

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

№ 1 (15) 2019 г.

Сосновый Бор  
2019

---

---

# ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Периодический рецензируемый научно-технический сборник  
№ 1 (15) 2019

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».

## 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**, доктор 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**, доктор технических 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».

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».**

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

# Содержание

## Выпуск № 1 (15) 2019

Предисловие главного редактора . . . . .	7
<b>Информационные сообщения</b>	
Л. Н. Москвин История создания в НИТИ им. А. П. Александрова ведущей научной школы по физико-химическим и химико-технологическим проблемам атомной энергетики. К пятидесятилетию Отдела химико-технологических исследований НИТИ . . . . .	9
Л. Н. Москвин Доверие АП придавало дополнительные силы. Воспоминания к 100-летию со дня рождения академика Анатолия Петровича Александрова . . . . .	26
<b>Моделирование и исследование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов объектов с ЯЭУ</b>	
М. В. Суслов, И. Г. Петкевич, М. А. Увакин Обоснование процедуры расхолаживания РУ ВВЭР-1200 в условиях обесточивания с помощью ПК КОРСАР/ГП . . . . .	32
Е. В. Вилюра, Г. Ю. Волков, В. И. Мелихов, О. И. Мелихов Тестирование и верификация кода WANA, предназначенного для моделирования конденсационного гидроудара . . . . .	45
<b>Химические технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, радиохимические и материаловедческие исследования</b>	
И. М. Яснев, В. С. Гурский Влияние конструкционных материалов на термическое разложение теплоносителя на основе кремнийорганической жидкости ФМ-1 . . . . .	56
<b>Исследование процессов при тяжелых авариях на объектах атомной энергетики</b>	
А. А. Сулацкий, В. Б. Хабенский, В. С. Грановский, В. И. Альмяшев, Е. В. Крушинов, Е. В. Шевченко, С. А. Витоль, С. Ю. Котова, Е. К. Каляго, Е. Б. Шуваева, В. Р. Булыгин, Е. М. Беляева Экспериментальное исследование влияния структуры ванны расплава и поверхностной оксидной корки на кинетику окисления расплава кориума . . . . .	66
<b>Информация для авторов</b>	
Требования к оформлению и содержанию статей, публикуемых в научно-техническом сборнике «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок» . . . . .	81
Правила подачи материалов в редакцию . . . . .	85

УДК 001 (062)

**История создания в НИТИ им. А. П. Александрова  
ведущей научной школы по физико-химическим и химико-  
технологическим проблемам атомной энергетики.  
К пятидесятилетию Отдела химико-технологических  
исследований НИТИ**

*Л. Н. Москвин*<sup>1, 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**

В статье, посвященной 50-летию отдела химико-технологических исследований (ОХТИ) ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова», излагается авторское видение истории создания отдела, возникновения, становления и развития химического и радиохимического научных направлений в структуре предприятия, изначально предназначенного только для отработки и ресурсных испытаний ядерных энергетических установок (ЯЭУ) транспортного назначения на полномасштабных наземных стендах-прототипах. Приведены вызывающие неподдельный интерес жизненные эпизоды общения автора с выдающимися учеными-ядерщиками академиками А. П. Александровым и В. А. Легасовым, оказавшими существенное влияние на формирование научной школы по физико-химическим и химико-технологическим проблемам в атомной энергетике. Приведена оценка научных достижений отдельных сотрудников и коллектива отдела в целом за время существования ОХТИ. Автор статьи — заслуженный деятель науки Российской Федерации, лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, д. х. н., проф. Л. Н. Москвин — организатор и первый руководитель ОХТИ.

**Ключевые слова:** ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова», отдел химико-технологических исследований, аналитика, контроль, радиохимические технологии, экология, радиоэкология.

**Доверие АП придавало дополнительные силы.  
Воспоминания к 100-летию со дня рождения академика  
Анатолия Петровича Александрова**

*Л. Н. Москвин*<sup>1, 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**

В статье приведены личные воспоминания первого руководителя отдела химико-технологических и материаловедческих исследований ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова» Л. Н. Москвина о встречах с основателем НИТИ академиком А. П. Александровым, подготовленные и ранее опубликованные к его 100-летию со дня рождения<sup>1</sup>. Цель повторной публикации воспоминаний — воссоздать атмосферу становления и развития НИТИ и отдела химико-технологических и материаловедческих исследований, донести до читателей масштабность, многогранность и обаяние личности А. П. Александрова, рассказать о его уникальных человеческих качествах и огромной личной ответственности за эффективность и безопасность развития атомной энергетики.

**Ключевые слова:** атомная энергетика, академия наук, академик А. П. Александров, НИТИ, Радиевый институт, Курчатовский институт, радиохимия, ЛАЭС.

## **Обоснование процедуры расхолаживания РУ ВВЭР-1200 в условиях обесточивания с помощью ПК КОРСАР/ГП**

*М. В. Сулов, И. Г. Петкевич, М. А. Увакин*

*АО «ГИДРОПРЕСС»,  
г. Подольск, Московская область, Россия*

### **Аннотация**

Работа посвящена описанию теплогидравлического расчета режима «Полное обесточивание», выполненного с целью анализа процессов, протекающих в этом режиме на энергоблоках с РУ ВВЭР-1200.

Главной особенностью рассматриваемого режима является расхолаживание РУ в условиях потери нормального электропитания в режиме естественной циркуляции. При этом, осуществление расхолаживания требует увеличения концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура, заполнения компенсатора давления и парогенераторов.

В связи с этим, в работе большое внимание уделено моделированию таких процессов, как:

- заполнение парогенератора «холодной» водой;
- впрыск теплоносителя в заполненный компенсатор давления;
- расхолаживание объема теплоносителя под крышкой реактора путем сброса среды в барботер.

Теплогидравлический расчет выполнялся с применением программного комплекса КОРСАР/ГП. Расчетная схема полностью описывает объем первого контура и частично объем второго контура (парогенераторы, паропроводы до стопорных клапанов турбины), а также содержит модели систем, оборудования и регуляторов, участвовавших в рассматривавшемся процессе.

**Ключевые слова:** ВВЭР, обесточивание, расхолаживание, теплогидравлический расчет, естественная циркуляция, КОРСАР/ГП.

УДК 621.039

## Тестирование и верификация кода WANA, предназначенного для моделирования конденсационного гидроудара

*Е.В. Вилюра<sup>1,2</sup>, Г.Ю. Волков<sup>1,2</sup>, В.И. Мелихов<sup>1,2</sup>, О.И. Мелихов<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> НИУ МЭИ, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> АО «ЭНИЦ», г. Электрогорск, Московская обл., Россия

### Аннотация

В статье приведено краткое описание кода WANA, предназначенного для моделирования конденсационных гидроударов. Основные уравнения кода представляют собой одномерную двухжидкостную двухтемпературную двухскоростную модель двухфазной смеси. Гиперболичность дифференциальных уравнений обеспечивается учетом силы присоединенных масс. Интегрирование уравнений осуществляется с применением высокоточной численной схемы. Представлены результаты тестирования кода WANA на ряде задач однофазной и двухфазной гидродинамики. Проведена верификация этого кода на экспериментах по конденсационным гидроударам.

**Ключевые слова:** конденсационный гидроудар, двухфазная гидродинамика, расчетный код, моделирование, верификация.

УДК 547.245+ 620.199

## **Влияние конструкционных материалов на термическое разложение теплоносителя на основе кремнийорганической жидкости ФМ-1**

*И. М. Яснев, В. С. Гурский*

ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова»,  
г. Сосновый Бор, Ленинградская область, Россия

### **Аннотация**

В статье приведены результаты исследования термической стабильности кремнийорганической жидкости ФМ-1 в диапазоне температур (280–380) °С, полученные методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Исследовано влияние конструкционных материалов (нержавеющая сталь, титан, алюминий) на характер термической деструкции жидкости ФМ-1. Установлено, что нержавеющая сталь и титан в изученном диапазоне температур не оказывают значимого влияния на процесс термической деструкции ФМ-1. В случае контакта жидкости ФМ-1 с алюминием при температурах выше 340 °С механизм деструкции меняется — увеличивается образование веществ с малыми временами удерживания с одновременным протеканием коррозии алюминия. Совокупность физико-химических свойств кремнийорганической жидкости ФМ-1 (высокие радиационная и термическая стабильность, низкие давление паров и вязкость при рабочих температурах) позволяют рассматривать ее в качестве перспективного теплоносителя ядерной энергетической установки космического назначения.

**Ключевые слова:** ядерная энергетическая установка, кремнийорганический теплоноситель, термическая деструкция, конструкционные материалы, нержавеющая сталь, титан, алюминий.



## **Экспериментальное исследование влияния структуры ванны расплава и поверхностной оксидной корки на кинетику окисления расплава кориума**

*А. А. Сулацкий, В. Б. Хабенский, В. С. Грановский, В. И. Альмяшев,  
Е. В. Крушинов, Е. В. Шевченко, С. А. Витоль, С. Ю. Котова, Е. К. Каляго,  
Е. Б. Шуваева, В. Р. Булыгин, Е. М. Беляева*

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

### **Аннотация**

В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния структуры ванны расплава (одно- и двухжидкостной расплав) и наличия оксидной корки на поверхности расплава на кинетику окисления расплава кориума. Показано, что при отсутствии оксидной корки на поверхности расплава структура ванны расплава не влияет ни на качественные (режим голодания по окислителю), ни на количественные характеристики кинетики окисления. При наличии на поверхности расплава оксидной корки скорость окисления резко снижается, однако процесс окисления по-прежнему находится в режиме голодания по окислителю. Полученные экспериментальные результаты применимы как для разработки компьютерных алгоритмов поведения расплава в кодах, относящихся к внутрикорпусному удержанию кориума при тяжелых авариях, так и для верификации данных кодов.

**Ключевые слова:** тяжелые аварии, внутрикорпусное удержание, кориум, кинетика окисления, индукционная плавка в холодном тигле.