

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

# ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

№ 4 (26) 2021

Сосновый Бор

# ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Периодический рецензируемый научно-технический сборник

№ 4 (26) 2021

Издается с 2015 года

Сборник распространяется на территории Российской Федерации

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

**Учредитель:** ФЕДЕРАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Научно-исследовательский технологический институт имени 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 № 4 (26) 2021

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

*Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, В.П. Поваров, М.Т. Слепов*

Обнаружение эффектов кавитации в главных циркуляционных контурах реакторной установки ВВЭР-1200 по сигналам датчиков пульсации давления ..... 16

Химические технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, радиохимические и материаловедческие исследования

*Д.О. Кирсанов, А.В. Легин, В.А. Бабаин*

Оптическая спектрометрия и мультисенсорная потенциометрия с хемометрической обработкой данных для онлайн мониторинга в атомной промышленности ..... 25

Технологии создания систем контроля и управления ЯЭУ

*В.А. Василенко, А.М. Панкин, И.А. Тутнов*

Разработка алгоритмов диагностирования технических объектов различного назначения ..... 38

Исследование процессов при тяжёлых авариях на объектах атомной энергетики

*В.Б. Хабенский, В.И. Альмяшев, А.В. Тимчук, 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-B<sub>4</sub>C ..... 53

*В.Б. Хабенский, В.С. Грановский, В.А. Василенко, В.И. Альмяшев, Е.В. Крушинов, С.А. Витоль, А.А. Сулацкий, В.В. Гусаров*

Определение теплопроводности корки, формирующейся на расплаве кориума при тяжёлой аварии на АЭС ..... 67

## **Обнаружение эффектов кавитации в главных циркуляционных контурах реакторной установки ВВЭР-1200 по сигналам датчиков пульсации давления**

*Г.В. Аркадов<sup>1</sup>, В.И. Павелко<sup>1</sup>, В.П. Поваров<sup>2</sup>, М.Т. Слепов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>АО «Акционерное общество «Научно-технический центр «Диапром»,  
Калужская область, г. Обнинск, Россия

<sup>2</sup>Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС,  
г. Нововоронеж Воронежской обл., Россия

### **Аннотация**

В настоящее время реакторные установки ВВЭР-1200 оснащены системами технического диагностирования, позволяющими выявлять и идентифицировать кавитационные явления в главных циркуляционных контурах.

На основе анализа большого объема экспериментального материала в статье рассматриваются условия возникновения кавитационных явлений в главных циркуляционных контурах реакторной установки ВВЭР-1200. Представленные в статье данные подтверждают наличие кавитационных явлений в циркуляционных петлях реакторных установок ВВЭР-1200.

Обсуждаются ограниченные возможности испытаний главных циркуляционных насосных агрегатов, проводимых на специализированных стендах, ввиду невозможности в полной мере воспроизвести как конфигурацию циркуляционной петли, так и характеристики процессов, протекающих в ней на АЭС.

**Ключевые слова:** ВВЭР-1200, главный циркуляционный контур, кавитация, датчик пульсации давления, акселерометр, резонанс, система технической диагностики, среднеквадратичное значение, автоспектральная плотность мощности, акустическая стоячая волна, система контроля.

## Оптическая спектрометрия и мультисенсорная потенциометрия с хемометрической обработкой данных для онлайн мониторинга в атомной промышленности

*<sup>1, 2, 3</sup>Д.О. Кирсанов, <sup>1, 2</sup>А.В. Легин, <sup>2, 4</sup>В.А. Бабаин*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Институт химии, Санкт-Петербург, Россия.

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО, Лаборатория искусственных сенсорных систем, Санкт-Петербург, Россия.

<sup>3</sup>ООО «Сенсорные Системы», Санкт-Петербург, Россия.

<sup>4</sup>Компания «ТриАрк Майнинг», Санкт-Петербург, Россия.

### Аннотация

Замыкание ядерного топливного цикла предусматривает переработку облученного ядерного топлива. Выделение урана и плутония производят с помощью ПУРЕКС-процесса – жидкостной экстракцией из азотнокислого раствора трибутилфосфатом. В настоящем обзоре рассматриваются возможности онлайн контроля состава технологических растворов методами оптической спектроскопии (ультрафиолетовой-видимой, рамановской и ближней инфракрасной спектроскопии) и мультисенсорной потенциометрии. Показано, что применение современных хемометрических методов обработки аналитических сигналов позволяет получать достоверные данные о содержании контролируемых компонентов (актинидов, лантанидов, азотной кислоты) в технологических растворах.

**Ключевые слова:** оптическая спектроскопия, БИК-спектроскопия, контроль технологических процессов, потенциометрия, хемометрика.

## **Разработка алгоритмов диагностирования технических объектов различного назначения**

*В.А. Василенко<sup>1</sup>, А.М. Панкин<sup>1</sup>, И.А. Тутнов<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

### **Аннотация**

В статье рассмотрены основные этапы разработки алгоритмов диагностирования сложных технических объектов, для которых предполагается создание систем диагностирования нового поколения. Ранее создаваемые системы диагностирования в основном ориентировались на решение задач неразрушающего контроля, которые не позволяют в достаточной мере выполнять оценку остаточного ресурса контролируемых объектов. Для повышения точности диагностирования состояния изделий и систем в процессе их эксплуатации при проектировании этих объектов необходимо предусмотреть возможность получения наиболее информативных измерительных данных о их техническом состоянии. С этой целью в алгоритмы диагностирования новых систем должны вводиться блоки, определяющие наиболее информативные диагностические признаки объектов, которые могут быть получены при проведении соответствующих диагностических измерений. Особое внимание необходимо обратить на оценку неопределенностей прямых и косвенных измерений. Эти вопросы еще не решены в достаточной мере, о чем свидетельствуют нормативные документы по метрологии.

**Ключевые слова:** технический объект, контроль, диагностирование, техническое состояние, диагностический признак, математическая модель, диагностическая модель, измерительная информация, диагноз, неопределенность.

## Экспериментальное определение точки пространственной инверсии сосуществующих фаз расплава в системе U-Zr-Fe-O-B<sub>4</sub>C

*В.Б. Хабенский<sup>1</sup>, В.И. Альмяшев<sup>1,2,3</sup>, А.В. Тимчук<sup>1</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> ФГБУН «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-B<sub>4</sub>C. В эксперименте исходным состоянием являлась двухжидкостная оксидно-металлическая субокисленная ванна расплава кориума с нижним положением металлической жидкости и соотношением U/Zr, характерным для условий аварии на АЭС Фукусима-Дайичи. В процессе эксперимента в системе U-Zr-Fe-O-B<sub>4</sub>C последовательно малыми порциями увеличивалась массовая доля B<sub>4</sub>C 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 B<sub>4</sub>C 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, карбид бора, фазовые равновесия, жидкофазное расслаивание, пространственная инверсия жидких фаз, индукционная плавка в холодном тигле (ИПХТ), тяжелые аварии.

## Определение теплопроводности корки, формирующейся на расплаве кориума при тяжёлой аварии на АЭС

*В.Б. Хабенский<sup>1</sup>, В.С. Грановский<sup>1</sup>, В.А. Василенко<sup>1</sup>, В.И. Альмяшев<sup>1,2,3</sup>,  
Е.В. Крушинов<sup>1</sup>, С.А. Витоль<sup>1</sup>, А.А. Сулацкий<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> ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН», Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

В работе предложен новый метод определения теплопроводности оксидной корки, формирующейся на поверхности ванны расплава оксидно-металлического кориума, прототипного кориуму, который образуется при тяжелой аварии на АЭС с ВВЭР. В предложенном методе способ формирования корки, определяющий ее элементный и фазовый составы, микроструктурные особенности, включая характер пористости, максимально приближен к реакторным условиям. Приведен обзор известных способов определения теплопроводности оксидных корок кориума с анализом точности измерения и ограничений, связанных с технологией изготовления экспериментальных образцов. С использованием предложенного метода определена теплопроводность оксидной корки, образованной на поверхности расплава в экспериментах проекта CORDEB. Продемонстрирована хорошая сходимость результатов экспериментов и выполненных оценок. Предложенный метод может быть использован для уточнения теплопроводности корки кориума при расчетном анализе внутрикорпусной стадии тяжелой аварии на АЭС с водо-водяными реакторами.

**Ключевые слова:** расплав кориума, корка кориума, теплопроводность, тяжелые аварии.