

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 (9) 2017 г.

Сосновый Бор  
2017

---

---

# ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Периодический рецензируемый научно-технический сборник  
№ 3 (9) 2017

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**, кандидат химических 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», 2017

# Содержание

## Выпуск № 3 (9) 2017

Предисловие . . . . .	7
<i>Исследование динамики и создание технологии испытаний объектов с ЯЭУ</i>	
В. С. Грановский, В. К. Ефимов, И. В. Костров, В. С. Погорелов Анализ и интерпретация результатов испытаний оборудования паротурбинной установки . . . . .	8
<i>Моделирование и исследование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов объектов с ЯЭУ</i>	
В. Г. Артемов, А. С. Иванов, Р. Э. Зинатуллин, А. С. Карпов Результаты верификации комплекса программ САПФИР_95&RC при моделировании экспериментов на критическом стенде «АКСАМИТ» . . . .	18
<i>Химические технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, радиохимические и материаловедческие исследования</i>	
О. Ю. Пыхтеев, А. А. Ефимов, Л. Н. Москвин Направленное регулирование структуры и защитных свойств оксидных пленок, образующихся на поверхности сталей при контакте с водными средами . . . . .	26
В. С. Гурский, Е. Ю. Харитонова, Ю. В. Цапко Ионообменные смолы как источник примесных органических соединений . . .	44
<i>Исследование процессов при тяжелых авариях на объектах атомной энергетики</i>	
В. И. Альмяшев, С. В. Бешта, С. А. Витоль, В. В. Гусаров, С. Ю. Котова, Е. В. Крушинов, Д. Б. Лопух, А. В. Лысенко, Л. П. Мезенцева, В. Б. Хабенский Экспериментальное исследование фазообразования в системе $UO_2-SiO_2$ . . . . .	50
<i>Информационные сообщения</i>	
Д. И. Тригубов, А. Л. Дмитриев, И. Е. Батягин, Л. И. Спиридонова Экспериментальные исследования возможности эксплуатации паропроизводящих установок ЯЭУ транспортного типа при разгерметизации системы компенсации давления первого контура . . . . .	71
<i>Информация для авторов</i>	
Требования к оформлению и содержанию статей, публикуемых в научно-техническом сборнике «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок» . . . . .	75
Правила подачи материалов в редакцию . . . . .	79

## Предисловие

В девятом выпуске периодического рецензируемого научно-технического сборника «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок» в рубрике «Исследование динамики и создание технологии испытаний объектов с ЯЭУ» публикуется статья «Анализ и интерпретация результатов испытаний оборудования паротурбинной установки» с результатами позитивного опыта использования расчетного моделирования в процессе проведения испытаний оборудования ПТУ на специализированных стендах завода изготовителя.

В рубрике «Моделирование и исследование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов объектов с ЯЭУ» представлена статья «Результаты верификации комплекса программ САПФИР\_95&RC при моделировании экспериментов на критическом стенде «АКСАМИТ» с результатами верификации комплекса программ САПФИР\_95&RC, полученными при моделировании экспериментов, выполненных на критическом стенде «АКСАМИТ» с малогабаритным реактором на быстрых нейтронах с высокообогащенным топливом.

В рубрике «Химические технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, радиохимические и материаловедческие исследования» публикуются статьи «Направленное регулирование структуры и защитных свойств оксидных пленок, образующихся на поверхности сталей при контакте с водными средами» и «Ионообменные смолы как источник примесных органических соединений» с результатами, актуальными для повышения коррозионной стойкости, продления ресурса оборудования и оптимизации водно-химических режимов технологических контуров атомных и тепловых энергетических установок.

В рубрике «Исследование процессов при тяжелых авариях на объектах атомной энергетики» представлена статья «Экспериментальное исследование фазообразования в системе  $UO_2-SiO_2$ ». Опубликованные в статье данные актуальны для повышения точности прогнозирования сценариев внекорпусной стадии тяжелой аварии на АЭС, а также для разработки новых материалов атомной энергетики, в том числе ядерного топлива.

В рубрике «Информационные сообщения» размещено информационное сообщение «Экспериментальные исследования возможности эксплуатации паропроизводящих установок ЯЭУ транспортного типа при разгерметизации системы компенсации давления первого контура». В сообщении приведены результаты экспериментальных исследований по эксплуатации паропроизводящей установки стенда-прототипа транспортной ЯЭУ с реактором водо-водяного типа при разгерметизации системы компенсации давления первого контура. Полученные результаты актуальны для обоснования возможности эксплуатации паропроизводящих установок транспортных ЯЭУ при разгерметизации системы компенсации давления первого контура и расширения границ использования паропроизводящих установок, действующих АПЛ ВМФ и атомных надводных кораблей.

В рубрике «Информация для авторов» даны ссылки на Правила подготовки и подачи материалов в редакцию для публикации в научно-техническом сборнике «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок».

УДК 621.165

## **Анализ и интерпретация результатов испытаний оборудования паротурбинной установки**

*В. С. Грановский, В. К. Ефимов, И. В. Костров, В. С. Погорелов*

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

### **Аннотация**

В статье представлены некоторые результаты испытаний отдельного оборудования паротурбинной установки (ПТУ): паровой турбины, турбонасоса и регулирующего клапана турбонасоса, проведенных на специализированных стендах завода изготовителя.

**Ключевые слова:** ядерная энергетическая установка, математическая модель, паротурбинная установка, расход пара, протечки, энтальпия потока, сжимаемость парового потока, число Рейнольдса.

## **Результаты верификации комплекса программ САПФИР\_95&RC при моделировании экспериментов на критическом стенде «АКСАМИТ»**

*В. Г. Артемов, А. С. Иванов, Р. Э. Зинатуллин, А. С. Карпов*

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

### **Аннотация**

Приведены результаты верификации комплекса программ САПФИР\_95&RC, полученные при моделировании экспериментов, выполненных на критическом стенде «АКСАМИТ» с малогабаритным реактором на быстрых нейтронах с высокообогащенным топливом.

**Ключевые слова:** комплекс программ, расчет, верификация, критический стенд, быстрый реактор, высокообогащенное топливо, эксперимент.

УДК 620.193:620.197.3

## Направленное регулирование структуры и защитных свойств оксидных пленок, образующихся на поверхности сталей при контакте с водными средами

*О. Ю. Пыхтеев<sup>1</sup>, А. А. Ефимов<sup>1</sup>, Л. Н. Москвин<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет, Институт химии», Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

На основании автоклавного моделирования процессов коррозии углеродистых сталей при контакте с водными растворами антикоррозионных добавок подтверждено объяснение механизма образования оксидных пленок на поверхности сталей при их контакте с водными растворами, как гетерогенной реакции между соединениями Fe(III), присутствующими в растворах, и атомами элементарного железа на поверхности металла.

Приведены результаты исследований влияния форм существования железа в водных растворах, контактирующих с поверхностью сталей, на структуру и защитные свойства оксидных пленок, образующихся на поверхности сталей. Установлено, что морфология и структура оксидных пленок определяется формами существования и молекулярно-массовым составом соединений железа в контактирующих со сталью растворах. При этом даже «самопроизвольно» образующиеся оксидные слои на поверхности сталей, контактирующих с водой без специальных добавок антикоррозионных реагентов, снижают скорость коррозии сталей во времени.

Показано, что защитные свойства образующихся оксидных пленок, проявляющиеся в снижении скорости коррозии металла, становятся тем лучше, чем меньше число атомов железа входит в состав присутствующих в растворе наночастиц соединений Fe(III), которые взаимодействуют с атомами металлического железа на поверхности сталей. С учетом этого обстоятельства обосновывается возможность создания условий для целенаправленного образования защитных оксидных пленок с оптимальным фазовым составом и морфологией, как за счет предварительного растворения сталей в растворах соответствующего состава, так и за счет дозирования в растворы специально синтезированных комплексных соединений Fe(III) с кислородсодержащими лигандами.

**Ключевые слова:** перлитные стали, железо, коррозия, пероксид водорода, продукты гидролиза, оксидные пленки, кислород, полимеры, водные растворы, ацетаты, гидразин, трилон Б.

УДК 66.063:5433

## **Ионообменные смолы как источник примесных органических соединений**

*В. С. Гурский, Е. Ю. Харитонова, Ю. В. Цанко*

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

### **Аннотация**

Приведены результаты изучения отечественных и зарубежных ионообменных смол, используемых в системах водоподготовки объектов ядерной энергетики, с точки зрения вымывания из них в процессе эксплуатации органических соединений. На основании экспериментальных данных оценена скорость выхода органических веществ в воду высокой чистоты из промышленно выпускаемых ионитов ряда зарубежных и отечественных производителей. Предложена методика экспрессного определения скорости вымывания органических веществ в статических условиях. Полученные результаты могут использоваться в качестве дополнительного критерия при выборе ионообменных смол с оптимальными свойствами для водоподготовки.

**Ключевые слова:** ионообменные смолы, продукты деструкции, общий органический углерод.



## Экспериментальное исследование фазообразования в системе $\text{UO}_2\text{--SiO}_2$

<sup>1</sup> В. И. Альмяшев, <sup>2</sup> С. В. Бешта, <sup>1</sup> С. А. Витоль, <sup>3</sup> В. В. Гусаров, <sup>1</sup> С. Ю. Котова,  
<sup>1</sup> Е. В. Крушинов, <sup>4</sup> Д. Б. Лопух, <sup>1</sup> А. В. Лысенко, <sup>5</sup> Л. П. Мезенцева, <sup>1</sup> В. Б. Хабенский

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

<sup>2</sup> Королевский технологический институт (КТН), Стокгольм, Швеция

<sup>3</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
им. В. И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup> ФГБУН «Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН», Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

Представлены результаты экспериментального исследования фазовых равновесий в системе  $\text{UO}_2\text{--SiO}_2$ . Определен ход кривой ликвидуса в высокотемпературной части системы. Уточнено положение бинодали области расслаивания. Построена диаграмма состояния системы  $\text{UO}_2\text{--SiO}_2$ . На основании топологии диаграммы состояния, а также особенностей микроструктуры исследованных образцов, сделано предположение о наличии в системе соединения, отвечающего составу  $\text{U}_{1+x}\text{Si}_{1-x}\text{O}_4$ . Полученные данные актуальны для повышения точности прогнозирования сценариев внекорпусной стадии тяжелой аварии на АЭС и при разработке новых материалов для атомной энергетики, в том числе ядерного топлива.

**Ключевые слова:** диоксид урана, диоксид кремния, фазовые равновесия, фазовая диаграмма, расслаивание, индукционная плавка в холодном тигле, тяжелые аварии.

УДК 621.039.524.441:621.039.566:621.039.588

## **Экспериментальные исследования возможности эксплуатации паропроизводящих установок ЯЭУ транспортного типа при разгерметизации системы компенсации давления первого контура**

*Д. И. Тригубов, А. Л. Дмитриев, И. Е. Батягин, Л. И. Спиридонова*

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

### **Аннотация**

В информационном сообщении приведены результаты экспериментальных исследований по эксплуатации паропроизводящей установки (ППУ) стенда-прототипа транспортной ядерной энергетической установки (ЯЭУ) с реактором водо-водяного типа при разгерметизации системы компенсации давления первого контура. Подтверждена возможность эксплуатации ППУ с различным количеством отключенных групп баллонов системы газа высокого давления (ГВД), вплоть до отключения всех групп баллонов системы ГВД от первого контура. Полученные результаты актуальны для обоснования возможности эксплуатации ППУ транспортных ЯЭУ при разгерметизации системы компенсации давления первого контура и расширения границ использования ППУ действующих АПЛ ВМФ и атомных надводных кораблей.

**Ключевые слова:** паропроизводящая установка, реактор водо-водяного типа с водой под давлением, система газа высокого давления, компенсатор объема, маневрирование мощностью реактора, атомная подводная лодка.