Р. Д. Филин**, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».

Члены редакционной коллегии

В. Р. Аксенов, (ответственный редактор), кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».
В. И. Альмяшев, кандидат химических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».
А. Я. Благовещенский, доктор технических наук, профессор ВУНЦ-ВМФ «Военно-морская академия», Военно-морской политехнический институт, Санкт-Петербург.
В. И. Бурсук, кандидат технических наук, заместитель Главнокомандующего ВМФ по вооружению — начальник кораблестроения и вооружения.
В. С. Гурский, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».
А. В. Ельшин, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».
А. А. Ефимов, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».
В. Н. Зимаков, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».
Ю. В. Крюков, (ответственный секретарь), кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».
Ю. А. Мигров, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».
Л. Н. Москвин, доктор химических наук, Санкт-петербургский государственный университет.
Е. Б. Панкина, кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».
С. А. Петров, доктор технических наук, НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ, Санкт-Петербург.
О. Ю. Пыхтеев, кандидат химических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».
О. Б. Самойлов, доктор технических наук, АО «ОКБМ Африкантов».
В. Б. Хабенский, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».

Учредитель: ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский технологический институт им. А. П. Александрова».

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации СМИ: ПИ № ФС77-58865 от 28.07.14 г.

Адрес редакции: 188540 Россия, Ленинградская область, г. Сосновый Бор, Копорское шоссе 72,
ФЯО ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».

Телефоны: 8 (813-69) 2-39-64 — заместитель гл. редактора. 8 (813-69) 6-01-43 — отв. секретарь редколлегии.
Факс: 8 (813-69) 2-36-72. E-mail: foton@niti.ru; Интернет сайт: www.niti.ru

Подписной индекс 43300 в объединенном каталоге «Пресса России».

При перепечатке ссылка на периодический рецензируемый научно-технический сборник «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок» обязательна.

© ФЯО ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова», 2018

Содержание

Выпуск № 3 (13) 2018

Предисловие	7
Моделирование и исследование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов объектов с ЯЭУ	
А. И. Синегрибова, М. А. Увакин Анализ области применения распределенной нейтронно-физической модели ТВС в ПК КОРСАР/ГП	9
С. А. Шевченко, Д. А. Яшников Об оценке погрешностей расчётов, выполняемых при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии	19
И. И. Свириденко, Д. В. Шевелев, В. В. Свердлов Расчетные исследования аварийного теплоотвода ВВЭР автономной термосифонной СПОТ первого контура	28
Н. Д. Агафонова, И. Л. Парамонова О сопоставимости данных по уносу капель в дисперсно-кольцевом пароводяном потоке, полученных в экспериментах, выполненных по разным методикам	42
Исследование процессов при тяжелых авариях на объектах атомной энергетики	
В. Б. Хабенский, В. И. Альмяшев, А. А. Сулацкий, Е. В. Крушинов, С. А. Витоль, С. Ю. Котова, Е. К. Каляго, В. Р. Булыгин, Е. М. Беляева, В. В. Гусаров, А. А. Комлев Взаимодействие металлического расплава, содержащего цирконий и уран, с бетонным жертвенным материалом	53
Обеспечение экспериментальных исследований	
Ю. В. Саунин Перспективы использования методологии математического моделирования при вводе в эксплуатацию энергоблоков АЭС с ВВЭР на примере физических и динамических испытаний	73
Информация для авторов	
Требования к оформлению и содержанию статей, публикуемых в научно-техническом сборнике «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок»	81
Правила подачи материалов в редакцию	85
Информационные сообщения	
Филин Р. Д. (Некролог)	86

УДК: 621.039.58

Анализ области применения распределенной нейтронно-физической модели ТВС в ПК КОРСАР/ГП

А. И. Синегрибова, М. А. Увакин

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, Московская обл., Россия

Аннотация

В статье представлено краткое описание разработанной ранее потвэльной модели ТВС в программном комплексе КОРСАР/ГП. В модели каждый твэл описывается отдельным элементом. Теплоноситель межтвэльного пространства описывается системой параллельных теплогидравлических каналов, есть возможность учета межячейстого тепломассообмена. Такая модель содержит большое количество расчетных элементов (нодов), что увеличивает время счета задачи, поэтому использование потвэльной модели в расчетах не всегда оправдано и необходимо. Целью работы является анализ области применения разработанной потвэльной модели. В работе представлены результаты моделирования переходного процесса аварийного режима «Выброс ОР СУЗ». Данная авария представляет интерес, поскольку в ней происходит перераспределение энерговыделения внутри кассет в месте выброса органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ). В рамках анализа безопасности оценка параметров твэлов производится с использованием модели «горячего канала», при этом учитывается только энерговыделение максимально напряженного твэла. Отсутствие информации об изменении энерговыделения в кассете в переходном процессе замещается увеличением консервативности. Приведены данные по оценке максимальной мощности твэла, получаемой в аварии, с использованием потвэльной модели ТВС.

Ключевые слова: потвэльная модель ТВС, КОРСАР/ГП, выброс ОР СУЗ, потвэльное энерговыделение.

УДК 621.039

Об оценке погрешностей расчётов, выполняемых при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии

С. А. Шевченко, Д. А. Яшников

ФБУ «НТЦ ЯРБ», Москва, Россия

Аннотация

В российских нормативных документах не определено каким образом при верификации и валидации программных средств (ПС) следует обосновывать значения погрешностей параметров, рассчитываемых с использованием этих ПС. Кроме того, в них не указано как полученные в процессе валидации ПС значения погрешностей результатов расчёта с помощью ПС должны использоваться при анализе безопасности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ).

Представлены результаты анализа отечественной и зарубежной практик оценки погрешностей расчетов с помощью ПС, по итогам которого предлагается использовать в качестве погрешности результата расчёта, полученного с использованием ПС, отклонение результата расчёта от результата измерения, выполненного в ходе проведения эксперимента, использованного для валидации ПС. При этом предлагается учитывать как неопределённость результатов расчета с помощью ПС, так и неопределённость результата измерения в экспериментах, использованных для валидации ПС.

Отмечено, что при расчётах с помощью ПС в обоснование безопасности ОИАЭ можно использовать только те значения погрешностей, которые получены с использованием экспериментальных данных на реальных ОИАЭ, а также на экспериментальных установках, структурно подобных реальным ОИАЭ. Поскольку количество таких экспериментов весьма ограничено, при обосновании безопасности необходимо доказывать консервативность результатов расчета с помощью ПС путём применения одного из методов анализа неопределённости результатов расчетов с помощью ПС.

Ключевые слова: программное средство, верификация, валидация, расчет, измерение, погрешность, неопределённость, обоснование безопасности, ОИАЭ, атомная станция

Расчетные исследования аварийного теплоотвода ВВЭР автономной термосифонной СПОТ первого контура

И. И. Свириденко, Д. В. Шевелев, В. В. Свердлов

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия

Аннотация

Рассматривается автономная система пассивного отвода остаточного тепловыделения (СПОТ) реакторной установки (РУ) АЭС с ВВЭР-1000, функционирование которой не зависит от состояния основного оборудования РУ и парогенераторов. Особенностью системы является организация аварийного теплоотвода непосредственно от первого контура. СПОТ включает пассивную систему отвода теплоты от первого контура (СПОТ Р) и систему пассивного расхолаживания компенсатора давления. В качестве теплообменного оборудования СПОТ используются теплообменники на основе испарительно-конденсационных устройств замкнутого типа — двухфазных термосифонов. На примере РУ с ВВЭР-1000 приведены результаты расчетного моделирования аварийного отвода остаточного тепловыделения автономной термосифонной СПОТ, демонстрирующие надёжность, эффективность и безопасность применения данной СПОТ с термосифонным теплообменным оборудованием для РУ АЭС с ВВЭР. Расчетное моделирование выполнено с использованием кода RELAP5. Полученные результаты расчетных исследований позволяют сделать вывод о возможности эффективного применения автономной СПОТ с термосифонным теплообменным оборудованием для РУ АЭС с ВВЭР поколения 3+.

Ключевые слова: система пассивного отвода теплоты, первый контур, термосифонный теплообменник, конечный поглотитель, расчетное моделирование.

УДК 536.24 + 621.039.534.4

О сопоставимости данных по уносу капель в дисперсно-кольцевом пароводяном потоке, полученных в экспериментах, выполненных по разным методикам

Н. Д. Агафонова, И. Л. Пармонова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

Аннотация

В работе представлен анализ экспериментальных работ разных авторов, в которых изучался срыв жидкости с поверхности пленки жидкости в дисперсно-кольцевом пароводяном потоке в трубе. Выполнено сравнение опытных данных, полученных по разным методикам, и получены обобщающие зависимости для расчета величины среднего безразмерного уноса капель в необогреваемых и обогреваемых каналах.

Ключевые слова: дисперсно-кольцевой пароводяной поток, измерения расхода жидкости в пленке, срыв капель

УДК 621.039.586

Взаимодействие металлического расплава, содержащего цирконий и уран, с бетонным жертвенным материалом

¹В.Б. Хабенский, ^{1,2}В.И. Альмяшев, ¹А.А. Сулацкий, ¹Е.В. Крушинов, ¹С.А. Витоль, ¹С.Ю. Котова, ¹Е.К. Каляго, ¹В.Р. Булыгин, ¹Е.М. Беляева, ^{2,3}В.В. Гусаров, ⁴А.А. Комлев

¹ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

²ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им. В. И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ»», Санкт-Петербург, Россия

³Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴Королевский технологический институт (КТН), Стокгольм, Швеция

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментальных исследований взаимодействия бетонного жертвенного материала устройства локализации расплава кориума с металлическим расплавом, содержащим цирконий и уран. Полученные экспериментальные данные по температуре активации и кинетике взаимодействия сопоставлены с аналогичными данными для керамического жертвенного материала. Результаты работы могут быть использованы при обосновании функциональности устройств локализации расплава.

Ключевые слова: тяжелые аварии, внекорпусное удержание, ловушка расплава, жертвенный материал, бетонная технология, кориум, индукционная плавка в холодном тигле.

УДК 004.94

Перспективы использования методологии математического моделирования при вводе в эксплуатацию энергоблоков АЭС с ВВЭР на примере физических и динамических испытаний

Ю. В. Саунин

АО «Атомтехэнерго», Нововоронежский филиал «Нововоронежатомтехэнерго»,
г. Нововоронеж, Россия

Аннотация

Приведены сведения о структуре и особенностях проведения физических и динамических испытаний систем и оборудования — одного из основных направлений пусконаладочных работ на этапе ввода в эксплуатацию энергоблоков АЭС с ВВЭР. Показана необходимость принципиального изменения сложившегося подхода к проведению испытаний в части создания и внедрения в практику пусконаладочных работ методологии математического моделирования на основе использования специализированных цифровых расчётных кодов. Обсуждается текущее состояние проблемы внедрения в практику пусконаладочных работ методологии моделирования и перспективы ее решения за счёт использования специализированных программно-технических комплексов. Акцентируется внимание на необходимости создания банка экспериментальных данных на базе результатов, полученных при проведении физических и динамических испытаний.

Ключевые слова: ВВЭР, моделирование, расчётный код, физические и динамические испытания, пусконаладочные работы, банк экспериментальных данных, жизненный цикл энергоблока АЭС.