

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

№ 2 (20) 2020

Сосновый Бор
2020

ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Периодический рецензируемый научно-технический сборник

№ 2 (20) 2020

Издается с 2015 года

Сборник распространяется на территории Российской Федерации

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор — **В.А. Василенко**, профессор, доктор технических наук, генеральный директор ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

- В.Р. Аксенов**, (ответственный редактор), кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- В.И. Альмяшев**, кандидат химических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- А.Я. Благовещенский**, доктор технических наук, профессор ВУНЦ-ВМФ «Военно-морская академия», Военно-морской политехнический институт, Санкт-Петербург.
- В.И. Бурсук**, доктор технических наук, директор центра сервиса АО «Концерн «НПО «Аврора», Санкт-Петербург.
- В.С. Гурский**, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- А.В. Ельшин**, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- А.А. Ефимов**, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- В.Н. Зимаков**, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- Ю.В. Крюков**, (ответственный секретарь), кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- Ю.А. Мигров**, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- Л.Н. Москвин**, доктор химических наук, Санкт-Петербургский государственный университет.
- Е.Б. Панкина**, кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
- 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», г. Сосновый Бор.
- О.Б. Самойлов**, доктор технических наук, АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород.
- В.Б. Хабенский**, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

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.

Адрес редакции: 188540 Россия, Ленинградская область, г. Сосновый Бор, Копорское шоссе 72,
ЦФЯО 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».

Научно-технический сборник включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальности 05.14.03 — Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации (технические науки).

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

Содержание

Выпуск № 2 (20) 2020

Исследование динамики и создание технологий испытаний объектов с ЯЭУ

А.Я. Благовещенский, Л.Б. Гусев

Этапы реализации использования естественной циркуляции теплоносителя
в корабельных ЯЭУ 9

Е.Д. Федорович, И.И. Курдюков

Аналитический обзор опыта эксплуатации и современных разработок
ядерных энергетических установок средней и малой мощности
с жидкометаллическим теплоносителем. Часть 1 (Опыт эксплуатации) 19

Моделирование и исследование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов объектов с ЯЭУ

В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, Р.Э. Зинатуллин, А.С. Карпов, Н.С. Нерсесян

Моделирование экспериментов по определению эффективности органов
регулирования на критическом стенде с быстрым спектром нейтронов 27

А.С. Грицай

Анализ и оценка неопределенности корреляции Грюневельда-Стюарта
для расчёта минимальной температуры смачивания поверхности стенки 41

Химические технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, радиохимические и материаловедческие исследования

Р.В. Фоменков, А.В. Пискарёв, А.С. Иванов, В.А. Нагишев, С.Г. Мысик

Разработка методик для оперативного контроля герметичности оболочек твэлов
в процессе испытаний ЯЭУ транспортногo назначения 54

Влияние объектов атомной энергетики на окружающую среду

Х. Садеги, С.Х. Газани, Е.А. Соколова, Е.Д. Федорович, А. Ширан

Технико-экономический анализ возможных технологий опреснения морской воды
с использованием энергии второго энергоблока АЭС «Бушер» (Иран) 65

Исследование процессов при тяжелых авариях на объектах атомной энергетики

В.И. Альмяшев, В.В. Гусаров, В.Б. Хабенский

Анализ устойчивости $USiO_4$ 80

УДК 62.039

Этапы реализации использования естественной циркуляции теплоносителя в корабельных ЯЭУ

А.Я. Благовещенский, Л.Б. Гусев

Военно-Морской Политехнический институт ВУНЦ ВМФ «Военно-Морская Академия»,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В статье рассматриваются задачи, возникавшие в процессе освоения новой техники, и пути их решения в важнейшей проблеме – обеспечение надежности, безопасности и живучести корабельных ядерных энергетических установок при их аварийном обесточивании. Особая острота проблемы для атомных подводных лодок была связана с ограниченной емкостью резервного источника электропитания – аккумуляторной батареи. Показана роль специалистов Военно-Морского Флота и консолидации усилий Заказчика, Научного Руководства и промышленности в успешном решении проблемы обеспечения надежности, безопасности и живучести корабельных ядерных энергетических установок на базе использования естественной циркуляции теплоносителя, не требующей работы энергопотребляющих механизмов.

Ключевые слова: атомная подводная лодка, реактор, аварийное расхолаживание, парогенератор, петлевая компоновка, блочная компоновка, естественная циркуляция теплоносителя, саморегулирование.

УДК 621.039.52.034.6

Аналитический обзор опыта эксплуатации и современных разработок ядерных энергетических установок средней и малой мощности с жидкометаллическим теплоносителем.

Часть 1 (Опыт эксплуатации)

¹Е.Д. Федорович, ²И.И. Курдюков

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

²АО «Санкт-Петербургское Морское Бюро Машиностроения «Малахит», Россия

Аннотация

Использование ядерных энергетических установок со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем является одним из перспективных направлений развития ядерной энергетики. В статье представлен анализ мирового и отечественного опыта создания и эксплуатации ядерных энергетических установок с жидкометаллическим теплоносителем.

Рассмотрены транспортные ядерные энергетические установки с жидкометаллическим теплоносителем, применявшиеся на АПЛ проектов 645, 705, 705К и на наземных стендах-прототипах 27/ВТ и КМ-1. Приведен анализ основных технических решений, реализованных в рассмотренных проектах.

Ключевые слова: жидкометаллический теплоноситель, свинцово-висмутовый теплоноситель, атомная подводная лодка, ядерная энергетическая установка.

УДК 621.039.51:006.91

Моделирование экспериментов по определению эффективности органов регулирования на критическом стенде с быстрым спектром нейтронов

В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, Р.Э. Зинатуллин, А.С. Карпов, Н.С. Нерсесян

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

Аннотация

Приведены результаты моделирования экспериментов по определению эффективности органов регулирования, осуществленных методами «сброса» и «разгона», с использованием нейтронно-физической модели комплекса программ САПФИР_РФ&РС. Эксперименты проведены в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» на критическом стенде с активной зоной быстрого газоохлаждаемого реактора. Моделирование экспериментов проведено с целью верификации расчётной модели и исследования влияния методических особенностей измерения реактивности методом обращенного решения уравнения кинетики на результаты оценки эффективности органов регулирования.

Ключевые слова: реактор с быстрым спектром нейтронов, критический стенд, измерение реактивности, параметры запаздывающих нейтронов, пространственные эффекты, источник нейтронов, моделирование экспериментов, комплекс программ САПФИР_РФ&РС.

УДК 621.039.524:519.2

Анализ и оценка неопределенности корреляции Грюневельда-Стюарта для расчёта минимальной температуры смачивания поверхности стенки

А.С. Грицай

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

Аннотация

На основе сопоставления с результатами доступных экспериментов выполнена оценка неопределенности корреляции Грюневельда-Стюарта, используемой в программах для ЭВМ, предназначенных для теплогидравлических расчётов – расчётных кодах – в качестве замыкающего соотношения для расчёта минимальной температуры смачивания поверхности стенки. Показано, что для воды на линии насыщения и пароводяного потока указанная корреляция обеспечивает консервативный результат расчёта.

Проанализировано влияние методических положений и допущений, принятых при построении корреляции (неявных источников неопределенности), на количественные показатели разброса расчётных и экспериментальных данных (среднеквадратическое отклонение). По результатам математического анализа предложена модификация корреляции Грюневельда-Стюарта, позволяющая уменьшить отмеченный разброс для области недогретой воды.

Рассмотрена проблематика программно-технологической реализации учета неявных источников неопределенности многопараметрических замыкающих соотношений в расчётах с применением статистического метода GRS. Даны конкретные предложения по программному способу учета неопределенности рассматриваемой корреляции в функциональной части расчётного кода КОРСАР.

С применением расчётного кода КОРСАР и программы ПАНДА методом GRS выполнены расчётные исследования по оценке влияния неопределенности корреляции Грюневельда-Стюарта на результаты расчёта максимальной температуры оболочки твэлов в аварии с большой течью теплоносителя применительно к реакторной установке ВВЭР-1000. Установлено, что в данном аварийном режиме учет неопределенности анализируемой корреляции приводит к отклонениям в расчёте искомого параметра порядка 100 °С.

Ключевые слова: корреляция Грюневельда-Стюарта, минимальная температура смачивания стенки, расчётный код КОРСАР, неопределенность расчёта, LB LOCA, GRS.

УДК 621.039.548, 621.039.577

Разработка методик для оперативного контроля герметичности оболочек твэлов в процессе испытаний ЯЭУ транспортного назначения

Р.В. Фоменков, А.В. Пискарев, А.С. Иванов, В.А. Нагишев, С.Г. Мысик

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

Аннотация

В статье представлен опыт разработки методов оперативного (при каждом останове реактора) контроля герметичности оболочек твэлов по результатам радиохимического анализа проб технологических сред в процессе испытаний активной зоны ядерной энергетической установки транспортного назначения.

Потребность в разработке методов оперативной оценки герметичности оболочек твэлов при проведении испытаний транспортной ЯЭУ была обусловлена нестационарностью режимов работы реактора, отсутствием возможности отбора проб технологических сред при работе реактора на мощности, а также наличием в контролируемых технологических средах высоко-активированных продуктов коррозии конструкционных материалов. В подобных условиях идентификация разгерметизации твэлов и определение стадий развития дефектов их оболочек требует определения активностей для целого ряда как короткоживущих, так и долгоживущих радионуклидов в объёме технологических сред сразу после останова реактора. В связи с этим, оперативно, уже в первые часы после останова реактора, проводился отбор проб контролируемых сред с их последующим лабораторным радиохимическим анализом. Для анализа и унификации результатов радиохимического контроля, полученных в процессе реализации различных по длительности и мощности режимов работы реактора, авторами предложено использовать «эффективные массы» топлива, в которых происходит такое же накопление продуктов деления и активации топлива, как и в объёме технологических сред при наличии негерметичности (т.е. дефектов) твэлов.

В работе приводится обновлённый регламент выполнения оперативного радиохимического контроля в процессе испытаний активной зоны ядерной энергетической установки транспортного назначения, включающий, в том числе, и вновь разработанные методики селективного выделения и концентрирования радионуклидов. Приводится алгоритм расчёта «эффективной массы» топлива.

Ключевые слова: активная зона, контроль, твэлы, герметичность, разгерметизация, реперные радионуклиды, «эффективная масса» топлива.

УДК 621

Технико-экономический анализ возможных технологий опреснения морской воды с использованием энергии второго энергоблока АЭС «Бушер» (Иран)

Х. Садеги¹, С.Х. Газани¹, Е.А. Соколова¹, Е.Д. Федорович¹, А. Ширани²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

²Университет имени Шахида Бехешти, Тегеран, Иран

Аннотация

Проблема снабжения пресной водой в маловодных районах мира обостряется с каждым годом. Опреснение морской воды используется в качестве основного решения для удовлетворения спроса на воду в странах Ближнего Востока и Северной Африки, в значительной степени страдающих от ее недостатка. Опреснение морской воды – это процесс дорогостоящий и требующий большого количества энергии и вредно влияющий на окружающую среду, в случае, если он основан на сжигании органических топлив. Использование атомной энергии является альтернативным энергетическим ресурсом опреснительных технологий, доступным и относительно недорогим. Иран, как страна с дефицитом пресной воды, в качестве государства-члена МАГАТЭ (Международное агентство по атомной энергии) заявила о своей заинтересованности в создании опреснительной установки на базе атомной электростанции «Бушер». Эта электростанция в Иране использует первый коммерческий ядерный реактор на Ближнем Востоке. Её энергия может использоваться (и уже частично используется на первом энергоблоке АЭС «Бушер») в составе многоцелевого атомного комплекса для удовлетворения спроса на энергию и питьевую воду на засушливых территориях юга страны. В настоящей статье дается технико-экономическая оценка различных технологий опреснения воды на втором энергоблоке АЭС в Бушере. Актуальность темы статьи определяется целесообразностью и необходимостью развития технологий атомного опреснения в Иране, а практическая ценность заключается в представленных в статье рекомендациях по выбору принципиальной схемы и состава оборудования опреснительной приставки ко второму энергоблоку АЭС «Бушер».

Ключевые слова: опреснение морской воды, электростанция, программа экономической оценки опреснения, АЭС «Бушер», технологии опреснения морской воды, предварительный нагрев питательной воды обратного осмоса, гибридная схема опреснения, энергопотребление.

УДК 544.344.2

Анализ устойчивости $USiO_4$

^{1,2} В.И. Альмяшев, ³ В.В. Гусаров, ¹ В.Б. Хабенский

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

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

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

Аннотация

В статье приведен анализ фазовых диаграмм ряда бинарных систем $Me^N O_2-SiO_2$, а также имеющихся структурных и термодинамических данных для соединений $Me^V SiO_4$ (где $Me - Zr, Th, Hf$ и U). Представлены результаты экспериментального исследования композиций, отвечающих составу соединения $USiO_4$. Полученные данные актуальны для повышения точности прогнозирования сценариев внекорпусной стадии тяжелой аварии на АЭС, анализа образующегося в этих условиях топливного дебриса, а также при разработке новых материалов для атомной энергетики, в том числе ядерного топлива.

Ключевые слова: диоксид урана, диоксид кремния, силикат урана, фазовые равновесия, фазовая диаграмма, индукционная плавка в холодном тигле, тяжёлые аварии.