

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

№ 4 (14) 2018 г.

Сосновый Бор
2018

ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Периодический рецензируемый научно-технический сборник
№ 4 (14) 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».

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».

Телефон: 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.

Содержание

Выпуск № 4 (14) 2018

Предисловие	7
<i>Стендовые испытания транспортных ЯЭУ</i>	
О. Б. Самойлов, В. И. Алексеев, С. А. Полянский, А. Н. Лепехин, О. А. Морозов, Г. Ш. Иксанова, П. А. Бочаров, П. Б. Матяш Концепция разработки и результаты испытаний двухступенчатой активной зоны с каналами «дожигания»	9
<i>Исследование динамики и создание технологий испытаний объектов с ЯЭУ</i>	
Н. Г. Андреев, В. Н. Вавилкин, С. П. Довбуш, М. Н. Баев, В. Г. Ильин, И. С. Орлёнков, О. Н. Саранча, Р. В. Червяков, А. Л. Митенков Результаты исследований при эксплуатации наземных стендов-прототипов по обоснованию и повышению радиационной безопасности транспортных ЯЭУ	20
<i>Моделирование и исследование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов объектов с ЯЭУ</i>	
В. Н. Блинков, В. И. Мелихов, О. И. Мелихов Современное состояние и тенденции развития математического моделирования теплофизических процессов на АЭС	31
М. А. Увакин, И. В. Махин, Е. В. Сотсков Математическая модель для расчетного обоснования безопасности реакторных установок ВВЭР в режимах с регулированием частоты энергосети	49
И. В. Елкин, О. И. Мелихов, В. И. Мелихов, С. М. Никонов, А. В. Капустин, С. С. Селькин Экспериментальные исследования на стенде ПСБ-ВВЭР теплогидравлики аварийных режимов на АЭС с ВВЭР-ТОИ	61
<i>Исследование процессов при тяжелых авариях на объектах атомной энергетики</i>	
С. С. Базюк, Б. Н. Беспечалов, Д. С. Киселев, Ю. А. Кузма-Кичта, Н. Я. Паршин, К. К. Полуин, Е. Б. Попов, Д. М. Солдаткин, А. А. Урусов Характеристики высокотемпературного окисления и теплогидравлики толерантных твэлов в условиях LOCA	74
<i>Информация для авторов</i>	
Требования к оформлению и содержанию статей, публикуемых в научно-техническом сборнике «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок»	90
Правила подачи материалов в редакцию	94

УДК: 621.039.536+621.039.578:629.5

Концепция разработки и результаты испытаний двухступенчатой активной зоны с каналами «дожигания»

О. Б. Самойлов, В. И. Алексеев, С. А. Полянских, А. Н. Лепехин, О. А. Морозов, Г. Ш. Иксанова, П. А. Бочаров, П. Б. Матяш

АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Россия

Аннотация

В статье представлены физические особенности, теплогидравлический анализ характеристик и основные результаты выгорания активной зоны с каналами «дожигания» наземного стенда-прототипа КВ-1 корабельной ядерной энергетической установки (ЯЭУ) при выработке энергоресурса до ~140 % от проектного значения. Реализованное в ходе испытаний сочетание тепловыделяющих сборок (ТВС) «дожигания» и ТВС «запала-подпитки» (двухступенчатая активная зона) позволило провести испытания ТВС с большой контрастностью мощности, а также реализовать режим естественной циркуляции теплоносителя в широком мощностном диапазоне.

Проведенные испытания являются уникальной базой для обоснования работоспособности ТВС и ресурсной надежности перспективных активных зон корабельных ядерных энергетических установок с существенной долей режима естественной циркуляции теплоносителя в моделях эксплуатации.

Ключевые слова: двухступенчатая активная зона, ТВС «подпитки», ТВС «дожигания», испытания, мощностной диапазон, выгорание, корабельные установки, модели эксплуатации.

УДК 621.039.58+621.039.538

Результаты исследований при эксплуатации наземных стендов-прототипов по обоснованию и повышению радиационной безопасности транспортных ЯЭУ

Н. Г. Андреев, В. Н. Вавилкин, С. П. Довбуш

АО «ОКБМ «Африкантов», г. Нижний Новгород, Россия

М. Н. Баев, В. Г. Ильин, И. С. Орлёнков, О. Н. Саранча, Р. В. Червяков, А. Л. Митенков

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

Аннотация

В статье приведены основные результаты исследований по обоснованию и повышению радиационной безопасности ядерных энергетических установок транспортных (ЯЭУ) при эксплуатации наземных стендов-прототипов, эксплуатируемых в составе стендовой базы ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова» в течение длительного времени. Полученные результаты являются основой для дальнейшего повышения радиационной безопасности транспортных ЯЭУ.

Ключевые слова: ЯЭУ, активная зона, радиационная безопасность, теплоноситель первого контура, биологическая защита, герметичность оборудования, аппаратурный контроль.

УДК 621.039

Современное состояние и тенденции развития математического моделирования теплофизических процессов на АЭС

*В. Н. Блинков*¹, *В. И. Мелихов*^{1,2}, *О. И. Мелихов*^{1,2}

¹⁾ АО «ЭНИЦ», г. Электрогорск, Московская обл., Россия

²⁾ НИУ МЭИ, г. Москва, Россия

Аннотация

Рассмотрены современное состояние и тенденции развития математического моделирования теплофизических процессов на АЭС. Сформулирована методология проведения теплогидравлических исследований аварийных режимов, включающая в себя несколько этапов. Рассмотрены различные методологии оценки неопределенностей расчетных результатов. Изложены сведения о состоянии и развитии системных теплогидравлических кодов, а также однофазных и двухфазных CFD кодов. Предложены направления дальнейшего развития моделирования теплогидравлики ЯЭУ.

Ключевые слова: математическое моделирование, теплогидравлика, системный код, CFD код, оценка неопределённостей.

УДК 621.039.58

Математическая модель для расчетного обоснования безопасности реакторных установок ВВЭР в режимах с регулированием частоты энергосети

М. А. Увакин, И. В. Махин, Е. В. Сотсков

АО «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск, Московская область, Россия

Аннотация

В работе рассматривается проблема проведения расчетных анализов безопасности реакторной установки (РУ) ВВЭР для некоторых исходных событий с вводом положительной реактивности (RIA) с учетом работы энергоблоков в режиме нормированного первичного регулирования частоты электросети (НПРЧ). Применение данного режима приводит к изменению нагрузки турбогенератора, что влечет за собой практически непрерывное изменение параметров РУ за счет обратных связей и действия регуляторов. Постоянное нахождение РУ в динамических условиях может учитываться в анализах безопасности, но требует специальных методик. Рассматриваются два основных методических подхода. Первый основан на реалистичном расчете переходных процессов с полноценным учетом динамики РУ. Второй базируется на принципе расширения существующих границ для стационарных параметров РУ, позволяющих консервативно охватить возможную область их значений с учетом НПРЧ без учета динамики в исходном состоянии. Для апробации динамической методики предлагается математическая модель проведения расчетного обоснования безопасности РУ ВВЭР с учетом НПРЧ. Модель основана на расчетном и теоретическом анализе динамики РУ в переходных процессах при НПРЧ и включает в себя констатирующую часть и примеры выполнения расчетного обоснования безопасности для исходных событий с выбросом органов регулирования (ОР) системы управления и защиты (СУЗ) и неуправляемым извлечением группы органов регулирования.

Ключевые слова: математическая модель, регулирование частоты энергосети, реактивные аварии, обоснование безопасности, динамическое исходное состояние.

УДК 621.31

Экспериментальные исследования на стенде ПСБ-ВВЭР теплогидравлики аварийных режимов на АЭС с ВВЭР-ТОИ

И. В. Елкин^{1,2,4}, *О. И. Мелихов*^{1,2}, *В. И. Мелихов*^{1,2}, *С. М. Никонов*^{1,2},
А. В. Капустин^{1,3}, *С. С. Селькин*¹

¹⁾ АО «ЭНИЦ», г. Электрогорск, Россия

²⁾ НИУ МЭИ, г. Москва, Россия

³⁾ ИБРАЭ РАН, г. Москва, Россия

⁴⁾ НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

Аннотация

На крупномасштабном интегральном теплофизическом стенде ПСБ-ВВЭР было выполнено девять экспериментов с моделированием аварий трех разных типов на АЭС с ВВЭР-ТОИ при работе пассивных систем безопасности и наложении полной потери источников переменного тока.

Экспериментальные результаты подтвердили эффективность пассивных систем безопасности, предусмотренных в новых проектах ВВЭР, с точки зрения выполнения проектных функций охлаждения активной зоны.

Ключевые слова: АЭС с ВВЭР, эксперимент, теплогидравлический стенд, пассивные системы безопасности, аварийные режимы

Характеристики высокотемпературного окисления и теплогидравлики толерантных ТВЭЛОВ в условиях ЛОСА

С. С. Базюк, Б. Н. Беспечалов, Д. С. Киселев, Ю. А. Кузма-Кичта, Н. Я. Паршин, К. К. Полунин, Е. Б. Попов, Д. М. Солдаткин, А. А. Урусов

ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ», г. Подольск, Россия

Аннотация

В первой части работы представлены опытные данные по характеристикам окисления образцов оболочек толерантных ТВЭЛОВ из сплава Э110Г с защитным покрытием и молибдена в условиях, имитирующих максимальную проектную (МПА) и запроектную (ЗПА) аварии с потерей теплоносителя. Высокотемпературные испытания проведены в диапазонах температур 1185–1470 °С, расходах пара (10–118) мг/с и длительности выдержки — до $23,8 \cdot 10^3$ с. На основе опытных данных по удельному привесу/уносу оксида металла оболочек разработаны зависимости по константе скорости реакции от температуры. Во второй части работы выполнено расчетное прогнозирование поведения модельных 19 стержневых ТВС ВВЭР-1000 с оболочками имитаторов ТВЭЛОВ из сплава Э110Г и молибдена марки МЧВП при имитации ЗПА с использованием кода PARAM-TG на стадиях разогрева в водяном паре до температуры, близкой к температуре плавления Zr, и расхолаживания водой, подаваемой снизу.

Ключевые слова: авария с потерей теплоносителя, пароциркониевая реакция, оболочка толерантного ТВЭЛА, защитное покрытие, паромолибденовая реакция, теплогидравлика, модельная ТВС, фронт смачивания, температура Лейденфроста.