

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 (25) 2021

Сосновый Бор

# ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Периодический рецензируемый научно-технический сборник

№ 3 (25) 2021

Издается с 2015 года

Сборник распространяется на территории Российской Федерации

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

## ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

**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.

**В.В. Гусаров**, чл.-корр. РАН, доктор химических наук, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург.

**А.Л. Дмитриев**, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

**Ю.Э. Зевацкий**, доктор химических наук, АО «Новбытхим», Санкт-Петербург.

**А.В. Ельшин**, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

**С.С. Ермаков**, доктор химических наук, Санкт-Петербургский государственный университет.

**А.А. Ефимов**, 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.В. Родинков**, доктор химических наук, Санкт-Петербургский государственный университет.

**О.Б. Самойлов**, доктор технических наук, АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород.

**В. Л. Столярова**, чл.-корр. РАН, доктор химических наук, Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,  
Санкт-Петербург.

**А. А. Сулацкий**, (ответственный редактор), кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».

**В.Б. Хабенский**, профессор, 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,  
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](http://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 № 3 (25) 2021

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

*А.В. Мицкевич, А.О. Попов, А.С. Грицай*

Анализ замыкающих соотношений по межфазному трению для систем газ-ТЖМТ ..... 9

*Е.Н. Кулаков, А.В. Попов, П.А. Кругликов*

Оптимизация параметров системы поддержания температуры воды на входе парогенератора энергоблока с реактором БРЕСТ-ОД-300 ..... 23

Химические технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, радиохимические и материаловедческие исследования

*Т.В. Воронина, А.А. Каверзина, Р.М. Рамазанов, В.И. Попов, С.Р. Фридман*

Коррозионные испытания в тяжелой воде алюминиевых сплавов экспериментальных каналов реактора ПИК ..... 36

Исследование процессов при авариях на объектах атомной энергетики

*И.А. Магола, Л.А. Матюшев, А.Г. Митрюхин, Е.Л. Шамрай, Р.О. Галиев*

Требования к эффективности фильтра САОЗ, необходимые для обеспечения надежного теплоотвода от активной зоны водо-водяного ядерного реактора при авариях с потерей теплоносителя ..... 51

Исследование процессов при тяжелых авариях на объектах атомной энергетики

*В.Б. Хабенский, В.И. Альмяшев, Е.Б. Шуваева, Е.В. Крушинов, С.А. Витоль, А.А. Сулацкий, С.Ю. Котова, В.В. Гусаров*

Экспериментальное определение точки пространственной инверсии сосуществующих фаз расплава в системе U-Zr-Fe-O ..... 63

Развитие и экономика ядерных технологий

*Е.Д. Федорович, С.С. Макухин, С.Х. Газали, Х. Садеги, Е.А. Соколова, А.А. Калютник, В.А. Талалов, Е.И. Смола*

О целесообразности использования ядерного реактора ВБЭР-600 в составе многоцелевого атомно-опреснительного комплекса, для решения проблем водоснабжения региона Крыма и энергоснабжения западной части Краснодарского края ..... 82

УДК 621.039.51

## Анализ замыкающих соотношений по межфазному трению для систем газ-ТЖМТ

*А.В. Мицкевич<sup>1</sup>, А.О. Попов<sup>1</sup>, А.С. Грицай<sup>1,2</sup>*

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

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого в г. Сосновый Бор Ленинградской обл., Россия

### Аннотация

В статье представлены результаты анализа замыкающих соотношений (ЗС) по расчёту межфазного трения в двухфазных потоках газ-ТЖМТ (тяжелый жидкометаллический теплоноситель), а также результаты их верификации на доступных экспериментальных данных. Рассмотренные ЗС объединены в две группы: зависимости, основанные на модели потока дрейфа, и зависимости, основанные на иных подходах. Также было выделено несколько групп экспериментов: течение двухфазного потока в трубах малого диаметра, в трубах большого диаметра и в условиях барботажа. Работа проводилась с использованием расчётного кода (РК) КОРСАР, функциональные возможности которого были модернизированы для расчёта двухфазных систем газ-ТЖМТ. По итогам верификации выбраны наиболее надежные зависимости для каждой группы экспериментов, а также предложены их модификации, позволяющие добиться лучшего согласования расчётных и экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** замыкающие соотношения, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, расчётный код, межфазное трение, двухфазный поток.

УДК: 621.039.52.034.6:621.181

## **Оптимизация параметров системы поддержания температуры воды на входе парогенератора энергоблока с реактором БРЕСТ-ОД-300**

*Е.Н. Кулаков, А.В. Попов, П.А. Кругликов*

ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ЦКТИ), Россия, Санкт-Петербург

### **Аннотация**

В России на площадке АО «Сибирский химический комбинат» в городе Северск Томской области начато строительство АЭС с реактором БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем. Использование свинца в качестве теплоносителя первого контура накладывает ряд ограничений на режимы функционирования оборудования, одним из которых является обеспечение минимально допустимой температуры воды на входе прямоточного парогенератора. Это требует применения нестандартных решений в части конструкции и состава оборудования второго контура и режимов его эксплуатации.

В настоящей работе проведен структурный анализ системы поддержания температуры питательной воды на входе парогенератора энергоблока АЭС с реактором БРЕСТ-ОД-300. Предложены технические решения для оптимизации значений параметров данной системы, принятых проектантом, с целью повышения тепловой экономичности энергоблока.

Выполненное авторами расчётное исследование свидетельствует о наличии резерва по улучшению тепловой экономичности энергоблока на величину 1 МВт, и более за счет повышения давления в смешивающем подогревателе питательной воды при увеличении расхода через его байпас. Сформирован перечень мероприятий, необходимых для реализации предложенного технического решения, даны оценки его экономического эффекта.

**Ключевые слова:** АЭС, турбоустановка, экономичность, оптимальные параметры, тепловая схема, капитальные затраты, свинцовый теплоноситель.

УДК 620.193.44

## Коррозионные испытания в тяжёлой воде алюминиевых сплавов экспериментальных каналов реактора ПИК

*Т.В. Воронина<sup>1</sup>, А.А. Каверзина<sup>1</sup>, Р.М. Рамазанов<sup>2</sup>, В.И. Попов<sup>2</sup>, С.Р. Фридман<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, г. Гатчина Ленинградской области, Россия

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

Приведены результаты коррозионных испытаний в тяжелой воде образцов из алюминиевых сплавов АД1 и АМг3 в течение 6500 часов. Выполнен анализ химического состава тяжелой воды на начальном, промежуточных и конечном этапе испытаний.

Выполнена оценка скорости общей и питтинговой коррозии алюминиевых сплавов в условиях эксплуатации реактора ПИК. Полученные результаты позволяют дополнительно продлить ресурс экспериментальных каналов реактора ПИК, изготовленных из алюминиевых сплавов, на срок до 4-х лет.

**Ключевые слова:** коррозионные исследования, тяжеловодный отражатель, коррозия алюминиевых сплавов, питтинг, продление ресурса экспериментальных каналов, реактор ПИК.

УДК:621.039.58

## **Требования к эффективности фильтра САОЗ, необходимые для обеспечения надежного теплоотвода от активной зоны водо-водяного ядерного реактора при авариях с потерей теплоносителя**

*И.А. Магола, Л.А. Матюшев, А.Г. Митрюхин, Е.Л. Шамрай, Р.О. Галиев*

АО «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ», г. Санкт-Петербург, Россия

### **Аннотация**

В статье рассмотрена проблема обеспечения безопасности АЭС в аварийных режимах в части обеспечения длительного охлаждения реакторной установки при использовании загрязненного в процессе аварии теплоносителя. Приведены требования к конструкции фильтра САОЗ со стороны оборудования систем безопасности, показано, что обоснованные требования со стороны активной зоны в отечественной энергетике отсутствуют.

Проведен сравнительный анализ активных зон реакторных установок U.S. EPR AREVA и ВВЭР-1200 на возможность засорения тепловыделяющих сборок волокнистыми частицами разрушенной теплоизоляции. Проанализирована возможность использования приемочного критерия, предложенного зарубежными коллегами, для оценки эффективности фильтра САОЗ отечественной конструкции.

**Ключевые слова:** атомная электрическая станция, система аварийного охлаждения активной зоны, спринклерная система, фильтр, дебрис, тепловыделяющая сборка, дистанцирующая решетка

УДК 544.344.4+621.039.586

## Экспериментальное определение точки пространственной инверсии сосуществующих фаз расплава в системе U-Zr-Fe-O

*В.Б. Хабенский<sup>1</sup>, В.И. Альмяшев<sup>1, 2, 3</sup>, Е.Б. Шуваева<sup>1</sup>, Е.В. Крушинов<sup>1</sup>,  
С.А. Витоль<sup>1</sup>, А.А. Сулацкий<sup>1</sup>, С.Ю. Котова<sup>1</sup>, В.В. Гусаров<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской обл., Россия

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

<sup>3</sup>ФГБУН «Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН», Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

В работе исследована стадия тяжелой аварии, связанная с формированием ванны расплава и изменением пространственного расположения двух несмешивающихся жидких фаз (металлической и оксидной) в базовой для тяжелой аварии на АЭС системе U-Zr-Fe-O. В эксперименте исходным состоянием являлась двухжидкостная оксидно-металлическая субокисленная ванна расплава кориума с нижним положением тяжелой металлической жидкости и соотношением U/Zr, характерным для условий аварии на АЭС Фукусима-Дайичи. В процессе эксперимента в системе U-Zr-Fe-O последовательно малыми порциями увеличивалась массовая доля Fe и определялась точка пространственной инверсии металлической и оксидной жидкости, при которой металлическая жидкость занимала устойчивое верхнее положение в ванне расплава. В эксперименте также были проведены измерения температуры монотектики при изменении содержания Fe в расплаве, определялся состав проб расплава и продуктов плавки. Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для расширения и уточнения баз данных, используемых для термодинамического моделирования фазовых равновесий в многокомпонентных системах расплава кориума на различных стадиях тяжелой аварии на АЭС с водо-водяными реакторами.

**Ключевые слова:** уран, цирконий, железо, кислород, фазовые равновесия, жидкофазное расслаивание, пространственная инверсия жидких фаз, индукционная плавка в холодном тигле (ИПХТ), тяжелые аварии.



УДК: 621.039.524.44:628.165

## **О целесообразности использования ядерного реактора ВБЭР-600 в составе многоцелевого атомно-опреснительного комплекса, для решения проблем водоснабжения региона Крыма и энергоснабжения западной части Краснодарского края**

*Е.Д. Федорович, С.С. Макухин, С.Х. Газан, Х. Садеги, Е.И. Смола,  
Е.А. Соколова, А.А. Калютник, В.А. Талалов*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия

### **Аннотация**

В статье обосновывается выбор ядерного реактора ВБЭР-600 (проект разработки АО «ОКБМ Африкантов») в качестве энергоисточника многоцелевого атомно-опреснительного комплекса (МАК), предназначенного для обеспечения пресной водой Крыма, а также обеспечения электрической и тепловой энергией западной части Краснодарского края.

**Ключевые слова:** ядерный реактор ВБЭР-600, многоцелевой атомно-опреснительный комплекс, обратный осмос, водоснабжение Крыма, энергосистема Краснодарского края.