

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.

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-B₄C 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. Аркадов¹, В.И. Павелко¹, В.П. Поваров², М.Т. Слепов²

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

²Филиал 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

^{1, 2, 3}Д.О. Кирсанов, ^{1, 2}А.В. Легин, ^{2, 4}В.А. Бабаин

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Институт химии, Санкт-Петербург, Россия.

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

³ООО «Сенсорные Системы», Санкт-Петербург, Россия.

⁴Компания «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. Василенко¹, А.М. Панкин¹, И.А. Тутнов²

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

² 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-B₄C

*В.Б. Хабенский¹, В.И. Альмяшев^{1,2,3}, А.В. Тимчук¹, Е.Б. Шуваева¹,
Е.В. Крушинов¹, С.А. Витоль¹, А.А. Сулацкий¹, С.Ю. Котова¹, В.В. Гусаров⁴*

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

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

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

⁴ 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-B₄C. 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-B₄C последовательно малыми порциями увеличивалась массовая доля B₄C 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 B₄C 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. Хабенский¹, В.С. Грановский¹, В.А. Василенко¹, В.И. Альмяшев^{1,2,3},
Е.В. Крушинов¹, С.А. Витоль¹, А.А. Сулацкий¹, В.В. Гусаров⁴*

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

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

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

⁴ 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.