ISSN 2414-5726

# ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК



## № 2 (32) 2023



ISSN 2414-5726

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

№ 2 (32) 2023

Сосновый Бор

## ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Периодический рецензируемый научно-технический сборник

№ 2 (32) 2023

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.

ŀ

#### ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

В.И. Альмяшев, кандидат химических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

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,	члкорр. РАН, доктор химических наук, Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург.
А.Л. Дмитриев,	ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.
О.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,	(выпускающий редактор), 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.В. Родинков, доктор химических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет.

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

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

А.А. Сулацкий, кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».

**В.Б. Хабенский**, доктор технических наук, профессор, эксперт в области расчетно-экспериментального обоснования безопасности и теплотехнической надежности ЯЭУ.

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) 60546 — отв. секретарь редколлегии.

Факс: 8 (813 69) 23672. E-mail: foton@niti.ru; Интернет сайт: www.niti.ru.

Подписной индекс 43300 в объединенном каталоге «Пресса России».

Научно-технический сборник «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок» 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 специальностям:

1.4.2. Аналитическая химия (химические науки); 1.4.4. Физическая химия (химические науки);

2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность (технические науки).

При перепечатке ссылка на периодический рецензируемый научно-технический сборник «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок» обязательна. FEDERAL NUCLEAR ORGANIZATION Federal state unitary enterprise "Alexandrov Research Institute of Technology"

# NUCLEAR PROPULSION REACTOR PLANTS. LIFE CYCLE MANAGEMENT TECHNOLOGIES

COLLECTION OF PAPERS

№ 2 (32) 2023

Sosnovy Bor

## NUCLEAR PROPULSION REACTOR PLANTS. LIFE CYCLE MANAGEMENT TECHNOLOGIES

#### **Collection of papers. Periodical edition**

#### № 2 (32) 2023

Published since 2015 The edition is distributed in the Russian Federation

#### EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief	V. A. Vasilenko,	Dr. Sc. (Engineering), Professor, Scientific Coordinator of Alexandrov Research Institute of Technology, Sosnovy Bor.
		MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD
	V.I. Almjashev,	Cand. Sc. (Chemistry), Alexandrov Research Institute of Technology, Sosnovy Bor.
	V.I. Bursuk,	Dr. Sc. (Engineering), Director of the Service Center, JSC Concern Avrora SPA, Saint Petersburg.
	V.S. Gursky,	Dr. Sc. (Engineering), Alexandrov Research Institute of Technology, Sosnovy Bor.
	V.V. Gusarov,	corresponding member of RAS, Dr. Sc. (Chemistry), Grebenshchikov Silicate Chemistry Institute of RAS, Saint Petersburg.
	A.L. Dmitriev,	Alexandrov Research Institute of Technology, Sosnovy Bor.
	A.A. Efimov,	Dr. Sc. (Engineering), Alexandrov Research Institute of Technology, Sosnovy Bor.
	A.V. Elshin,	Dr. Sc. (Engineering), Alexandrov Research Institute of Technology, Sosnovy Bor.
	S.S. Ermakov,	Dr. Sc. (Chemistry), Professor, Saint Petersburg State University.
	V.B. Khabensky,	Dr. Sc. (Engineering), Professor, Expert in the field of numerical and experimental analyses for the safety and thermal reliability of nuclear propulsion reactor plants.
	Yu.V. Kriukov,	Assistant Editor, Cand. Sc. (Engineering), Alexandrov Research Institute of Technology, Sosnovy Bor.
	Yu.A. Migrov,	Dr. Sc. (Engineering), Alexandrov Research Institute of Technology, Sosnovy Bor.
	L.N. Moskvin,	Dr. Sc. (Chemistry), Professor, Saint Petersburg State University.
	E.B. Pankina,	Cand. Sc. (Engineering), Alexandrov Research Institute of Technology, Sosnovy Bor.
	S.A. Petrov,	Dr. Sc. (Engineering), Research Institute of Navy Shipbuilding and Armaments, Saint Petersburg.
	O.V. Rodinkov,	Dr. Sc. (Chemistry), Professor, Saint Petersburg State University.
	O.B. Samoilov,	Dr. Sc. (Engineering), Professor, JSC Afrikantov OKBM, Nizhny Novgorod.
	V.L. Stolyarova,	academician of RAS, Dr. Sc. (Chemistry), Grebenshchikov Silicate Chemistry Institute of RAS, Saint Petersburg
	A.A. Sulatsky,	Cand. Sc. (Engineering), Alexandrov Research Institute of Technology, Sosnovy Bor.
	Yu.E. Zevatsky	Dr. Sc. (Chemistry), NOVBYTCHIM Company, Saint Petersburg

#### **FOUNDER:**

Federal nuclear organization. Federal state unitary enterprise "Alexandrov Research Institute of Technology".

#### **PUBLICATION IS REGISTERED:**

Federal service of supervision for communications. Registration certificate ΠИ No. ΦC77–58865, 28.07.14.

#### **EDITORIAL OFFICE ADDRESS:**

FNO FSUE "Alexandrov NITI", 72 Koporskoye shosse, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540 Russia

Tel.: 8 (813 69) 60546 — Assistant Editor.

#### Fax: 8 (813 69) 23672. E-mail: foton@niti.ru; Website: www.niti.ru. Subscription number in the "Russian Press" aggregate catalogue is 43300.

Subscription number in the Russian Press aggregate catalogue is 40000.

This Collection of Papers is included in the List of peer-reviewed scientific editions accredited for publishing the main results of doctoral and candidate dissertation studies in the following disciplines:

1.4.2. Analytical Chemistry (Chemical Sciences); 1.4.4. Physical Chemistry (Chemical Sciences);

2.4.9. Nuclear Power Installations, Fuel Cycle, Radiation Safety (Engineering Sciences).

**Copyright notice:** Reproduction of this edition in whole or in part shall always include the words "Reprinted from Collection of Papers "Nuclear propulsion reactor plants. Life cycle management technologies".

## Содержание

## Выпуск № 2 (32) 2023

Предисловие главного редактора7
Моделирование и исследование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов объектов с ЯЭУ
В.Г. Артемов, Н.С. Нерсесян
О сопоставлении рассчитанной и измеренной реактивности в экспериментах
на критическом стенде с быстрым спектром нейтронов 10
А.С. Грицай, Д.Н. Донченко, В.С. Погорелов, С.Н. Румянцев, А.В. Ярушин
Влияние транзитного потока пара на расходную характеристику
поворотно-золотникового крана
В.А. Василенко, А.С. Грицай, Д.А. Кирпиков, Ю.В. Крюков
Обоснование эффективности применения автоматизированной системы
химического контроля при испытаниях транспортных ЯЭУ
на стендах-прототипах
Р.В. Фоменков, Р.Э. Зинатуллин
Методика обнаружения ОТВС с микродефектами оболочек твэлов
и результаты апробации заложенных в неё алгоритмов 41
Исследование процессов при тяжелых авариях на объектах атомной энергетики
И.А. Магола, Л.А. Матюшев, Е.Л. Шамрай, Н.А. Осмаков, А.Г. Митрюхин
Влияние выбора типа и конструкции теплоизоляции на количество дебриса,
формирующегося в ходе аварии с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР 54
А.А. Сулацкий, В.И. Альмяшев, Е.В. Шевченко, С.А. Витоль, Е.В. Крушинов, С.Ю. Катада, Б.К. Кладад, В.В. Билисти, Б.Б. Инадада, А.В. Тингин, Б.М. Бадада,
С.Ю. Котова, Е.К. Каляго, Б.Г. Булыгин, Е.Б. Шуваева, А.Б. Тимчук, Е.М. Беляева
Взаимодействие расплава тяжёлого жидкометаллического теплоносителя
с поступающеи в его объем водои. Часть 2. Анализ и обоощение 64
Understanding and appendix

Правила подачи материалов в редакцию	8	33
--------------------------------------	---	----

## **Contents**\*

Issue № 2 (32) 2023
Chief editor's foreword 7
Modeling and research of neutron and thermal-hydraulic processes in propulsion reactor plants
V.G. Artemov, N.S. Nersesian
On comparison between calculated and measured reactivity in experiments at a fast critical test facility
A.S. Gritsai, D.N. Donchenko, V.S. Pogorelov, S.N. Rumyantsev, A.V. Yarushin
Effect of transient steam flow on the flow characteristic of rotary slide valve
V.A. Vasilenko, A.S. Gritsai, D.A. Kirpikov, Yu.V. Kriukov
Analysis of the effectiveness of using automated chemical monitoring systems during testing of nuclear propulsion reactor plants in prototype facilities
R.V. Fomenkov, R.E. Zinatullin
Procedure for identifying SNF assemblies with micro defects of cladding and evaluation of procedure algorithms
Research of severe accidents in nuclear
I.A. Magola, L.A. Matyushev, E.L. Shamrai., Osmakov N.A., A.G. Mitryukhin
The influence of the type selection and design of thermal insulation on the amount of debris formed during an accident with loss of coolant at a nuclear power plant with PWR
A.A. Sulatsky, V.I. Almjashev, E.V. Shevchenko, S.A. Vitol, E.V. Krushinov, S.Yu. Kotova, E.K. Kalyago, V.R. Bulygin, E.B. Shuvaeva, A.V. Timchuk, E.M. Belyaeva
Interaction of molten heavy liquid metal coolant with inflow water Part 2. Analysis and Part 2. Analysis and correlation
Information for authors
Submission procedure
*The article's Conclusions section in English is placed at the end of the article, right before the Acknowledgements (if any) or List of References.

#### Предисловие главного редактора

В тридцать втором выпуске периодического рецензируемого научно-технического сборника «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок» продолжена публикация статей по актуальным тематическим направлениям.

В статьях, публикуемых в рубрике «Моделирование и исследование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов объектов с ЯЭУ», обсуждаются результаты и особенности использования измерительных систем для контроля параметров технологического оборудования ядерных энергетических установок при проведении испытаний на наземных стендах-прототипах.

В статье «О сопоставлении рассчитанной и измеренной реактивности в экспериментах на критическом стенде с быстрым спектром нейтронов» проанализированы особенности измерений реактивности в экспериментах со сбросом и извлечением органов регулирования на критическом стенде с быстрым спектром нейтронов. На основе расчетного моделирования измерений реактивности рассмотрено влияние на результаты экспериментов параметров запаздывающих нейтронов, внешнего источника нейтронов, а также пространственных эффектов, связанных с взаимным расположением детекторов нейтронов и органов регулирования в активной зоне.

В статье «Влияние транзитного потока пара на расходную характеристику поворотнозолотникового крана» приведены результаты испытаний поворотно-золотникового крана, регулирующего отбор пара из паропроводов тепловых и атомных электростанций. По результатам испытаний выявлено влияние транзитного потока пара в паропроводе на расходную характеристику крана, выполнен расчетный анализ указанного влияния.

В статье «Обоснование эффективности применения автоматизированной системы химического контроля при испытаниях транспортных ЯЭУ на стендах-прототипах» обсуждаются особенности использования автоматизированных систем химического контроля теплоносителя при проведении испытаний на стендах-прототипах транспортных ЯЭУ с водоводяными реакторами. Для подтверждения работоспособности автоматизированной системы химического контроля предлагается сопоставлять с использованием статистических методов результаты измерений автоматизированных систем химического контроля с измерениями, полученными в лабораторных условиях.

В статье «Методика обнаружения ОТВС с микродефектами оболочек твэлов и результаты апробации заложенных в неё алгоритмов» представлена методика обнаружения ОТВС с микродефектами в оболочках твэлов ЯЭУ транспортного назначения. Приведены результаты апробации методики по результатам нагрева негерметичных ОТВС на специализированном стенде дефектации.

В рубрике «Исследование процессов при авариях на объектах атомной энергетики» публикуются статьи с результатами экспериментальных исследований, актуальных при разработке создании систем безопасности и обеспечения безопасности АЭС.

В статье «Взаимодействие расплава тяжёлого жидкометаллического теплоносителя с поступающей в его объём водой. Часть 2. Анализ и обобщение» приведены результаты экспериментального исследования взаимодействия тяжёлого жидкометаллического теплоносителя (расплав свинцово-висмутовой эвтектики) с водой применительно к условиям аварии с разрывом трубки парогенератора. В статье «Влияние выбора типа и конструкции теплоизоляции на количество дебриса, формирующегося в ходе аварии с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР» приводится обзор совокупности задач определения количественных характеристик, состава, направлений оптимизации конструкции применяемых теплоизоляционных покрытий, решение которых требуется для выбора конструктивных характеристик систем безопасности и обеспечения безопасности АЭС.

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

Главный редактор научно-технического сборника, «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок», научный руководитель ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»,

д.т.н., профессор

В.А. Василенко

### **Chief editor's foreword**

The 32d issue of the periodically published peer-reviewed collection of papers "Nuclear propulsion reactor plants. Life cycle management technologies" continues publication of papers and information in the subject area of interest.

Under the subject heading "Modeling and research of neutron and thermal-hydraulic processes in nuclear propulsion reactor plants", the following papers are published that address the use of measurement systems for monitoring equipment parameters in nuclear propulsion reactor plants during testing at land-based prototype facilities:

"On comparison between calculated and measured reactivity in experiments at a fast critical test facility". The paper analyzes specific aspects of reactivity measurements in experiments with insertion and withdrawal of control rods at a fast critical test facility. Based on results of numerical simulation of reactivity measurements, the authors conclude on the influence of delayed neutron parameters, external neutron source, and spatial effects of relative positions of neutron detectors and control rods in the core on experiment results.

"Effect of transient steam flow on the flow characteristic of rotary slide valve". The paper presents results of testing of a rotary slide valve that controls extraction of steam from steam lines in nuclear and non-nuclear power plants. The testing results show the effect of transient steam flow in a steam line on the valve's flow characteristic. A numerical analysis of this effect is carried out.

"Analysis of the effectiveness of using automated chemical monitoring systems during testing of nuclear propulsion reactor plants in prototype facilities". The paper discusses the use of automated systems for chemical monitoring of coolant parameters during tests carried out in water cooled nuclear propulsion reactor prototype facilities. The authors suggest demonstrating the performance capability of the automated chemical monitoring system by using statistical methods to compare automated chemical monitoring results against laboratory measurements.

"Procedure for identifying SNF assemblies with micro defects of cladding and evaluation of procedure algorithms". The paper describes a procedure for identifying nuclear propulsion reactor SNF assemblies with micro defects in rod cladding. The procedure was tested by heating defective SNF assemblies in a purpose-designed ex-core setup. The testing results are presented.

Under the subject heading "**Research of accident processes in nuclear**", papers are published that present results of experimental studies important for the development of safety systems and ensuring the safety of nuclear power plants:

"Interaction of molten heavy liquid metal coolant with inflow water. Part 2. Analysis and correlation". The paper presents results of experimental study on the interaction between heavy liquid metal coolant (molten lead-bismuth eutectic) and water in the steam generator tube rupture accident.

"Impact of thermal insulation type and structure on the amount of debris generated in a loss of coolant accident at VVER NPP". The paper addresses the problems of selecting thermal insulation in terms of quantitative characteristics, composition, and design improvements. Results of this work are useful for the design of safety systems and ensuring the safety of nuclear power plants.

Under the subject heading "Information for authors":

References to the Procedure for submitting manuscripts to the collection of papers "Nuclear propulsion reactor plants. Life cycle management technologies".

Chief Editor of the collection of papers "Nuclear propulsion reactor plants. Life cycle management technologies", Academic Director of FSUE "Alexandrov NITI

Prof. Dr. V.A. Vasilenko

Allan

УДК 621.039.51:006.91

## О сопоставлении рассчитанной и измеренной реактивности в экспериментах на критическом стенде с быстрым спектром нейтронов

В.Г. Артемов, Н.С. Нерсесян

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

#### Аннотация

Проанализированы методические особенности измерений реактивности в экспериментах со сбросом и извлечением органов регулирования на критическом стенде с быстрым спектром нейтронов. На основе расчетного моделирования измерений рассмотрено влияние на результаты экспериментов параметров запаздывающих нейтронов, внешнего источника нейтронов, а также пространственных эффектов, связанных с взаимным расположением детекторов нейтронов и органов регулирования в активной зоне. Предложено использовать результаты расчетного моделирования измерений для учета методических особенностей экспериментов при сопоставлении расчетов, выполненных по прецизионным программам методом Монте-Карло, с экспериментальными данными.

Ключевые слова: реперные расчеты методом Монте-Карло, дифференциальная и интегральная эффективность РО СУЗ, параметры запаздывающих нейтронов, внешний источник нейтронов, пространственные эффекты, метод сброса, метод разгона.

## On comparison between calculated and measured reactivity in experiments at a fast critical test facility

#### V.G. Artemov, N.S. Nersesian

FSUE "Alexandrov NITI", Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

#### Abstract

The paper analyzes methodology considerations of reactivity measurements in experiments with insertion and withdrawal of control rods at a fast critical test facility. Such measurements were numerically simulated and simulation results were used to analyze the influence of delayed neutron parameters, external neutron source, and spatial effects of relative positions of neutron detectors and control rods in the core on experiment results. Results of measurement simulations can be used to account for methodological aspects of experiments in making comparisons between Monte Carlo calculations with precision programs and experimental data.

**Key words**: Monte Carlo benchmark calculations, differential and integral efficiency of control rods, delayed neutron parameters, external neutron source, spatial effects, insertion method, divergence method.

#### Введение

В данной статье рассматриваются вопросы сопоставления рассчитанной и измеренной реактивности на примере анализа экспериментов по определению эффективности рабочих органов (PO) системы управления и защиты (СУЗ), выполненных на критическом стенде (КС) с активной зоной малогабаритного газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов.

Задача сопоставления рассчитанной и измеренной реактивности актуальна, поскольку эксперименты по определению эффективности РО СУЗ, в соответствии с требованиями нормативных документов, являются важной частью обоснования безопасности реакторных установок.

Проблема при сопоставлении рассчитанной и измеренной реактивности заключается в том, что для малогабаритных реакторов проектные расчеты в настоящее время выполняются с использованием прецизионных программ, основанных на методе Монте-Карло, обеспечивающих детальное моделирование нейтронно-физических процессов, а также конструктивных особенностей активной зоны и отражателя. При этом результаты проектных расчетов должны быть подтверждены сравнением с экспериментальными данными. Высокая точность прецизионных программ предъявляет высокие требования к анализу и интерпретации экспериментальных данных, поэтому для сопоставления результатов прецизионных расчетов и экспериментов необходимо исключить либо учесть методические особенности проведения измерений. С этой целью руководящие документы Ростехнадзора рекомендуют при сопоставлении с экспериментом использовать программы, обеспечивающие моделирование измерений [1].

В соответствии с руководящим документом [1] под **рассчитанной реактивностью** понимается реактивность, вычисленная по разности обратных коэффициентов размножения в начальном и конечном состояниях; **измеренная реактивность** в экспериментах определяется, как правило, по показаниям реактиметра, в котором реализован метод обращенного решения уравнения кинетики (ОРУК) [2]; реактивность, полученная в результате **расчетного моделировании** переходного процесса между двумя состояниями реактора. Такая реактивность может сравниваться с результатами измерений напрямую, без введения каких-либо поправок. Сопоставление рассчитанной реактивности и реактивности, полученной на основе расчетного моделирования измерений, позволяет оценить различие между рассчитанной и измеренной реактивностью, связанной с методическими особенностями измерений.

В настоящей статье расчетное моделирование измерений рассматривается как необходимый этап для нивелирования методических несогласованностей результатов измерений реактивности и результатов прецизионных расчетов. Апробация предложенного подхода осуществлена на примере анализа реактивностных измерений, выполненных на КС с активной зоной малогабаритного газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов.

На КС были проведены измерения дифференциальной и интегральной эффективности РО СУЗ двумя способами – методом сброса и методом разгона. Эксперименты проводились в присутствии внешнего источника нейтронов, а измерения реактивности выполнялись реактиметрами, подключенными к ионизационным камерам, расположенным за пределами активной зоны. Результаты выполненных ранее расчетных исследований [3, 4] показали, что в экспериментах со сбросом РО СУЗ результаты измерений более чувствительны к взаимному расположению детекторов и сбрасываемого стержня, а в экспериментах с извлечением РО СУЗ (метод разгона) большая неопределенность связана с влиянием внешнего источника нейтронов. Кроме этого, интерпретацию результатов экспериментов затрудняет также неопределенность параметров запаздывающих нейтронов, присутствующая в современных оценках ядерных данных [3, 4]. Расчетное моделирование измерений реактивности выполнено с использованием комплекса программ (КП) САПФИР\_РФ&RC, который является развитием [5, 6] комплекса программ САПФИР\_ВВР95-RC [7], а прецизионные расчеты реактивности выполнены по программе MCU\_FR [8].

#### Расчетная модель

#### Исходные уравнения для моделирования переходных режимов

Для моделирования экспериментов по определению эффективности РО СУЗ на КС использована эффективная двухгрупповая модель [9,10], подготовленная на основе КП САПФИР\_РФ&RC. На первом этапе проводился расчет спектра нейтронов в отдельных ячейках (фрагментах) активной зоны и отражателя (программа САПФИР\_РФ), а на втором этапе рассчитывалось изменение распределения плотности потока нейтронов (ППН) в реакторе в двухгрупповом диффузионном приближении (программа RC). Выбор и обоснование числа энергетических групп осуществлен на основе верификационных расчетов [10] в сравнении с прецизионной программой MCU-FR [8].

Для расчета изменения ППН в программе RC решаются стационарное и нестационарное уравнения переноса нейтронов:

$$\frac{1}{k_{s\phi\phi}}\chi\hat{Q}\psi - \hat{L}\psi = 0,\tag{1}$$

где

 $k_{_{s\phi\phi}}$  – эффективный коэффициент размножения нейтронов;

χ – спектр нейтронов деления;

Ψ – плотность потока нейтронов;

 $\hat{Q}$  – оператор генерации нейтронов деления;

 $\hat{L}$  – оператор переноса нейтронов.

$$\frac{1}{v}\frac{\partial\phi}{\partial t} = \left(\chi - \sum_{m}\beta_{m}\chi_{m}\right)\hat{Q}\phi - \hat{L}\phi + \sum_{m}\lambda_{m}\chi_{m}\beta_{m}\int_{-\infty}^{t}dt'\exp\left[-\lambda_{m}(t-t')\right]\hat{Q}\phi + S, \quad (2)$$

где

 $\lambda_m$  – постоянная распада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов *m*-й группы;

 $\phi$  – плотность потока нейтронов;

 $\beta_m$  – доля запаздывающих нейтронов *m*-й группы нейтронов;

*χ<sub>m</sub>* – спектр запаздывающих нейтронов *m*-й группы;

*S* – внешний источник нейтронов.

Уравнения (1) и (2) решаются в двухгрупповом диффузионном приближении. При этом используется библиотека двухгрупповых констант (коэффициентов уравнения) и параметров нейтронной кинетики, подготовленная по программе САПФИР\_РФ на основе файлов оцененных ядерных данных.

Изменение реактивности при моделировании эксперимента определялось методом ОРУК [2]:

$$\frac{\rho(t)}{\beta_{s\phi\phi}} = 1 - \frac{\sum_{m} \beta_{s\phi\phi m} \lambda_m \int_{-\infty}^{t} dt' \exp\left[-\lambda_m (t-t')\right] N(t') + S}{\beta_{s\phi\phi} N(t)},$$
(3)

где

 $\rho(t)$  – реактивность;  $\beta_{s\phi\phi}$  – эффективная доля запаздывающих нейтронов;  $\beta_{s\phi\phi m}$  – эффективная доля запаздывающих нейтронов *m*-й группы; N(t) – результат моделирования изменения ППН в месте расположения ионизационной камеры (ИК).

В комплексе САПФИР\_РФ&RC имеется блок, осуществляющий вычисление реактивности методом ОРУК (3). Он использовался в качестве реактиметра и при обработке зарегистрированных в экспериментах скоростей счета ИК, и при моделировании измерений с использованием КП САПФИР\_РФ&RC.

#### Моделирование внезонных датчиков

При проведении расчетного моделирования измерений реактивности по показаниям внезонных детекторов традиционный подход основывается на расчете весовых коэффициентов (функций влияния [11]), с помощью которых оценивается вклад источников нейтронов от твэлов активной зоны в показания детекторов. Если детекторы расположены далеко за корпусом реактора, как это, например, реализовано в проектах ВВЭР, то альтернативы такому подходу нет, поскольку инженерные модели позволяют рассчитывать ППН только в пределах активной зоны и отражателя.

На КС ионизационные камеры ИК-1, ИК-2 и ИК-3 расположены сразу за отражателем (см. рис. 1). Это позволило моделировать сигналы детекторов путем расчета ППН в местах их расположения. В такой модели при моделировании экспериментов со сбросами РО 1АР и 2АР в ячейках отражателя (см. рис. 2), расположенных напротив ИК-1, ИК-2 и ИК-3, рассчитывалось значение ППН, по которому впоследствии и вычислялось значение реактивности для РО 1АР и 2АР.

Для расчетного моделирования изменения реактивности в экспериментах на КС были подготовлены две модели:

- 1) модель весовых коэффициентов;
- 2) модель прямого расчета ППН в месте расположения детекторов.

Взаимная верификация показала, что отличия результатов расчетов изменения реактивности в экспериментах со сбросом РО СУЗ не превосходят 1 %, что существенно меньше отклонения от результатов измерений и паспортной погрешности расчета эффективности органов регулирования КП САПФИР\_ВВР95-RC для реакторов с тепловым спектром нейтронов, равной 10 % [7].



Рис. 1. Схема расположения ионизационных камер вокруг активной зоны

Рис. 2. Ячейки отражателя, расположенные напротив ИК-1, ИК-2 и ИК-3

Модель прямого расчета ППН в месте расположения детекторов нагляднее и проще, что позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на создание модели, особенно при наличии нескольких каналов измерений, детекторы которых расположены по внешнему периметру отражателя (см. рис. 2). Вследствие этого, при разработке нестационарных моделей для исследований НФХ активной зоны КС малогабаритного газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов использовалась модель № 2, основанная на непосредственном моделировании ППН в месте расположения детекторов.

#### Выбор библиотеки ядерных данных для параметров запаздывающих нейтронов

Используемые в уравнениях кинетики (2) и реактивности (3) параметры запаздывающих нейтронов являются эффективными характеристиками изотопного состава топлива и вычисляются на основе детальных спектральных расчетов [12]. При этом остается неопределенность, связанная с различием оценок ядерных данных. Чтобы выявить чувствительность результатов измерений реактивности к параметрам запаздывающих нейтронов и определить наиболее подходящий набор для исследуемой быстрой критической сборки, в работе [3, 4] проведены расчетные исследования с использованием в уравнениях кинетики (2) и в реактиметрах (3) различных наборов параметров запаздывающих нейтронов, полученных из файлов оцененных ядерных данных (отечественных (БНАБ-78 [13], РОСФОНД) и зарубежных (ENDF/B-V, ENDF/B-VI, ENDF/B-VII)). На основе анализа результатов эксперимента и расчетного моделирования сделано заключение, что наилучшее согласие с результатами измерений получены при использовании параметров запаздывающих нейтронов из библиотек БНАБ-78 и РОСФОНД. Однако, в связи с тем, что нет явного выигрыша при обработке результатов измерений с использованием восьмигрупповых параметров запаздывающих нейтронов, в качестве базовой модели принято традиционное (шестигрупповое) представление для параметров запаздывающих нейтронов из библиотеки БНАБ-78. Эти параметры использовались и при моделировании измерений, и при обработке результатов экспериментов.

Расчетное моделирование измерений необходимо для того, чтобы выявить методические особенности экспериментов, влияющие на результаты измерения реактивности. Чтобы использовать расчетное моделирование для правильной интерпретации экспериментальных результатов необходимо, чтобы результаты расчетов воспроизводили методические особенности измерений не только качественно, но и количественно. Ниже на конкретных примерах проиллюстрированы возможности расчетной модели, подготовленной на основе КП САПФИР\_ РФ&RC, и результаты ее использования при анализе и уточнении результатов измерений реактивности на КС с активной зоной малогабаритного газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов.

#### Моделирование изменения реактивности в экспериментах со сбросом РО СУЗ

В данном разделе приведены результаты моделирования измерений реактивности в экспериментах со сбросом РО СУЗ в сопоставлении с экспериментальными данными с целью взаимной верификации и выбора методики расчета для обработки и анализа результатов экспериментов на следующих этапах испытаний.

При моделировании измерений в расчете, также как и в эксперименте, изменение реактивности определялось в единицах  $\rho/\beta_{_{s\phi\phi}}$ , как разность между показаниями реактиметра в начальном и конечном (установившемся) состояниях:

$$\Delta \rho_{\rm _{3KC}} = \rho_{\rm _{YCT}} - \rho_0 \ . \tag{4}$$

При этом вычисление реактивности методом ОРУК (3) при расчетном моделировании осуществлялось с учетом расположения детекторов относительно активной зоны по результатам расчета ППН в месте расположения ИК (см. рис. 2).

Кроме этого, для расчетной оценки влияния пространственных эффектов на показания реактиметров, подключенных к внезонным детекторам, рассчитывалось изменение реактивности с использованием соотношения, полученного путем свертки уравнения (2)

и условно критического уравнения для ценности нейтронов  $\Psi^+$  [2]:

$$\frac{\rho(t)}{\beta_{s\phi\phi}} = 1 - \frac{\left\langle \psi^{+} \sum_{m} \lambda_{m} \chi_{m} \beta_{s\phi\phi m} \int_{-\infty}^{t} dt' \exp\left[-\lambda_{m}(t-t')\right] \hat{Q} \phi \right\rangle}{\left\langle \psi^{+} \sum_{m} \chi_{m} \beta_{s\phi\phi m} \hat{Q} \phi \right\rangle},$$
(5)

которому с точностью до значения эффективной доли запаздывающих нейтронов  $\beta_{_{3\phi\phi}}$  соответствует соотношение:

$$\Delta \rho_{\rm pacy}^{\rm crau} = \frac{1}{k_{_{2\phi\phi}}^2} - \frac{1}{k_{_{2\phi\phi}}^1},\tag{6}$$

где  $\Delta \rho_{\rm pacy}^{\rm стац}$  – изменение реактивности, полученное при решении стационарного уравнения переноса нейтронов (1),  $k_{_{3\phi\phi}}^1$  и  $k_{_{3\phi\phi}}^2$  значения коэффициента размножения в начальном и конечном состояниях.

Методической особенностью экспериментов со сбросом РО СУЗ является зависимость показаний детекторов от их положения относительно вносимого возмущения. На рис. 3, 4 представлены результаты сопоставления расчетного моделирования измерений и экспериментов при сбросах РО 1АР и 2АР.



Рис. 3. Изменение реактивности в эксперименте со сбросом РО 1АР



Рис. 4. Изменение реактивности в эксперименте со сбросом РО 2АР

Результаты моделирования измерений показали, что расчетная модель воспроизводит зафиксированную на опыте зависимость реактивности от расположения детекторов и сбрасываемых РО 1АР и 2АР. Это дает основание использовать результаты расчета эффективности РО СУЗ (4) на основе моделирования измерений (3) и (5) для коррекции экспериментальных данных [14], чтобы исключить неопределенность, связанную с влиянием пространственных эффектов.

Коррекция экспериментальных данных (4) проведена с использованием соотношения:

$$\Delta \rho_{_{\rm SKC}}^{_{\rm KOPP}} = \Delta \rho_{_{\rm SKC}} \frac{\Delta \rho_{_{\rm MOZ}}(5)}{\Delta \rho_{_{\rm MOZ}}(3)} . \tag{7}$$

В табл. 1 представлены результаты коррекции экспериментальных данных изменения реактивности при сбросах РО СУЗ.

Таблица 1

## Результаты коррекции экспериментальных данных изменения реактивности при сбросах РО СУЗ

D.C. CLUD	$ ho/eta_{_{\circ\phi\phi}}$				Отклонение, %	
РО СУЗ	$\Delta  ho_{_{ m 3KC}}$	Моделирование		KODD	$\Delta \rho_{\text{MOD}}(3)$	$\Delta \rho_{\text{MOII}}(3)$
		$\Delta \rho_{_{\rm MOJ}}(3)$	$\Delta  ho_{_{ m MOD}}(5)$	$\Delta  ho_{_{ m SKC}}^{_{ m KOpp}}$	$\Delta \rho_{_{ m 3KC}}$	$\frac{\Delta \rho_{\text{MOD}}(5)}{\Delta \rho_{\text{MOD}}(5)}$
1АР (ИК-1)	-1.29	-1.35	-1.38	-1.32	4.65	-2.17
1АР (ИК-2)	-1.36	-1.44	-1.38	-1.30	5.88	4.35
1АР (ИК-3)	-1.30	-1.37	-1.38	-1.31	5.38	-0.72
	Среднее знач	ение		-1.31±0.01	5.31	0.48
2АР (ИК-1)	-1.37	-1.43	-1.38	-1.32	4.38	3.62
2АР (ИК-2)	-1.27	-1.35	-1.38	-1.30	6.30	-2.17
2АР (ИК-3)	-1.30	-1.37	-1.38	-1.31	5.38	-0.72
Среднее значение				-1.31±0.01	5.35	0.24

Из приведенных в табл. 1 результатов можно сделать вывод, что результаты расчетного моделирования завышают результаты измерений в среднем на 5.3 % (см. столбец 6), но воспроизводят пространственный эффект (см. последний столбец), учет которого позволяет получить согласованную оценку эффективности стержней по всем детекторам в пределах 1 %.

#### Моделирование изменения реактивности в экспериментах с извлечением РО СУЗ

Для оценки дифференциальной эффективности РО СУЗ на КС были выполнены измерения реактивности при пошаговом извлечении РО СУЗ. В этих экспериментах исследуемый (калибруемый) РО СУЗ извлекался из активной зоны с заданным шагом, а компенсация реактивности осуществлялась другими РО СУЗ (метод перекомпенсации). На каждом шаге подъема РО СУЗ осуществлялся «разгон» реактора до достижения установившегося значения периода, после перекомпенсации осуществлялась стабилизация ППН. На рис. 5, в качестве примера, приведена запись результатов измерений реактивности в эксперименте с определением интегральной эффективности РО 1АР при его пошаговом извлечении («разгон») и компенсация реактивности погружением РО 2АР.

На каждом шаге извлечения калибруемого РО СУЗ реактиметром измерялся скачок реактивности и определялась его дифференциальная эффективность, как функция положения РО СУЗ от низа активной зоны. По сумме всех скачков реактивности определялась интегральная эффективность РО СУЗ.



Рис. 5. Изменение реактивности и положения РО СУЗ в эксперименте с определением эффективности РО 1АР методом последовательного извлечения («разгона»). Перекомпенсация реактивности осуществлялась погружением РО 2АР

При проведении измерений реактивности данным методом в реактиметре необходимо было корректно учесть влияние внешнего источника, в присутствии которого проводились все измерения на КС. Кроме того, необходимо было оценить влияние на результаты измерений эффективности калибруемого РО СУЗ возмущения ППН, вносимого перемещением РО СУЗ, выбранного для компенсации реактивности.

#### Учет влияния внешнего источника при измерении реактивности методом «разгона»

Методические особенности влияния внешнего источника на результаты измерений и обоснование подхода к выбору величины компенсирующего источника нейтронов (КИН) в уравнении реактиметра (3) исследовались в работах [3, 4] с использованием расчетного моделирования измерений, где было показано, что критерием правильности выбора КИН в реактиметре является постоянство измеренной реактивности («полочка») после остановки РО.

Проблема выбора КИН заключается в том, что его влияние на результаты измерения реактивности особенно сильно проявляются при малых уровнях ППН перед внесением возмущения. Учет КИН в (3) приводит к заметной коррекции начального значения измеряемой реактивности (она становится отрицательной), соответственно, изменяется и величина скачка реактивности, полученного, как разность реактивностей в начальном и конечном состояниях.

Подбор КИН осуществлялся в два этапа.

На первом (предварительном) этапе контролировалось условие постоянности реактивности после внесения возмущения на разных интервалах перемещения РО СУЗ. В качестве примера, на рис. 6 приведены показания реактиметра с учетом и без учета КИН для двух интервалов перемещения РО 1АР, полная запись параметров которого показана на рис. 5.



Рис. 6. Изменение реактивности при перемещении РО 1АР

Видно, что внешний источник нейтронов вносит существенный вклад в показания реактивности на всем интервале извлечения РО 1АР.

На втором этапе для уточнения выбора в реактиметре КИН были использованы эксперименты по определению дифференциальной эффективности РО СУЗ при их извлечении на разную величину (метод разгона с двумя периодами [2]). На рис. 7, в качестве примера, приведены записи изменения реактивности в экспериментах с извлечением РО 1АР от (290 – 327 – 355 мм) и РО 2АР (226 – 257 – 279 мм).



б) РО 2АР (226 – 257 – 279 мм)

Рис. 7. Изменение реактивности при извлечении РО 1АР и 2АР

В этом случае дифференциальная эффективность вычисляется с использованием соотношения:

$$\frac{d\rho}{dh} \approx \frac{\Delta\rho}{\Delta H} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{H_2 - H_1},\tag{8}$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  значения реактивностей, зафиксированные при извлечении РО СУЗ до высоты  $H_1$ и Н<sub>2</sub>, когда ППН возрастает до таких значений, что влияние внешнего источника нейтронов становится незначительным.

Кроме того, вычисление реактивностей  $\rho_1$  и  $\rho_2$  после извлечения РО СУЗ выполнено с предварительно выбранным компенсирующим источником, так что влияние источника нейтронов при вычислении изменения реактивности Δρ практически полностью нивелировано.

Полученные при обработке результатов измерений дифференциальной эффективности (8) для РО 1АР, а также и для других РО СУЗ, оказались ниже значений, зафиксированных в экспериментах с последовательным извлечением РО СУЗ при первоначальном задании КИН в реактиметре на 5–7 %.

Сопоставление дифференциальной эффективности РО 2АР, вычисленной по изменению реактивности при его погружении, с результатами определения дифференциальной эффективности РО 1АР при одинаковых положениях также показало меньшие значения на те же 5–7 %. Это связано с тем, что влияние внешнего источника нейтронов на величину скачка реактивности, зарегистрированного сразу же после погружении компенсирующего стержня мало, поскольку ППН на этом интервале остается существенно выше интенсивности генерации нейтронов внешним источником. Экспериментальные данные, приведенные на рис. 8 и 9 иллюстрируют это утверждение.



Рис. 8 Изменение реактивности при извлечении РО 1АР и погружении РО 2АР с и без КИН

Это дало основание для корректировки КИН, что в результате привело к уменьшению оценок дифференциальной и интегральной эффективностей РО 1АР и 2АР. На рис. 9 приведены результаты определения дифференциальной эффективностей РО 1АР, полученные при вычислении реактивности реактиметром с исходным значением КИН и откорректированным. На этом же рисунке приведены результаты определения дифференциальной эффективности методом разгона с двумя периодами и значения, полученные при погружении РО 2АР.



Рис. 9 Дифференциальная эффективность РО 1АР. Коррекция величины КИН

После корректировки КИН оценка эффективности РО СУЗ методом последовательного извлечения уменьшилась для всех РО СУЗ в среднем на ~ 6 % (рис. 10).



Рис. 10. Интегральная эффективность РО АР. Коррекция величины КИН

#### Оценка эффекта интерференции стержней при градуировке РО СУЗ методом перекомпенсации

Известно, что влияние эффекта интерференции на эффективность РО СУЗ зависит от их взаимного положения в активной зоне. Если расстояние между РО СУЗ мало, то они «затеняют» [15] друг друга. Если же градуируемый РО СУЗ расположен на таком расстоянии, что относительное распределение ППН в месте его расположения в активной зоне увеличено действием другого РО СУЗ, то измеренная эффективность будет завышенной. Этот эффект проявился в эксперименте с извлечением РО 1АР и его перекомпенсацией РО 2АР и учтен путем пошагового моделирования при последовательном извлечении РО 1АР и вводом в активную зону РО 2АР на каждом шаге, как это было реализовано в эксперименте (см. рис. 5).

Оценка эффекта интерференции необходима при сопоставлении результатов измерения интегральной эффективности РО СУЗ методом сброса и методом перекомпенсации, поскольку исходные положения РО СУЗ при проведении измерений отличаются, и это следует учитывать при сопоставлении измеренных значений реактивности, полученных разными методами. На основе результатов расчетного моделирования были получены корректирующие коэффициенты для учета влияния различий исходных состояний на оценку эффективности РО СУЗ. Корректированные значения получены с использованием соотношения:

где

$$\Delta \rho_{_{\rm 3Kcn}}^{_{\rm Kopp}} = \Delta \rho_{_{\rm 3Kcn}}^{_{\rm usen}} \frac{\Delta \rho_{_{\rm pacv}}^{_{\rm copc}}}{\Delta \rho_{_{\rm pacv}}^{_{\rm H3Bn}}},\tag{9}$$

Δρ<sup>извл</sup> получено путем пошагового моделирования измерений, при последовательном извлечении калибрируемого РО СУЗ и вводом в активную зону компенсирующего РО СУЗ на каждом шаге;

 $\Delta \rho_{\text{расч}}^{\text{оброс}}$  получено по разности значений коэффициента размножения (6) для положения РО СУЗ в исходном и конечном состояниях, которые были зарегистрированы в экспериментах со сбросом РО СУЗ.

В табл. 2 представлены результаты сравнения оценок эффективности РО 1АР и 2АР, полученные по методам сброса и последовательного извлечения (после коррекции величины КИН и введении поправок на эффект интерференции).

Таблица 2

	1		
РО СУЗ	$ ho/eta_{ m s\phi}$		
	Метод сброса	Метод последовательного извлечения	Отклонение, %
1AP	1.31	1.34	2.3
2AP	1.31	1.34	2.3

Сравнение результатов измерения эффективности РО 1АР и 2АР, полученных по методам сброса и последовательного извлечения после коррекции величины КИН и введения поправок на эффект интерференции

Из приведенных в табл. 2 данных видно, что отличие в оценке эффективности РО СУЗ между методами сброса и последовательного извлечения составляет ~ 2 %, что меньше методических неопределенностей, связанных с пространственными эффектами при измерении отрицательной реактивности методом ОРУК в экспериментах со сбросом РО СУЗ, и с влиянием внешнего источника нейтронов и эффекта интерференции РО СУЗ в экспериментах с введением положительной реактивности в методе последовательного извлечения с перекомпенсацией.

Анализ влияния методических погрешностей на величину измеренной реактивности, определяемой двумя методами показывает, что они дополняют друг друга, поскольку при измерении эффективности РО СУЗ методом сброса отсутствует эффект интерференции и влияние внешнего источника нейтронов незначительно, а при использовании метода последовательного извлечения отсутствуют пространственные эффекты, связанные с расположением датчиков. Это подтверждают результаты, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений эффективности РО 2АР методом последовательного извлечения по показаниям скоростей счета ИК-1 и ИК-2

PO CV3	$ ho/eta_{ m bot}$		
10055	ИК-1	ИК-2	
2AP	1.34	1.34	

Таким образом, на основе проведенных расчетных исследований можно заключить, что расчетное моделирование измерений позволило оценить и нивелировать влияние методических особенностей измерений реактивности в экспериментах со сбросом и извлечением РО СУЗ. Поэтому результаты экспериментов, откорректированные с учетом расчетного моделирования измерений, могут быть использованы для верификации расчетных моделей, предназначенных для расчета реактивности.

## Сопоставление результатов расчетов эффективности РО СУЗ по программам RC и MCU-FR с экспериментальными данными

В настоящем разделе приведена эффективность РО СУЗ, определенная по программе MCU-FR, решающей уравнение переноса методом Монте-Карло. Программа аттестована для расчета реакторов с быстрым спектром нейтронов [8]. В соответствии с аттестационным паспортом максимальное значение погрешности расчета эффективности групп и одиночных стержней превышает 15%. Такая погрешность расчета, очевидно, не соответствует уровню прецизионной программы. Одной из причин завышенной оценки погрешности может быть то, что она определена путем сопоставления результатов расчетов по программе для ЭВМ с результатами экспериментов на стендах и реакторах без учета методических особенностей измерения реактивности. Поэтому при использовании программы (в том числе и прецизионной) для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии требуется дополнительная валидация для каждого конкретного случая.

Чтобы корректно сопоставить результаты реперных расчетов и измерений в данной работе в качестве связующего звена между измерениями реактивности в экспериментах и реперными расчетами использована инженерная программа RC, в которой реализована функция моделирования измерений. Программа RC позволяет рассчитывать коэффициенты размножения и эффективность PO CУЗ в стационарных состояниях (как и MCU-FR) и моделировать изменение реактивности с имитацией особенностей экспериментов по определению эффективности PO CУЗ.

Ниже приведены результаты сопоставления расчетных оценок эффективности РО СУЗ, полученных по программам MCU-FR и RC, с экспериментальными данными.

В табл. 4 и 5 представлены результаты расчетов К<sub>эфф</sub> и эффективности РО 1АР и 2АР по методу сброса между эффективной двухгрупповой моделью RC и MCU-FR.

Таблица 4

Положение РО СУЗ	RC (2 группы)	MCU-FR	Отклонение, %
Введен 1АР	0.99038	0.99338	-0.30
Извлечен 1АР	1.00027	1.00273	-0.25
Введен 2АР	0.99038	0.99335	-0.30
Извлечен 2АР	1.00027	1.00268	-0.24

Сопоставление результатов расчетов  $K_{_{3 \dot{0} \dot{0}}}$  по программам RC и MCU-FR

#### Таблица 5

Оценки эффективности РО СУЗ, полученные по программам RC и MCU-FR

Положение РО СУЗ	ho,% (мето			
	RC (2 группы)	MCU-FR	Отклонение, 70	
Введен 1АР	1.00	0.94	6.4	
Введен 2АР	1.00	0.94	6.4	

В табл. 4 жирным шрифтом выделены значения коэффициентов размножения в исходных, перед сбросом РО СУЗ, критических состояниях. Из приведенных в табл. 4 и 5 результатов можно сделать вывод, что между расчетной моделью RC и реперной моделью MCU-FR наблюдается согласие. Отличие в расчете коэффициента размножения в критических состояниях не превосходят паспортной погрешности программы MCU-FR – 0.4 % [8], а отличия в оценке эффективности органов регулирования не превосходят погрешности КП САПФИР\_ВВР95-RC для реакторов с тепловым спектром нейтронов –10 % [7]. При этом систематическое завышение оценки эффективности РО АР по программе RC относительно MCU-FR коррелирует с отклонением (5.3 %) от результатов измерений в экспериментах со сбросом РО АР (см. табл. 1). Относительно небольшой уровень погрешности и ее систематический характер являются основанием использования программы RC для поправки результатов измерений эффективности РО СУЗ (см. (7) и (9)) методами сброса и последовательного извлечения при сопоставлении с MCU-FR.

В табл. 6 представлены сравнения результатов расчетов эффективности РО 1AP и 2AP между MCU-FR и результатами эксперимента.

Таблица б

Положение РО СУЗ	$\rho/\beta$	Отклонение	
	Эксперимент	MCU-FR	o natonenne
Введен 1АР	1.31	1.32	0.8
Введен 2АР	1.31	1.32	0.8

Сравнение эффективности при сбросах РО СУЗ между MCU-FR и экспериментом

На рис. 11 приведены результаты расчета по программе MCU-FR эффективности PO 1AP как функции его положения от низа активной зоны. Результаты расчета сравниваются с оценками эффективности, полученными на основе измерений реактивности в экспериментах с последовательным извлечением PO AP, откорректированными на эффекты от постоянного внешнего источника и перекомпенсации PO CУЗ.



Рис. 11. Интегральная эффективность РО 1АР. Сравнение MCU-FR с экспериментом

Отличие результатов расчета MCU-FR от результатов измерений не выходит за диапазон неопределенности экспериментальных данных (см. табл. 3). Однако надо иметь в виду, что при сопоставлении результатов расчетов с экспериментальными данными в единицах  $\rho/\beta_{add}$ , результаты расчетов были пересчитаны, используя значение  $\beta_{_{3ddb}}$  вычисленное по программе САПФИР РФ с использованием параметров нейтронной кинетики из библиотеки БНАБ-78 [13]. Выбор этой библиотеки основывается на анализе экспериментов по определению эффективности РО СУЗ при расчете реакторов с тепловым [12] и быстрым [3, 4] спектрами нейтронов. Однако эти эксперименты не позволяют оценить абсолютное значение эффективной доли запаздывающих нейтронов, неопределенность которых составляет 4-5 % [16]. С учетом этого можно констатировать, что результаты экспериментов для данной активной зоны подтверждают точность расчета эффективности РО АР по программе MCU-FR в пределах 5 %, что существенно меньше оценки погрешности, заявленной в паспорте на программу. Надежность данной оценки, обосновывается тем, что на основе расчетного моделирования измерений исследованы и оценены методические особенности измерений реактивности на данном КС и использованы соответствующие поправки, нивелирующие влияние пространственных эффектов, внешнего источника нейтронов и эффекта интерференции стержней на результаты измерений реактивности, что позволило корректно сопоставить результаты расчетов реактивности по программе MCU-FR с экспериментальными данными.

#### Заключение

- 1. Для обеспечения расчетного моделирования измерений реактивности в КП САПФИР\_ РФ&RC реализованы:
  - модель для расчета реактивности при решении прямого и сопряженного уравнения диффузии в исходном и возмущенном стационарном состояниях;
  - модель для расчета ППН в активной зоне и в местах расположения детекторов в переходных режимах, имитирующих условия измерений реактивности в экспериментах со сбросом или извлечением РО СУЗ (в том числе, при наличии внешнего источника нейтронов);
  - модель реактиметра, решающего обращенное уравнение кинетики относительно ППН в месте расположения детектора.
- 2. На примере моделирования измерений эффективности РО СУЗ, выполненных на критическом стенде с активной зоной малогабаритного газоохлаждаемого реактора, изложена и обоснована схема сопоставления результатов расчетов и результатов измерения эффективности РО СУЗ, включающая следующую последовательность действий:
  - измерение реактивности;
  - расчетное моделирование измерений реактивности с имитацией условий эксперимента;
  - оценка влияния методических особенностей измерения реактивности и коррекция результатов экспериментов на основе результатов расчетного моделирования измерений и прямых расчетов реактивности;
  - проведение прецизионных расчетов и сопоставление с результатами откорректированных экспериментов.
- 3. Проведенные расчетные исследования показали, что расчетное моделирование измерений, являющееся связующим звеном между экспериментом и прецизионным расчетом, позволило количественно оценить влияние методических особенностей на результаты измерений реактивности на данном критическом стенде и корректно сопоставить результаты расчетов реактивности по программе MCU-FR с экспериментальными данными.

#### Conclusions

- 1. Numerical simulations of reactivity measurements are carried out with the SAPFIR\_RF&RC program package containing :
  - model for reactivity calculations by solving forward and adjoint equations in initial and perturbed stationary states;
  - model for calculations of neutron flux density in the core and at detector positions in transients simulating reactivity measurement conditions with insertion or withdrawal of control rods (including the presence of an external neutron source);
  - model of reactivity meter that solves the inverse kinetics equation for neutron flux density at the detector position.
- 2. An example of simulation of control rod worth measurements in the critical test facility with gas cooled small reactor core is presented to demonstrate a framework for comparing between calculations and measurements of control rod worth. The framework contains the following sequence of actions:
  - measurements of reactivity;

- numerical simulation of reactivity measurements with simulation of experiment conditions;
- evaluation of the impact of reactivity measurement methodology and correction of experiment results using results of numerical simulation and direct reactivity calculations;
- carrying out precision calculations and comparing with corrected experiment results.
- 3. The presented numerical study has shown that numerical simulation of measurements is a connecting link between experiment and precision calculations and can be used to quantify the methodology effect on results of reactivity measurements in the critical test facility. Numerical simulation results are also used to correctly compare results of reactivity calculations in MCU-FR program against experiment data.

#### Литература

- 1. Положение о рекомендациях по сопоставлению рассчитанной и измеренной реактивности при обосновании ядерной безопасности реакторных установок с ВВЭР. РБ-074-12. Приказ № 264 Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 24.04.2012.
- 2. *Казанский Ю.А*. Экспериментальные методы физики реакторов / Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич. М.: Энергоатомиздат, 1984. 272 с.
- 3. Моделирование экспериментов по определению эффективности органов регулирования на критическом стенде с быстрым спектром нейтронов / В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, Р.Э. Зинатуллин, А.С. Карпов, Н.С. Нерсесян // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. 2020. Вып. № 2 (20). С. 27–40.
- 4. *Артемов В.Г.* Исследование факторов, влияющих на результаты измерений реактивности в экспериментах на критическом стенде с быстрым спектром нейтронов / В.Г. Артемов, Н.С. Нерсесян // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2022. Вып. № 3. С. 49–61.
- Иванов А.С. Модернизация нейтронных библиотек и программы САПФИР\_95, предназначенной для расчёта ячеек реактора / А.С. Иванов, А.С. Карпов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – Вып. 1. – С. 27–34.
- 6. Развитие алгоритмов комплекса программ САПФИР\_95&RC для обоснования нейтронно-физических характеристик реакторов различных типов / В. Г. Артемов, Л.М. Артемова, А.С. Иванов, А.С. Карпов, В.Г. Коротаев, А.Н. Кузнецов // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. – 2021. – Вып. № 2 (24). – С. 9–24.
- 7. Комплекс программ САПФИР\_ВВР95-RC: аттестационный паспорт ПС № 261 от 23.09.2009. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2009.
- Программа MCU-FR с банком данных MDBFR60 версия 1.0: аттестационный паспорт программы для ЭВМ. Регистрационный номер аттестационного паспорта ПС № 501 от 14.12.2020. – М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2020.
- 9. Подготовка и верификация модели для расчета нейтронно-физических характеристик активных зон реакторов с быстрым спектром нейтронов и газовым

теплоносителем / В.Г. Артемов, А.С. Иванов, П.А. Михеев, Н.С. Нерсесян // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. – 2020. – Вып. № 1 (19). – С. 29–39.

- 10. Артемов В.Г. Сопоставление многогрупповой и малогрупповой нейтронно-физических моделей малогабаритного газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов / В.Г. Артемов, Н.С. Нерсесян // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. 2022. Вып. № 2 (28). С. 49–60.
- Сравнение коэффициентов влияния для расчетов токов ионизационных камер для реактора РУ В-392М (ВВЭР-1200), рассчитанных различными способами / В.И. Куликов, Т.В. Семенова, Н.М. Жылмаганбетов, А.И. Попыкин, А.А. Смирнова // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2019. – Вып. 2.
- Подготовка и обоснование параметров запаздывающих нейтронов в комплексе программ САПФИР/КОРСАР / В.Г. Артемов, Р.Э. Зинатуллин, А.С. Карпов, А.В. Пискарев, Ю.П. Шемаев // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. – 2016. – Вып. № 1 (3). – С. 38–54.
- Групповые константы для расчета реакторов и защиты: справочник / Л.П. Абагян, Н.О. Базазянц, М.Н. Николаев, А.М. Цибуля; под ред. М.Н. Николаева. – М.: Энергоиздат, 1981. – 232 с.
- 14. *Цыганков С.В.* Измерение эффективности органов регулирования ВВЭР / С.В. Цыганков, Л.К. Шишков // Атомная энергия. 2004. Т. 96, вып. 3.
- 15. *Вейнберг А.В.* Физическая теория ядерных реакторов / А.В. Вейнберг, У.В. Вигнер. Москва, 1961.
- 16. Артемов В.Г. Моделирование шумовых экспериментов для верификации параметров кинетики, полученных по программе САПФИР\_РФ / В.Г. Артемов, Р.Э. Зинатуллин, А.С. Карпов // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2019. Вып. № 3. С. 105–114.

УДК 62-3:532

#### DOI: 10.52069/2414-5726\_2023\_2\_32\_27

# Влияние транзитного потока пара на расходную характеристику поворотно-золотникового крана

#### А.С. Грицай<sup>1, 2</sup>, Д.Н. Донченко<sup>1</sup>, В.С. Погорелов<sup>1</sup>, С.Н. Румянцев<sup>1</sup>, А.В. Ярушин<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Институт Ядерной Энергетики, филиал Санкт-Петербургского политехнического университета им. Петра Великого, г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

#### Аннотация

При испытаниях поворотно-золотникового крана, регулирующего отбор пара из паропроводов тепловых и атомных электростанций, выявлено влияние транзитного потока пара в паропроводе на расходную характеристику крана. Выполнен расчетный анализ указанного влияния. Разработана корреляция, обобщающая экспериментальные данные.

**Ключевые слова:** поворотно-золотниковый кран, расходная характеристика, испытания, расчет.

# Effect of transient steam flow on the flow characteristic of rotary slide valve

A.S. Gritsai<sup>1, 2</sup>, D.N. Donchenko<sup>1</sup>, V.S. Pogorelov<sup>1</sup>, S.N. Rumyantsev<sup>1</sup>, A.V. Yarushin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> FSUE "Alexandrov NITI", Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

<sup>2</sup> Institute of Nuclear Power Engineering, the branch of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

#### Abstract

Rotary slide valves are used to control extraction of steam from steam lines in nuclear and non-nuclear power plants. Testing of such a valve has demonstrated the effect of transient steam flow in a steam line on the valve's flow characteristic. A numerical analysis of this effect is carried out. A correlation to integrate experiment data is developed.

Key words: rotary slide valve, flow characteristic, testing, calculation.

Одним из типов арматуры, применяемой для регулирования расхода воды и пара в трубопроводах тепловых и атомных электростанций, является поворотно-золотниковый кран (ПЗК). Его преимущество по сравнению с регулирующими клапанами и шиберными задвижками заключается в существенно лучших массо-габаритных характеристиках [1, 2]. Одним из назначений ПЗК является регулирование отбора пара, при этом он может быть встроен непосредственно в паропровод. Принципиальная конструкция такого устройства показана на рис. 1. В рассматриваемом устройстве окна гильзы ПЗК расположены в плоскости, перпендикулярной оси паропровода, и через окна гильзы и золотника от основного потока пара в паропроводе отбирается небольшая его часть.

По сравнению с применением ПЗК в качестве регулятора расхода в самом паропроводе или для регулирования расхода в отборе, но с размещением вне паропровода, в рассматриваемой конструкции расходная характеристика крана имеет особенности, обсуждаемые в настоящей статье.



Рис. 1. Поперечный разрез ПЗК в паропроводе: 1 – паропровод, 2 – гильза ПЗК, 3 – золотник ПЗК, 4 – трубопроводы отбора пара

Для определения расходной характеристики первоначально испытания ПЗК проводились при незначительном расходе пара в паропроводе. При этом неявно предполагалось, что аналогично приточному тройнику, схема которого показана на рис. 2, увеличение транзитного расхода, как минимум, не уменьшит пропускную способность ПЗК, т.к. в соответствии с данными [3] увеличение объемного расхода в проточной линии (Q<sub>c</sub>) приводит к уменьшению гидравлического сопротивления в боковой линии ( $\zeta_6$ ) и, соответственно, к увеличению расхода в этой линии (Q<sub>c</sub>).



Рис. 2. Схема приточного тройника

На рис. 3 приведена расходная характеристика ПЗК в виде зависимости коэффициента расхода ПЗК ( $\mu$ F) от степени открытия крана (S<sub>ПЗК</sub>), полученная при упомянутых испытаниях с небольшим объемным расходом пара в паропроводе (Q). На этом же рисунке приведены опытные точки, характеризующие влияние объемного расхода при его изменении в широком диапазоне. Испытания проводились при работе на перегретом паре при различных температуре и давлении. Помимо указанных параметров измерялись расходы пара в паропроводе (G) и в отборе (G<sub>ПЗК</sub>), а также давление в отборе за ПЗК (Р<sub>ПЗК</sub>). При обработке экспериментальных данных величина  $\mu$ F определялась по методике Генри-Фауске [4].

Из рис. З видно, что варьирование объемного расхода в паропроводе приводит к большому разбросу экспериментальных точек при  $S_{\Pi 3K} > 60$  % (в легенде на рис.  $3:\bar{Q} = Q/Q^*$ , где  $Q^*$  – некоторая характерная (номинальная) величина объемного расхода). При этом в отличие от приточного тройника, с увеличением Q происходит не уменьшение, а увеличение коэффициента гидравлического сопротивления в линии отбора ПЗК ( $\zeta$ ), т.е. уменьшение коэффициента расхода ПЗК µF. При  $S_{\Pi 3K} < 60$ % влияния объемного расхода в паропроводе на величину µF не наблюдается.



Рис. 3. Расходная характеристика ПЗК

Для выяснения причины полученного эффекта были проведены пространственные (3D) гидродинамические расчеты с использованием программного комплекса STAR-CD. В качестве граничных условий задавались давление и температура в паропроводе перед ПЗК, давление пара в отборе за ПЗК и давление в паропроводе за ПЗК. Варьированием последней величины в расчетах обеспечивалось изменение расхода в паропроводе.

Моделировалось течение перегретого пара в паропроводе и ПЗК при его открытии 50 и 100 %. Фрагмент конечно-элементной модели для степени открытия 50 % показан на рис. 4. Можно видеть расширенный, в зоне расположения крана, участок паропровода, из которого пар поступает в окна гильзы (на фрагменте показано одно из 4-х окон), и далее в частично открытые окна золотника, из полости которого производится отбор пара.



Рис. 4. Фрагмент конечно-элементной модели

Для S<sub>ПЗК</sub> = 100 % результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными представлены на рис. 5. Можно видеть, что с увеличением объемного расхода (скорости) в паропроводе расчетный расход пара через ПЗК (коэффициент расхода) уменьшается. При этом в диапазоне  $\bar{Q} = 0.15$ –1 расчетные и экспериментальные значение µF различаются не более чем на 15 %. Однако при дальнейшем увеличении объемного расхода (Q > Q\*, $\bar{Q}$  > 1) резкого падения коэффициента расхода по расчету, в отличие от эксперимента, не происходит, и различие расчета с экспериментом существенно возрастает.



Рис. 5. Зависимость коэффициента расхода ПЗК от объемного расхода пара в паропроводе. S $_{\rm II3K}$  = 100 %

На рис. 6–7 показаны распределения скорости в поперечном сечении ПЗК по оси окон при двух различных значениях транзитного расхода пара для степени открытия крана 100 % (движение пара снизу вверх). Можно отметить образование вихревой зоны в окнах за передней кромкой окна гильзы, увеличивающейся по мере увеличения расхода.



Рис. 6. Поле скоростей в поперечном сечении ПЗК.  $S_{\Pi 3K} = 100 \%$ .  $\bar{Q} = 0.15$ 



Рис. 7. Поле скоростей в поперечном сечении ПЗК.  $S_{\Pi 3K} = 100 \%$ .  $\bar{Q} = 1.2$ 

Аналогичная серия расчетов проведена для S<sub>ПЗК</sub> = 50 %. Результаты показаны на рис. 8. В расчетах, как и при испытаниях, при указанном открытии ПЗК величина коэффициента расхода остается постоянной во всем диапазоне изменения объемного расхода пара в паропроводе, хотя и завышает экспериментальные данные в среднем на 15 %.



Рис. 8. Зависимость коэффициента расхода ПЗК от объемного расхода пара в паропроводе. S  $_{\Pi 3K} = 50 \%$ 

На рис. 9–10, аналогично рис. 6–7, показаны поля скоростей. Можно отметить стабильное положение вихревых зон в окнах гильзы/золотника вне зависимости от величины объемного расхода пара в паропроводе.

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



Рис. 9. Поле скоростей в поперечном сечении ПЗК.  $S_{\Pi 3K} = 50 \%$ .  $\bar{Q} = 0.15$ 



Рис. 10. Поле скоростей в поперечном сечении ПЗК. SПЗК = 50 %.  $\bar{Q}$  = 1.2

Результаты 3D расчетов позволяют на качественном уровне объяснить эффект уменьшения расхода (коэффициента расхода) через ПЗК при увеличении объемного расхода пара в паропроводе. В условиях больших открытий крана при увеличении расхода до  $Q^*$  (до  $\bar{Q} = 1$ ) этот эффект связан с расширением вихревой зоны в окнах ПЗК и уменьшением эффективной площади проходного сечения. При дальнейшем увеличении расхода ( $\bar{Q} > 1$ ) в зоне разрежения за входной кромкой образуется жидкая фаза, причем ее образование (образование двухфазной среды) приводит к резкому уменьшению скорости звука. Это «провоцирует» возникновение скачка уплотнения, приводящего к частичному «запиранию» потока и увеличению гидравлического сопротивления ПЗК (к уменьшению коэффициента расхода), и темп уменьшения коэффициента расхода с ростом Q резко возрастает. Однако при проведении расчетов свойства в двухфазной области искусственно замещались свойствами пара, и указанный эффект не воспроизводился. Этим можно объяснить различие расчета и эксперимента при больших открытиях ПЗК.

При относительно малых открытиях ПЗК независимость коэффициентов расхода от объемного расхода пара в паропроводе, по-видимому, объясняется неизменностью условий отрыва струи и проявления звуковых явлений, что обусловлено сильно выраженной ступенчатой формой проходного сечения окон гильзы/золотника. Обобщение экспериментальных данных, учитывающее влияние транзитного расхода пара на коэффициент расхода ПЗК, для актуальной области изменения  $1.2 \ge \bar{Q} \ge 0.5$  выполнено следующим образом:

$$\begin{split} &\Pi \text{ри S}_{\Pi 3 \text{K}} < 60 \% & \mu \text{F}' = \mu \text{F}. \\ &\Pi \text{ри S}_{\Pi 3 \text{K}} \ge 60 \% \text{ и } \bar{Q} < 1 & \mu \text{F}' = \mu \text{F} \; \bar{Q}^{0.2}. \\ &\Pi \text{ри S}_{\Pi 3 \text{K}} \ge 60 \% \text{ и } \bar{Q} \ge 1 & \mu \text{F}' = \mu \text{F} \; \bar{Q}^{1.8}. \end{split}$$

В соответствии с обобщающей эмпирической корреляцией при  $S_{\Pi 3K} > 60 \%$  увеличение транзитного расхода пара приводит к монотонному уменьшению коэффициента расхода µF, т.е. так, как это показано на рис. 5.

Результаты обобщения представлены на рис. 11, и можно видеть, что по сравнению с рис. 3 разброс точек существенно уменьшился, а при  $\bar{Q} = 1$  пропускная способность ПЗК (при S<sub>ПЗК</sub> = 100 %) уменьшается приблизительно на 30 %.



Рис. 11. Модифицированная расходная характеристика ПЗК

#### Заключение

В результате проведенных экспериментальных и расчетных исследований установлено, что транзитный паровой поток уменьшает пропускную способность встроенного в паропровод поворотно-золотникового крана. Учет этого эффекта является актуальным при разработке системы управления энергетическим оборудованием. Показано, что экспериментальное определение расходной характеристики поворотнозолотникового крана следует выполнять во всем диапазоне изменения расхода пара в паропроводе с использованием разработанной методики обобщения экспериментальных данных.

#### Conclusion

Based on results of experimental and numerical research, it is found that transient steam flow reduces the flow performance of a rotary slide valve built in a steam line. This effect should be taken into account by designers of control systems for power plant equipment.

It is shown that the flow characteristic of rotary slide valves should be experimentally determined for the full range of steam flow variations in steam lines by using the developed method of experiment data integration.

#### Литература

- 1. *Имбрицкий М.И.* Справочник по арматуре тепловых электростанций. М.: Энергоиздат, 1981.
- 2. *Гуревич Д.Ф*. Трубопроводная арматура: справочное пособие. Л.: «Машиностроение», 1981.
- 3. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1960.
- Henry R.E. The Two-Phase Critical Flow of One-Component in Nozzles, Orifices, and Short Tubes / R.E. Henry, H.K. Fauske // Transactions of the ASME. – May 1971. – P. 179–187.

УДК 621.039

#### DOI:10.52069/2414-5726\_2023\_2\_32\_35

## Обоснование эффективности применения автоматизированной системы химического контроля при испытаниях транспортных ЯЭУ на стендах-прототипах

В.А. Василенко<sup>1</sup>, А.С. Грицай<sup>1, 2</sup>, Д.А. Кирпиков<sup>1</sup>, Ю.В. Крюков<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия <sup>2</sup> Институт Ядерной Энергетики, филиал Санкт-Петербургского политехнического университета им. Петра Великого, г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

#### Аннотация

В статье обсуждаются особенности использования автоматизированных систем химического контроля параметров теплоносителя при проведении испытаний на стендах-прототипах транспортных ядерных энергетических установок с водо-водяными реакторами.

Одним из способов обеспечения качества и достоверности информации о состоянии водно-химического режима является сравнение результатов автоматизированного и лабораторного контроля показателей качества (параметров) технологических сред. Для сравнения результатов автоматизированного контроля и лабораторных измерений в статье предлагается использовать статистические методы анализа.

На основе имеющихся экспериментальных данных показана эффективность предлагаемого подхода для обеспечения качества получаемых результатов измерений, имеющих выраженный стохастический характер.

**Ключевые слова**: химический контроль, технологические среды, водно-химический режим, статистические методы анализа, ядерные энергетические установки.

## Analysis of the effectiveness of using automated chemical monitoring systems during testing of nuclear propulsion reactor plants in prototype facilities

V.A. Vasilenko<sup>1</sup>, A.S. Gritsai<sup>1, 2</sup>, D.A. Kirpikov<sup>1</sup>, Yu.V. Kriukov<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> FSUE "Alexandrov NITI", Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

<sup>2</sup> Institute of Nuclear Power Engineering, the branch of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

#### Abstract

The paper discusses the use of automated systems for chemical monitoring of coolant parameters during tests carried out in water cooled nuclear propulsion reactor prototype facilities.

An approach for ensuring the quality and reliability of information about water chemistry conditions is to compare results of automated online monitoring with results of laboratory analyses of water quality parameters. Statistical analysis methods are suggested to compare automated monitoring results against laboratory measurements.

Based on the analysis of experimental data, the effectiveness of the proposed approach for ensuring the quality of measurement results that have a distinct stochastic character is demonstrated.

**Key words**: chemical monitoring, coolant water, water chemistry, statistical analysis methods, nuclear propulsion reactor plants.
Одним из факторов повышения безопасности и эффективности функционирования ТЭС, АЭС и ядерных энергетических установок (ЯЭУ) является внедрение автоматизированных систем контроля за состоянием оборудования и технологических сред энергоблоков, обеспечивающих получение оперативной и достоверной информации, необходимой для осуществления персоналом своевременных управляющих воздействий.

Химический контроль качества водных технологических сред в энергетическом оборудовании энергоблоков является одним из условий его эффективной и безопасной эксплуатации. По мере развития средств контроля и автоматизации велась разработка и создание автоматизированных систем контроля водно-химического режима (ВХР), имеющих ряд преимуществ перед методами лабораторного анализа, включающих, в том числе, процедуры пробоотбора и пробоподготовки. Проблемы создания и использования подобных систем в тепловой и атомной энергетике рассмотрены в [1, 2].

В атомной энергетике реализация автоматизированного химического контроля имеет ряд существенных отличий: необходимость работы с радиоактивными средами, наличие в теплоносителе специфических корректирующих добавок, более высокие требования к чувствительности и точности применяемых методов и средств измерения. В работе [3] на примере системы химического мониторинга Тяньваньской АЭС в Китае изложены основные подходы к построению подобных систем и выбору применяемого оборудования. Приведены цели создания систем автоматизированного химического контроля, среди которых выделено повышение эксплуатационной надёжности и экономичности энергоблоков АЭС путём оперативности контроля и поддержания качества ВХР.

Итогами использования системы химического мониторинга должны стать обеспечение проектного срока службы оборудования, снижение количества отложений на поверхностях оборудования и трубопроводов, уменьшение дозовых нагрузок на персонал, сокращение объёмов химических реагентов, сбрасываемых в окружающую среду. В этом случае при эксплуатации оборудования энергоблоков АЭС особую актуальность приобретает задача поддержания оптимального ВХР, что требует создания надёжной управляющей связи между системой химического мониторинга и системами поддержания качества теплоносителя. С этой целью на АЭС и ЯЭУ выбираются реперные показатели качества ВХР для автоматизированного контроля, которые характеризуют эксплуатационное состояние оборудования энергоблока и которые могут корректироваться с учётом используемых специализированных технологических систем очистки и подготовки теплоносителя.

Важной задачей также является анализ причин отклонений показателей качества ВХР от нормируемых значений, а также формирование рекомендаций персоналу химической службы АЭС по устранению выявленных аномалий.

Применительно к стендам-прототипам транспортных ЯЭУ требования к автоматизированным системам химического контроля существенно ужесточаются. Это связано как с изменением целей контроля, так и с увеличением удельной активности теплоносителя. В отличие от энергоблоков АЭС режимы работы установок на стендах-прототипах характеризуются разнообразием и кратковременностью и во многих случаях сопровождаются в процессе их проведения существенным изменением параметров ВХР. Поэтому поддержание заданного ВХР обеспечивается функционированием соответствующих технологических систем, как правило, только во время перерывов между испытаниями (сериями испытаний), и на первый план выходит оперативный контроль изменения показателей ВХР в их связи с особенностями проводимых испытательных режимов. Что касается радиоактивности теплоносителя, то для стендов-прототипов ЯЭУ её уровень может существенно превышать нормы, допустимые при проведении химического анализа проб теплоносителя персоналом химических лабораторий. Следствием отмеченных особенностей является безусловная необходимость размещения приборов, оборудования и средств транспортировки радиоактивных сред, входящих в состав системы автоматизированного химического контроля, в защитных камерах и боксах. При этом должна быть обеспечена возможность транспортировки проб теплоносителя с допустимым уровнем суммарной активности радионуклидов за пределы защитных камер в помещение химической лаборатории для проведения независимых измерений контролируемых параметров.

Другим требованием к химическому контролю является периодичность измерений, обусловленная алгоритмом проведения испытаний, как правило, до начала и по завершении каждого испытательного режима вне зависимости от его длительности.

Дополнительные сложности с проверкой работоспособности измерительных средств, размещенных в защитной камере, приводят к необходимости подтверждения корректности и приемлемой точности измерений, выполняемых с использованием автоматизированных систем химического контроля. Одним из вариантов решения этой задачи может являться сопоставление результатов измерений, полученных на основе автоматизированных систем, с измерениями, выполненными в лабораторных условиях.

Учитывая стохастический характер исходных данных, при сравнении массивов результатов измерений целесообразно использовать статистические методы анализа, позволяющие повысить достоверность выводов и дать им вероятностную оценку.

Одним из способов сопоставления массивов результатов измерений (по каждому из показателей качества BXP) является сравнение математических ожиданий стационарных фрагментов массивов автоматизированных и лабораторных измерений, полученных в заданной точке контроля при неизменном режиме работы оборудования, влияющего на состояние BXP. Для сравнения математических ожиданий может использоваться ряд статистических методов, выбор которых зависит от имеющейся априорной информации о статистических характеристиках сравниваемых массивов.

В качестве примера в данной работе для подтверждения достоверности измерений автоматизированной системы химического контроля, применяемой при контроле качества ВХР первого контура ЯЭУ с водо-водяным реактором, выбраны пять химических параметров теплоносителя первого контура, контролируемых при проведении испытаний:

– водородный показатель	—	pН,	ед. рН;
– содержание ионов аммония	_	$\mathrm{NH}_3^+$ ,	мг/дм <sup>3</sup> ;
– содержание нитратов	—	$NO_3^-$ ,	мкг/дм <sup>3</sup> ;
– содержание хлоридов	—	Cl⁻,	мкг/дм <sup>3</sup> ;
– удельная электропроводимость	_	УЭП,	мкСм/см

Массивы результатов измерений сопоставляемых химических параметров, полученные с использованием лабораторных «л» и автоматизированных «а» средств, приведены в табл. 1.

Предварительный анализ сопоставляемых массивов (на основе *F-критерия Фишера* [4]) свидетельствует о близости (равенстве) значений их выборочных дисперсий. В этом случае одним из простейших алгоритмов сравнения математических ожиданий является *t-критерий Стьюдента для независимых выборок* [5]. В случае отсутствия какой-либо априорной информации о значениях дисперсий сопоставляемых массивов сравнение математических ожиданий выборок может быть проведено на основе критерия Кохрана-Кокса [5, 6].

Результаты сравнения дисперсий и математических ожиданий сопоставляемых фрагментов по *F*-критерию Фишера и *t*-критерию Стьюдента приведены в табл. 2.

Таблица 1

N⁰	pН	рН	NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	NH <sub>3</sub> <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	C1 <sup>-</sup> , мкг/дм <sup>3</sup>	Cl <sup>-</sup> , мкг/дм <sup>3</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мкг/дм <sup>3</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мкг/дм <sup>3</sup>	УЭП мкСм/см	УЭП мкСм/см
	(л)	(a)	(л)	(a)	(л)	(a)	(л)	(a)	(л)	(a)
1	9.60	9.70	2.30	2.50	7.00	8.00	5.00	5.0	21.8	24.3
2	9.30	9.20	1.60	1.70	8.00	8.00	5.00	6.0	21.7	22.9
3	6.10	5.80	3.10	3.60	11.00	11.00	71.00	42.00	22.6	22.8
4	9.60	9.70	0.50	0.50	10.00	11.00	0.50	19.00	22.5	23.3
5	9.50	9.50	0.40	0.40	6.00	6.00	140.00	67.00	22.3	22.5
6	9.10	9.30	1.00	1.00	12.00	11.00	0.500	0.500	20.3	20.1
7	6.30	6.00	3.10	3.10	10.00	9.00	52.00	44.00	23.7	22.3
8	9.60	10.30	2.30	1.70	21.00	22.00	150.00	130.00	19.6	19.1
9	8.40	8.80	7.00	7.00	11.00	12.00	0.50	0.50	19.3	20.5
10	9.50	9.40	7.70	6.80	10.00	11.00	0.50	0.50	18.4	18.1
11	10.00	10.00	7.50	7.20	16.00	12.00	117.00	121.00	21.3	22.0
12	6.60	6.50	0.50	0.50	8.00	9.00	7.00	8.00	23.1	24.0
13	6.20	6.10	4.70	4.70	14.00	13.00	0.50	0.50	23.2	24.9
14	9.80	9.90	4.70	4.90	8.00	10.00	140.00	150.00	20.1	21.2
15	6.00	6.10	1.90	1.90	7.00	8.00	140.00	150.00	20.0	18.5
16	8.30	8.80	7.50	7.00	11.00	13.00	0.50	0.50	26.7	24.5
17	6.50	6.60	1.20	1.30	7.00	8.00	150.00	130.00	27.6	26.5
18	9.80	9.80	3.90	4.10	11.00	12.00	-	-	22.3	21.9
19	10.00	10.00	4.30	5.00	7.00	8.00	-	-	20.6	21.5
20	9.90	9.90	1.00	1.00	11.00	11.00	-	-	22.3	19.6
21	6.70	6.70	5.40	5.40	22.00	20.00	-	-	24.6	24.4
22	9.80	9.80	4.00	4.10	9.00	11.00	-	-	26.8	24.4
23	9.70	10.00	0.80	0.80	18.00	16.00	-	-	-	-
24	6.40	6.40	1.00	1.10	17.00	20.00	-	-	-	-
25	9.10	9.50	1.10	1.00	18.00	15.00	-	-	-	-
26	9.80	9.90	2.40	2.20	20.00	18.00	-	-	-	-
27	6.30	6.30			12.00	10.00	-	-	-	-
28	8.80	9.30			17.00	17.00	-	-	-	-
29	8.20	8.50			19.00	17.00	-	-	-	-
30	9.40	9.60			17.00	18.00	-	-	-	-
31	9.10	9.30					-	-	-	-

## Результаты измерений сопоставляемых показателей качества ВХР, полученные на основе автоматизированных и лабораторных данных

#### Таблица 2

	pH, $(n_1 = n_2 = 31)$	NH <sup>+</sup> <sub>3</sub> , мг/дм <sup>3</sup> (n <sub>1</sub> =n <sub>2</sub> =26)	C1 <sup>-</sup> , мкг/дм <sup>3</sup> (n <sub>1</sub> =n <sub>2</sub> = 30)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мкг/дм <sup>3</sup> (n <sub>1</sub> =n <sub>2</sub> =17)	УЭП, мкСм/см (n <sub>1</sub> =n <sub>2</sub> =22)
F	1.096	1.035	1.125	1.096	1.191
$\mathbf{F}_{_{\mathrm{KP}}}$	2.074	2.230	2.101	2.761	2.409
t	0.014	0.003	0.053	0.014	0.024
t <sub>кp</sub>	2.000	2.009	2.002	2.037	2.018

Результаты сравнения средних значений сопоставляемых фрагментов<sup>\*</sup> на основе *F-критерия Фишера* и *t-критерия Стьюдента* при доверительной вероятности 0.95 %

<sup>\*</sup>*n*<sub>1</sub> и *n*<sub>2</sub> – объёмы сравниваемых фрагментов данных.

Из табл. 2 следует, что для сравниваемых фрагментов рассчитанные по экспериментальным данным значения **F** и **t** статистик не превышают соответствующих критических значений  $\mathbf{F}_{kp}$  и  $\mathbf{t}_{kp}$ . Поэтому для каждого из сравниваемых параметров может быть сделан вывод о совпадении (*неразличимости*) результатов измерений автоматизированного и лабораторного контроля в пределах погрешностей методов измерений. Это подтверждает эффективность применения автоматизированной системы химического контроля для поддержания качества ВХР при проведении испытай транспортных ЯЭУ на стендах-прототипах.

Для удельной электропроводимости теплоносителя в качестве альтернативного подхода было проведено сравнение средних значений фрагментов результатов лабораторных и автоматизированных измерений на основе статистического критерия Кохрана-Кокса (т.е. без каких-либо априорных предположений о значениях дисперсий сравниваемых выборок). В этом случае рассчитанное по данным табл. 1 значение статистики критерия [5, 6] равно  $t_{\rm cr} = 0.0845$  и при доверительной вероятности 0.95 % существенно ниже критического значения

 $t_{0.95}^{kp} = 2.08$ . Это также свидетельствует о совпадении измеренных значений автоматизированного и лабораторного контроля удельной электропроводимости в пределах погрешностей методов измерения.

#### Заключение

Проверка работоспособности средств контроля химических параметров теплоносителя транспортных ЯЭУ требует подтверждения корректности и приемлемой точности измерений, получаемых с использованием автоматизированных систем химического контроля. Одним из вариантов решения этой задачи является сопоставление результатов измерений автоматизированных систем химического контроля с измерениями, полученными в лабораторных условиях.

Выполненное с использованием статистических методов сопоставление результатов лабораторных измерений и измерений автоматизированной системы контроля ВХР теплоносителя подтверждает эффективность применения автоматизированной системы химического контроля при испытаниях транспортных ЯЭУ на стендах-прототипах.

#### Conclusion

Performance testing of equipment that is used to monitor coolant chemical parameters in nuclear propulsion reactor plants requires confirmation of correctness and reasonable accuracy of measurements performed with automated chemical monitoring systems. This confirmation can be done by comparing results of measurements done with automated chemical monitoring systems against results obtained in laboratory.

Based on statistical methods, comparison between laboratory measurements and results of measurements done with the proposed automated water chemistry monitoring system has confirmed the effectiveness of using such systems in testing nuclear propulsion reactor plants at prototype facilities.

#### Литература

- 1. Живилова Л.М. Автоматический контроль водно-химического режима ТЭС / Л.М. Живилова, П.Н. Назаренко, Г.П. Маркин. М.: Энергия, 1979.
- 2. Живилова Л.М. Система и средства автоматизации контроля водно-химического режима тепловых электростанций / Л.М. Живилова, В.В. Тарновский // Теплоэнергетика. 1998. №7. С.14–19.
- 3. Система химического мониторинга Тяньваньской АЭС в Китае / М.П. Багерман [и др.] // Теплоэнергетика. 2001. № 12. С. 69–72.
- 4. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке (методы обработки данных) / Н. Джонсон, Ф. Лион, А.И. Кобзарь. М. Мир. 1980. 610 с.
- 5. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2003. 479 с.
- 6. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

УДК 621.039.548

DOI:10.52069/2414-5726\_2023\_2\_32\_41

## Методика обнаружения ОТВС с микродефектами оболочек твэлов и результаты апробации заложенных в неё алгоритмов

**Р.В.** Фоменков<sup>1</sup>, Р.Э. Зинатуллин<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 им. Петра Великого, Россия

#### Аннотация

В статье представлена методика обнаружения ОТВС с микродефектами в оболочках твэлов ЯЭУ транспортного назначения. Методика включает в себя: последовательность действий при дефектации ОТВС методом газовой дифектации с нагревом герметичного испытательного контейнера до температуры 300 °С на специализированном стенде, алгоритмы определения параметров математической модели и сопоставления полученных результатов. Также в работе приведены результаты апробации используемых алгоритмов по результатам нагрева негерметичных ОТВС.

Ключевые слова: радиоактивность <sup>85</sup>Кг, алгоритмы, внереакторная дефектация, герметичность, дисперсионное топливо, математическая модель, тепловыделяющие элементы, транспортные ядерные энергетические установки.

# Procedure for identifying SNF assemblies with micro defects of cladding and evaluation of procedure algorithms

R.V. Fomenkov<sup>1</sup>, R.E. Zinatullin<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> FSUE "Alexandrov NITI", Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia <sup>2</sup> Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University

#### Abstract

The paper presents a procedure for identifying nuclear propulsion reactor SNF assemblies with micro defects in rod cladding. The procedure involves a sequence of operations for failure detection of SNF assemblies in dehydrated medium by heating a sealed test container to 300 °C in the purpose-designed setup. The procedure also contains algorithms for determining mathematical model parameters and comparing between results obtained. The paper presents evaluation of the procedure algorithms by using results of heating of defective SNF assemblies.

**Key words**: <sup>85</sup>Kr activity, algorithms, ex-core leak detection, leak-tightness, dispersion fuel, mathematical model, fuel rods, nuclear propulsion reactor plants.

#### Введение

Для обоснования надёжности новых активных зон (а.з.) ЯЭУ транспортного назначения проводятся материаловедческие исследования отработавших тепловыделяющих сборок (OTBC), облучённых в ходе испытаний [1]. Выяснение причин повреждений оболочек твэлов требует проведения специальных исследований сборок как с крупными дефектами оболочек, так и дефектами на ранних этапах образования разгерметизации (OTBC с микродефектами) [2]. Также выявление ОТВС с микродефектами (микротрещины, линейные размеры которых исчисляются микронами) требовалось для организации раздельного хранения герметичных и негерметичных сборок в связи с отсутствием данных о сокращении гарантийного срока их безопасного совместного хранения для активных зон (а.з.) нового типа. Выбор методов контроля герметичности оболочек (КГО) твэлов зависит от типа используемого топлива и степени физического повреждения материала оболочки [3]. Для стационарных ЯЭУ с топливом на основе двуокиси урана накоплен большой опыт КГО твэлов специальными системами контроля. Однако для ОТВС с топливом дисперсионного типа, которые эксплуатируются на ЯЭУ транспортного назначения и атомных станциях малой мощности [4], данные методы КГО не подходят. Для идентификации ОТВС с микродефектами в оболочках твэлов также не подходят методы, предназначенные для поиска средних (образование единичных трещин и возникновение эрозии топлива) и крупных (раскрытие трещин, образование непосредственного контакта топлива с теплоносителем) дефектов из-за малой скорости выхода реперных нуклидов [3].

Для обнаружения ОТВС с микродефектами в оболочках твэлов дисперсионного типа авторами работы использован метод внереакторной газовой дефектации в сухой среде («сухой» метод). Метод основан на измерении объёмной активности <sup>85</sup>Кг, поступающего в контур универсального стенда дефектации (УСД) из негерметичных ОТВС при нагреве герметичного испытательного контейнера (ГИК) до температуры 300 °С. Реализация данного метода выполняется с использованием УСД. Чувствительность метода определяется минимальной объёмной активностью нуклида <sup>85</sup>Кг в контуре стенда дефектации, которая может быть измерена радиометрической аппаратурой (в частности, устройством измерения суммарной объёмной активности газа УДГ-1Б). При этом идентификации радионуклидного состава газа, как правило, не предусматривается. По этой причине наличие мешающих радиоактивных примесей в газе стенда дефектации может значительно влиять на достоверность результатов измерений активности <sup>85</sup>Kr.

В процессе нагрева ОТВС на УСД (нагрев ГИК до температуры 300 °С) было выявлено расхождение данных по объёмной активности <sup>85</sup>Кг, измеряемой с применением радиометрической аппаратуры (УДГ-1Б) и спектрометра гамма-излучения [2]. Причиной расхождения являлось поступление в контур стенда радионуклида <sup>14</sup>С с поверхности ОТВС. При малых дефектах оболочек твэлов (микродефекты и единичные трещины) присутствие <sup>14</sup>С в контуре стенда дефектации мешало выявлению негерметичных ОТВС. Модернизация системы очистки (стенда дефектации) позволила эффективно удалять <sup>14</sup>С из газовой (воздушной) среды стенда, что снизило его объёмную активность до фоновых значений [2].

Также было обнаружено, что при нагреве ГИК с ОТВС до 300 °С скорость выхода в контур <sup>85</sup>Кг снижается с течением времени, что мешает интерпретации полученных результатов. Разработка математической модели [3] позволила описать выход <sup>85</sup>Кг из облученного топлива в контур стенда дефектации за счёт введения «эффективных» коэффициентов. Были разработаны алгоритмы расчёта эффективных коэффициентов по результатам измерения в контуре дефектации объёмной активности <sup>85</sup>Кг в процессе нагрева ОТВС.

При проведении испытаний а.з. нового типа особое значение приобретает обеспечение достоверности получаемых результатов. В этой связи обнаружение негерметичных ОТВС требует подтверждения – проведения повторных нагревов ОТВС. Однако, было обнаружено, что при повторных нагревах ОТВС происходит многократное снижение объёмной активности <sup>85</sup>Kr по сравнению с первым нагревом. Это приводило к неоднозначной трактовке получаемых результатов: были весомые аргументы считать ОТВС с микродефектами в оболочках твэлов герметичными, поскольку при повторном нагреве объёмная активность <sup>85</sup>Kr в контуре могла быть на уровне фоновых значений, а наблюдаемый при первичном нагреве ОТВС рост активности можно было объяснить «помехами» в работе радиометрической аппаратуры. Чтобы выявить разгерметизацию ОТВС с микродефектами оболочек твэлов, в подобных условиях, потребовалась разработка алгоритмов сравнения экспериментальных результатов.

Таким образом, существующие регламенты и программы дефектации ОТВС ЯЭУ транспортного назначения, предусматривающие использование УСД [5], были адаптированы авторами работы к поиску ОТВС с микродефектами в оболочках твэлов с интерметаллидным топливом. В методику обнаружения ОТВС с микродефектами также вошли алгоритмы расчёта параметров математической модели и алгоритмы сравнения результатов первичного и повторного нагревов ОТВС [3], средства и алгоритмы очистки газа (воздуха) от <sup>14</sup>С [2], поступающего с поверхностей твэлов (сборок) при нагреве ГИК до температуры 300 °С.

#### 1. Алгоритмы поиска ОТВС с микродефектами

Поиск микродефектов в оболочках твэлов включает в себя:

- последовательность действий при выполнении работ с ОТВС ЯЭУ транспортного назначения на стенде внереакторной дефектации «сухим» методом с нагревом ГИК до 300 °C;
- алгоритмы расчёта параметров математической модели;
- алгоритмы сопоставления полученных результатов КГО твэлов.

#### 1.1 Выполнение работ на универсальном стенде дефектации ОТВС

#### 1.1.1 Стенд внереакторной дефектации

Функционально УСД состоит из [5]:

- герметичного испытательного контейнера (ГИК) с электронагревателями, в который помещается исследуемая ОТВС;
- контура многократной циркуляции газа (КМЦГ) с запорной и соединительной арматурой, газодувкой и системой отбора газовых и аэрозольных проб для радиометрических измерений;
- измерительного контура (ИК), включающего дозиметры, контрольно-измерительные приборы, систему отбора газовых и аэрозольных проб, а также устройство детектирования суммарной бета-активности газа (УДГ-1Б).

При выполнении работ с ОТВС допускается использование другого стенда внереакторной дефектации, позволяющего работать с ОТВС ЯЭУ транспортного типа и со схожими характеристиками используемого оборудования. Стенд должен обеспечивать требования радиационной и ядерной безопасности при выполнении работ с ОТВС, выполнять следующие функции:

- нагрев ГИК до температуры 300 °С;
- поддержание заданной температуры нагрева до окончания работ;
- перемешивание газа (воздуха) по контуру стенда и измерение объёмной активности
   <sup>85</sup>Kr в газе (воздухе) стенда с заданной периодичностью;
- измерение температуры ГИК;
- удаление радионуклидов в виде аэрозольных примесей (использование аэрозольных фильтров, например, АФА-РМП или ФПП-15);
- иммобилизация радионуклидов, переносимых с частицами влаги (использование влагоотделителя);
- удаление радионуклида <sup>14</sup>С из газа (воздуха) УСД с использованием специальной системы очистки, приведённой в работе [2] или усовершенствованной.

Отметим, что температура нагрева ГИК равная 300 °С выбрана по результатам эксплуатации УСД и признана достаточной для поиска ОТВС с микродефектами в оболочках твэлов с интерметаллидным топливом.

#### 1.1.2 Алгоритм проведения работ на стенде дефектации

Работы с ОТВС на стенде дефектации выполнятся по алгоритму, представленному на рис. 1 (первичный нагрев ОТВС). По результатам первого нагрева ОТВС принимается одно из решений:

- ОТВС признаётся герметичной;
- ОТВС признаётся негерметичной с пометкой «большие дефекты»;
- ОТВС направляется на повторный нагрев.



Рис. 1. Алгоритм первичного нагрева ГИК с ОТВС до температуры 300 °С

Алгоритм проведения работ при повторном нагреве ОТВС представлен на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм повторного нагрева ГИК с ОТВС до температуры 300  $^{\circ}\mathrm{C}$ 

По результатам повторного нагрева ОТВС выполняется одно из действий:

- ОТВС признаётся негерметичной (раскрытие дефекта);
- результаты первичного и повторного нагрева ОТВС анализируются с целью определения параметров модели (см. ниже раздел 1.2);
- результаты первичного нагрева ОТВС анализируются с целью определения параметров модели (см. раздел 1.2), а результаты повторного нагрева – с целью выполнения консервативной оценки параметров модели (см. раздел 1.2.4).

Результаты первичного и повторного нагревов сравниваются в соответствии с алгоритмами, приведёнными в разделе 1.3.

#### 1.2 Определение параметров расчётной модели

Объёмная активность <sup>85</sup>Kr в объёме измерительного контура стенда дефектации после достижения стационарной температуры нагрева описывается с использованием выражения, аналогичного математической модели [3]:

$$a_{exp} = G \cdot \left( \sqrt{\xi + \tau} - \sqrt{\xi} \right) + a_f, \, \mathrm{KK/M^3}$$
(1)

где

 $a_{exp}$  – расчётное значение объёмной активности <sup>85</sup>Кг в контуре стенда дефектации при постоянной температуре ОТВС, Бк/м<sup>3</sup>;

 $a_f$  – объёмная активность <sup>85</sup>Кг в контуре на момент достижения стационарной температуры ОТВС, Бк/м<sup>3</sup>;

G – эффективный коэффициент пропорциональности, Бк/(ч<sup>1/2</sup>·м<sup>3</sup>);

ξ – параметр «эффективного» времени, ч;

*т* – время дефектации при постоянной температуре ОТВС, ч.

Определение параметров модели (1) включает в себя несколько этапов:

- расчёт скорости выхода (активности) <sup>85</sup>Kr;
- определение времени достижения стационарной температуры топлива;
- определение значения «эффективного» времени ξ;
- расчёт эффективного коэффициента G.

#### 1.2.1 Расчёт скорости выхода<sup>85</sup>Кг

Расчёт скорости выхода <sup>85</sup>Кг ( $v_i$ , Бк/(ч·м<sup>3</sup>)) в объём стенда дефектации выполняется на основании данных по изменению объёмной активности данного нуклида на момент времени  $a_i(t_i)$ , которые указываются в протоколах дефектации. Вычисление производится с использованием выражения:

$$\nu_i = \frac{a_{i+1} - a_i}{t_{i+1} - t_i},$$
(2)

где

 $a_i$  и  $a_{i+1}$  – объёмные активности ГПД в контуре стенда дефектации, измеренные в моменты времени  $t_i$  и  $t_{i+1}$ , соответственно, Бк/м<sup>3</sup>;

 $t_i$  и  $t_{i+1}$  – время выполнения *i*-го и *i*+1-го измерения объёмной активности ГПД в контуре стенда дефектации с момента начала работ, ч.

Для удобства расчётов, при определении параметров модели (1) исчисление времени выполняется в часах, вместо секунд, поэтому и размерность параметров модели изменена (переход с секунд на часы).

Погрешность определения скорости выхода <sup>85</sup>Kr ( $\Delta v_i$ , Бк/(ч·м<sup>3</sup>)) рассчитывается следующим образом:

$$\Delta v_{i} = \sqrt{\frac{(\Delta a_{i+1})^{2} + (\Delta a_{i})^{2}}{(t_{i+1} - t_{i})^{2}}} + 2\left(\frac{a_{i+1} - a_{i}}{(t_{i+1} - t_{i})^{2}} \cdot \Delta t\right)^{2}, \ \mathrm{K}/(\mathrm{H}\cdot\mathrm{M}^{3})$$
(3)

где

 $\Delta a_{i+1} \Delta a_i$  – погрешности определения активности <sup>85</sup>Кг в *i*+1-й и *i*-й контрольных точках соответственно, Бк/м<sup>3</sup>;

 $\Delta t$  – погрешность определения времени t, ч.

#### 1.2.2 Определение времени достижения стационарной температуры топлива

На основании массива данных о скорости выхода активности <sup>85</sup>Kr в объём измерительного контура УСД  $(v_i)$  определяется максимальная скорость выхода  $v_{max}$  и время её достижения  $t_{max}$  $(t_{max} - время начала интервала, на котором была рассчитана скорость <math>v_{max}$ ). Время  $t_{max}$  полагается моментом достижения равновесной температуры топлива.

Для проверки данного предположения используется критерий  $\psi$  [3]. Если равновесная температура была действительно достигнута в момент t<sub>max</sub>, то за время дефектации должен найтись момент времени  $t_k > t_{max}$  для которого будет выполняться условие:

$$\psi = \frac{\upsilon_{\max} - \upsilon_k}{\sqrt{(\Delta \upsilon_k)^2 + (\Delta \upsilon_{\max})^2}} > 1.96, \qquad (4)$$

где

 $\psi$  – критерий выхода на равновесие (для момента времени  $t_k$ );

 $v_{max}$  – максимальная скорость выхода <sup>85</sup>Kr из топлива в процессе дефектации (достигается в момент времени  $t_{max}$ ), Бк/(ч·м<sup>3</sup>);

 $v_k$  – скорость выхода <sup>85</sup>Кг из топлива в момент времени  $t_k > t_{max}$ , Бк/(ч·м<sup>3</sup>);

 $\Delta v_k$  и  $\Delta v_{max}$  – погрешности определения скоростей  $v_k$  и  $v_{max}$ , соответственно, Бк/(ч·м³).

Если условие (4) не выполняется, то однозначно нельзя утверждать, что равновесная температура в топливе была достигнута.

#### 1.2.3 Определение значения «эффективного» времени

Параметр 5 определяется на основании полученных экспериментальных данных в случае подтверждения достижения равновесной температуры топлива (критерий у удовлетворяет условию (4)).

Определение «эффективного» времени выполняется с использованием следующего выражения:

$$\frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} = \frac{\sqrt{\xi + \tau_4} + \sqrt{\xi + \tau_3}}{\sqrt{\xi + \tau_2} + \sqrt{\xi + \tau_1}},$$
(5)

где

τ<sub>1</sub>, τ<sub>2</sub>, τ<sub>3</sub>, τ<sub>4</sub> – время замеров объёмной активности <sup>85</sup>Kr при стационарной температуре

топлива  $(t_{max}^4 \le \tau_1 < \tau_2 \le \tau_3 < \tau_4)$ , с;  $v_1$  и  $v_2$  – скорости выхода <sup>85</sup>Kr из топлива, рассчитанные в моменты времени  $(\tau_1, \tau_2)$  и  $(\tau_3, \tau_4)$ соответственно, Бк/(ч·м<sup>3</sup>).

#### 1.2.4 Расчёт «эффективного» коэффициента G

При известном значении эффективного времени  $\xi$  расчёт «эффективного» коэффициента *G* выполняется в соответствии с алгоритмом 1.

Если эффективное время *ξ* по ряду причин не было определено, выполняется приближённая оценка «эффективного» коэффициента *G* по алгоритму 2.

Если в процессе повторного нагрева ОТВС объёмная активность <sup>85</sup>Kr была на уровне фоновых значений, выполняется консервативная оценка «эффективного» коэффициента *G* в соответствии с алгоритмом 3.

Алгоритм 1. При известном значении эффективного времени  $\xi$  коэффициент пропорциональности (*G*, Бк/(ч<sup>1/2</sup>·м<sup>3</sup>)) рассчитывается по формуле:

$$G = \upsilon(\tau_1, \tau_2) \cdot \left(\sqrt{\xi + \tau_1} + \sqrt{\xi + \tau_2}\right),\tag{6}$$

где

 $v(\tau_{l}, \tau_{2})$  – скорость выхода <sup>85</sup>Kr из топлива, которая рассчитываются по объёмным активностям нуклида в контуре стенда дефектации, измеренным в моменты времени  $\tau_{l}$  и  $\tau_{2}$ , Бк/(ч·м<sup>3</sup>);

 $\tau_1$  и  $\tau_2$  – любые два момента измерения объёмной активности <sup>85</sup>Кг при равновесной температуре топлива ( $\tau_1 \neq \tau_2$ ), ч.

Погрешность расчёта коэффициента пропорциональности ( $\Delta G$ , Бк/(ч<sup>1/2</sup>·м<sup>3</sup>)) вычисляется по следующему формуле:

$$\Delta G = \left(\sqrt{\xi + \tau_2} + \sqrt{\xi + \tau_1}\right) \cdot \sqrt{\frac{\left(\upsilon(\tau_1, \tau_2)\right)^2}{\left(\xi + \tau_2\right) \cdot \left(\xi + \tau_1\right)}} \cdot \left(\left(\Delta \xi\right)^2 + \left(\Delta \tau\right)^2\right) + \left(\Delta \upsilon(\tau_1, \tau_2)\right)^2 , \tag{7}$$

где

 $\Delta \xi$  – погрешность расчёта эффективного времени, ч;

 $\Delta \tau$  – погрешность определения времени измерений, ч;

 $\Delta v(\tau_1, \tau_2)$  – погрешность определения скорости выхода <sup>85</sup>Kr из топлива на участке от  $\tau_1$  до  $\tau_2$ , Бк/(ч·м<sup>3</sup>).

При расчёте коэффициента пропорциональности *G* по разным временным участкам, итоговое значение *G* определяется по области пересечения доверительных интервалов.

Алгоритм 2. При неизвестном значении параметра  $\xi$ , что характерно для экспериментов, в процессе проведения которых не были получены удовлетворяющие критерию (4) данные, значение коэффициента пропорциональности для первого нагрева ГИК с ОТВС до температуры 300 °С ( $G_1$ , Бк/(ч<sup>1/2</sup>·м<sup>3</sup>)) оценивается по формуле:

$$G_1 = \left(\upsilon_{\max}\right)_1 \cdot \sqrt{t_{i+1} - t_i} , \qquad (8)$$

где

 $(v_{max})_1$  – максимальная скорость выхода активности <sup>85</sup>Kr из дефектов ОТВС при первичном нагреве ОТВС, Бк/(ч·м<sup>3</sup>);

 $t_{i+1} - t_i$  – временной интервал, на котором была зафиксирована максимальная скорость выхода <sup>85</sup>Kr (при первом нагреве), ч.

Значение коэффициента пропорциональности для повторного нагрева ГИК с ОТВС до температуры 300 °С ( $G_2$ , Бк/(ч<sup>1/2</sup>·м<sup>3</sup>)) рассчитывается, в случае превышения фоновых показаний прибора, по формуле:

$$G_2 = (v_{\max})_2 \cdot \left(\sqrt{t_0 + t_{i+1} - t_i} + \sqrt{t_0}\right),\tag{9}$$

где

 $t_0$  – суммарное время нагрева ОТВС с момента достижения максимальной скорости при первом нагреве  $(t_i)$ , ч;

 $(v_{max})_2$  – максимальная скорость выхода активности  ${}^{85}\mathrm{Kr}$  из дефектов ОТВС при повторном нагреве ОТВС, Бк/(ч·м<sup>3</sup>);

 $t_{j+1} - t_j$  – временной интервал, на котором была зафиксирована максимальная скорость выхода <sup>85</sup>Kr при повторном нагреве ОТВС, ч.

Оценка погрешности определения коэффициента пропорциональности в случае первого нагрева ОТВС ( $\Delta G_1$ , Бк/( $\mathbf{q}^{1/2} \cdot \mathbf{M}^3$ )) выполняется с использованием следующего выражения:

$$\Delta G_1 = (\Delta \upsilon_{\max})_1 \cdot \sqrt{t_{i+1} - t_i} , \qquad (10)$$

где

 $(\Delta v_{max})_1$  – погрешность определения максимальной скорости выхода активности <sup>85</sup>Kr из дефектов ОТВС при первичном нагреве ОТВС, Бк/(ч·м<sup>3</sup>).

Оценка погрешности определения коэффициента пропорциональности в случае повторных нагревов ОТВС ( $\Delta G_2$ , Бк/( $q^{1/2} \cdot m^3$ )) выполняется по формуле:

$$\Delta G_2 = (\Delta \nu_{\max})_2 \cdot \left(\sqrt{t_0 + t_{i+1} - t_i} + \sqrt{t_0}\right),\tag{11}$$

где

 $(\Delta v_{max})_2$  – погрешность определения максимальной скорости выхода активности <sup>85</sup>Kr из дефектов ОТВС при первичном нагреве ОТВС, Бк/(ч·м<sup>3</sup>).

Алгоритм 3. В случае, если при повторном нагреве ОТВС фоновые показания радиометрической аппаратуры (УДГ-1Б) не были превышены, выполняется консервативная оценка коэффициента пропорциональности для повторного нагрева ( $G_3$ , Бк/( $u^{1/2} \cdot m^3$ )) с использованием следующего выражения:

$$G_{3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{a_{\phi on}}{t_{n+1} - t_{n}} \cdot V \cdot (\sqrt{t_{0} + t_{n+1} - t_{n}} + \sqrt{t_{0}}) , \qquad (12)$$

где

 $a_{\phi on}$  – фоновое значение объёмной активности <sup>85</sup>Kr, Бк/м<sup>3</sup>;  $t_{n}$  и  $t_{n-1}$  – время двух последних измерений объёмной активности <sup>85</sup>Kr перед завершением работ, ч;

 $t_0$  – суммарное время нагрева OTBC с момента достижения максимальной скорости при первом нагреве  $(t_i)$ , ч.

#### 1.3 Сопоставление результатов двух нагревов

Сопоставление результатов двух нагревов ОТВС выполняется с использованием расчётных данных о параметрах математической модели по изложенному ниже алгоритму.

1.3.1 Если ранее в процессе анализа были рассчитаны коэффициенты пропорциональности  $G_1$  и  $G_2$ , то выполняются следующие действия.

1) Значения коэффициентов пропорциональности  $G_1$  и  $G_2$ , рассчитанных по результатам первого и повторного нагревов, проверяются на соответствие по критерию согласования  $\omega$ :

$$\omega = \frac{G_1 - G_2}{\sqrt{(\Delta G_1)^2 + (\Delta G_2)^2}} < 1.96,$$
(13)

где

 $G_1$  и  $G_2$  – коэффициенты пропорциональности, определённые по результатам первого и повторного нагревов, соответственно, Бк/(ч<sup>1/2</sup>·м<sup>3</sup>);

 $\Delta G_1$  и  $\Delta G_2$  – погрешности расчёта коэффициентов пропорциональности, определённые для 1-го и 2-го нагревов, соответственно, Бк/(ч<sup>1/2</sup>·м<sup>3</sup>).

2) Если неравенство (13) выполняется, то рассматриваемая ОТВС идентифицируется как негерметичная. Наблюдаемые различия в скоростях выхода <sup>85</sup>Kr, в данном случае, объясняются эффектом «обеднения» поверхностных слоёв топлива.

3) Если неравенство (13) не выполняется, результаты двух нагревов ОТВС требуют отдельного рассмотрения. На результаты могут влиять: наличие ошибок при выполнении работ, неточности при ведении записей, выхода <sup>85</sup>Кг из застойных зон стенда дефектации, нарушение структуры топливной композиции, включающее отслоение топливной композиции от оболочки твэла, изменение размеров дефекта в процессе нагрева и т.д. Решение о герметичности данной ОТВС выносится по результатам отдельных исследований.

1.3.2 Если ранее в процессе анализа были рассчитаны коэффициенты пропорциональности  $G_1$  и  $G_3$ , то их сравнение выполняется по алгоритму.

1) Значения коэффициентов пропорциональности G<sub>1</sub> и G<sub>3</sub>, рассчитанных по результатам первого и повторного нагревов, проверяются на соответствие следующему неравенству:

$$G_3 - G_1 > 1.96 \cdot \Delta G_1. \tag{14}$$

2) Если неравенство (14) выполняется, то рассматриваемая ОТВС идентифицируется как негерметичная. Наблюдаемые различия в скоростях выхода <sup>85</sup>Kr, в данном случае, объясняются естественным снижением скорости выхода за счёт эффекта «обеднения» поверхностных слоёв топлива.

3) Если неравенство (14) не выполняется, полученные результаты двух нагревов ОТВС требуют отдельного рассмотрения. Решение о герметичности данной ОТВС выносится по результатам отдельных исследований.

#### 2. Апробация разработанной методики

Апробация методики и заложенных в неё алгоритмов выполнялись по результатам экспериментов, поставленным с ОТВС на УСД. В процессе их проведения сборки нагревались дважды. Температура нагрева ГИК с ОТВС № 1(150) составила 150 °С, ОТВС № 2(200) и № 3(200) – 200 °С, а ОТВС № 4(300) и № 5(300) – 300 °С. Данные по объёмным активностям <sup>85</sup>Кг, достигнутым в процессе первого и повторного нагревов ОТВС («Объёмная активность газа»), приведены на рис. 3.



Рис. 3. Данные по объёмной активности радионуклида <sup>85</sup>Кг при первом и повторном нагревах ОТВС

Из рис. 3 следует, что при проведении повторного нагрева ОТВС наблюдается многократное (в 2–7 раз) снижение объёмной активности <sup>85</sup>Кг по сравнению с первым. При первичной обработке представленных данных (без привлечения разработанных алгоритмов сопоставления) имеющиеся расхождения не позволили неоднозначно трактовать полученные результаты измерений: есть весомые аргументы считать ОТВС № 2(200), № 3(200), № 4(300) и № 5(300) герметичными, поскольку результаты их повторного нагрева находятся на уровне (2÷4)·10<sup>4</sup> Бк/м<sup>3</sup>, что близко к фоновым показаниями радиометрической аппаратуры (~1·10<sup>4</sup> Бк/м<sup>3</sup>).

Повторная обработка полученных массивов экспериментальных данных выполнялась с привлечением алгоритмов раздела 1.2. На рис. 4 приведены отношения коэффициентов  $G(G_1/G_2)$ , рассчитанных для первого  $(G_1)$  и повторного  $(G_2)$  нагревов, а также, для сравнения, отношения объёмных активностей.





Отношение коэффициентов пропорциональности  $G_1/G_2$  (в отличие от отношения активностей) близко к единице и варьируется в диапазоне от 0.6 до 1.3. Насколько отклонение от единицы критично, определяется с использованием критерия согласования  $\omega$  (см. неравенство (14)). Расчётные значения  $\omega$ , определённые в соответствии с алгоритмами раздела 1.3, приведены на рис. 5.



Рис. 5. Расчётные значения критерия согласования

Анализ данных, представленных на рис. 5, позволяет сделать вывод о том, что для всех рассмотренных ОТВС неравенство (14) выполняется (значение критерия согласования не более 1.96). Следовательно, наблюдаемые расхождения в значениях  $G_1$  и  $G_2$  связаны с погрешностью выполняемых вычислений.

Таким образом, повторная обработка имеющихся экспериментальных данных с использованием заложенных в методику алгоритмов показала, что наблюдаемое при многократном нагреве ОТВС снижение скорости выхода <sup>85</sup>Kr (по сравнению с первым нагревом) связано с эффектом обеднения поверхностных слоёв топлива. Совпадение в пределах погрешности определения значений коэффициентов пропорциональности для первичного и повторного нагревов свидетельствует о негерметичности рассмотренных ОТВС (выходе <sup>85</sup>Kr из открытого дисперсионного топлива).

#### Заключение

1. Разработанные алгоритмы и расчётные модели, а также предложения по порядку проведения нагрева ОТВС и очистке газа от «мешающих» примесей, формализованы в виде методики поиска ОТВС с микродефектами в оболочках твэлов. В методику вошли: последовательность действий при осуществлении нагрева ОТВС до температуры 300 °С на стенде методом газовой дефектации; алгоритмы определения параметров математической модели и сопоставления результатов первичного и повторного нагревов ОТВС.

2. Повторная обработка экспериментальных данных с использованием заложенных в

методику алгоритмов показала, что наблюдаемое при многократном нагреве ОТВС снижение скорости выхода <sup>85</sup>Kr (по сравнению с первым нагревом) связано с эффектом обеднения поверхностных слоёв топлива. Значения коэффициентов пропорциональности, рассчитанные по результатам нагрева при дефектации негерметичных ОТВС, совпадают в пределах погрешности их определения, что свидетельствует о негерметичности рассмотренных сборок.

#### Conclusions

1. The developed algorithms, computational models, and proposed sequence of operations to perform heating of SNF assemblies and remove interfering impurities from the gas are included in a procedure for identifying SNF assemblies with micro defects in rod cladding. The procedure describes the sequence of operations for heating SNF assemblies up to 300 °C using the method of failure detection of SNF assemblies in dehydrated medium and algorithms for determining mathematical model parameters and comparing between results of the first and second heating of SNF assemblies.

2. Repeated processing of the experiment data using the procedure algorithms has shown that depletion in the surface fuel layers is responsible for decrease in <sup>85</sup>Kr release rate observed during the second heating of SNF assemblies (as compared with the first heating). The values of the proportionality factors calculated from the heating results agree within their determination accuracy, which suggests the failure of SNF assemblies under testing.

#### Благодарности

Авторы выражают благодарность В.Г. Ильину, М.Н. Баеву, О.Н. Саранче, Ю.К. Корневу и другим сотрудникам отдела РБ, а также сотрудникам ОКЭЭР за проведение экспериментов с ОТВС, результаты которых были рассмотрены в данной статье.

#### Литература

- 1. Василенко В.А. Концепция и технология комплексных испытаний судовых ядерных энергетических установок на наземных стендах-прототипах. СПб.: Изд.-во «Моринтех», 2003. 168 с.
- Модернизация стенда дефектации ОТВС ЯЭУ транспортного назначения для идентификации микродефектов оболочек дисперсионных твэлов / Р.В. Фоменков, В.Н. Епимахов, Р.Э. Зинатуллин, А.А. Ефимов // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. 2022. № 4 (30). С.31–40.
- 3. *Фоменков Р.В.* Математическая модель выхода долгоживущих ГПД из негерметичных ОТВС с топливом дисперсионного типа / Р.В. Фоменков, А.В. Ельшин, Р.Э. Зинатуллин // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. 2023. № 1 (31). С. 16–30.
- 4. Опыт и перспективы разработки материалов и твэлов для транспортных реакторов и атомных станций малой мощности / Г.В. Кулаков, А.В. Ватулин, С.А. Ершов, А.А. Косауров [и др.] // Атомная энергия. 2015. Т. 119, вып. 5. С. 243–249.
- Внереакторный контроль герметичности оболочек твэлов ОТВС ТЯЭУ / В.Г. Ильин, В.Н. Епимахов, В.В. Четвериков, О.Н. Саранча, Р.В. Фоменков // Проблемы и перспективы развития химического и радиохимического контроля в атомной энергетике (Атомэнергоаналитика-2017): восьмая научно-техническая конференция; материалы конференции / ред. Ю.В. Цапко. – СПб.: Изд-во ВВМ, 2017. – С. 391–394.

УДК: 621.039.587

## Влияние выбора типа и конструкции теплоизоляции на количество дебриса, формирующегося в ходе аварии с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР

И.А. Магола, Л.А. Матюшев, Е.Л. Шамрай, Н.А. Осмаков, А.Г. Митрюхин

АО «АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ», Санкт-Петербург, Россия

#### Аннотация

В статье приводится обзор совокупности задач определения количественных характеристик, состава, направлений оптимизации конструкции, применяемых в атомной энергетике теплоизоляционных покрытий, решение которых требуется для выбора конструктивных характеристик решений систем безопасности и обеспечения безопасности АЭС. В частности, в процессе аварий, связанных с истечением теплоносителя первого контура, в герметичной оболочке формируется значительное количество дебриса – посторонних частиц, образовавшихся в результате разрушения теплоизолированных конструкций и покрытий. Образовавшийся дебрис попадает в раствор борной кислоты, использующийся системой аварийного охлаждения активной зоны для длительного охлаждения реакторной установки. Составляющие дебриса могут привести к блокированию системы аварийного охлаждения активной зоны и снижению эффективности охлаждения аварийной реакторной установки, что может привести к существенному ухудшению ситуации вплоть до сценария тяжелой аварии с расплавлением активной зоны. В статье предложены меры по оптимизации использования волокнистой теплоизоляции на трубопроводах различных диаметров.

**Ключевые слова**: герметичная оболочка реактора, дебрис, тепловая изоляция, зона воздействия, коэффициент зоны влияния, блочная съемная тепловая изоляция, авария на АЭС с ВВЭР.

## The influence of the type selection and design of thermal insulation on the amount of debris formed during an accident with loss of coolant at a nuclear power plant with PWR

I.A. Magola, L.A. Matyushev, E.L. Shamrai, N.A. Osmakov, A.G. Mitryukhin

JSC "ATOMENERGOPROEKT", Saint Petersburg, Russia

#### Abstract

Loss-of-coolant accidents generate large amounts of debris from thermal insulation and coatings on containment pipes and structures. This debris is mixed with borated water that used for reactor long-term cooling and could potentially clog the emergency core cooling system, thus reducing the reactor cooling efficiency.

This paper provides considerations for selection of thermal insulation in terms of quantitative characteristics, composition, and design improvements. This contribution is important for the design of safety systems and ensuring the safety of nuclear power plants.

**Key words**: reactor containment, debris; thermal insulation; zone of impact; impact zone coefficient; block removable thermal insulation; accident at a nuclear power plant with VVER.

Атомные электрические станции (АЭС) потенциально являются источником повышенной опасности, поэтому значительное место в проекте АЭС уделено системам безопасности, проектируемым в соответствии с принципом глубокоэшелонированной защиты. Для предотвращения возможного распространения радиоактивного загрязнения предусмотрены четыре физических барьера: топливная матрица, оболочка твэла, ограждение первого контура реакторной установки, герметичная оболочка (контейнмент) [1].

Исходным событием аварии с потерей теплоносителя является разрыв высокоэнергетического трубопровода первого контура или примыкающих к нему в неотсекаемой части [2].

В результате потери теплоносителя первого контура происходит снижение давления в нем, вскипание теплоносителя и другие, связанные с этим процессы, ухудшающие условия теплоотвода от активной зоны. Для того чтобы обеспечить восполнение потери теплоносителя и тем самым избежать перегрева оболочек твэлов и их разрушения, предусмотрены. системы аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ), которые как правило состоят из САОЗ высокого давления (САОЗ ВД) и низкого давления (САОЗ НД), а также гидроемкости САОЗ, которые являются пассивным средством залива активной зоны [3].

Давление и температура в герметичной оболочке реактора (контейнменте) растут вследствие выброса в него теплоносителя из разрыва первого контура. Для сохранения его целостности в проекте предусмотрена спринклерная система [4].

Кроме изменения параметров теплоносителя реакторной установки (РУ) и атмосферы контейнмента струя из разрыва воздействует на окружающие место разрыва трубопроводы, арматуру, строительные и другие конструкции. В результате этого образуются посторонние частицы, так называемый дебрис, характеристики и свойства которого во многом зависят от места и величины разрыва. Дебрис образуется вследствие разрушения:

- теплоизоляции на аварийном трубопроводе;
- теплоизоляции на трубопроводах в зоне воздействия струи из разрыва;
- металлизированных и лакокрасочных покрытий (ЛКП);
- бетонных строительных конструкций и т.д.

На рис. 1 показано разрушение теплоизоляции при разрыве трубопровода DN 60 (DN – номинальный диаметр трубы) с параметрами первого контура РУ в экспериментах, проведенных во ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» по договору с АО «Атомэнергопроект» [5].

На рис. 1 г хорошо виден волокнистый дебрис, образовавшийся при разрушении теплоизоляционного слоя, разбросанный по большому пространству.

В процессе многократной циркуляции раствор борной кислоты (РБК) в смеси с теплоносителем смывает и транспортирует латентный (постоянно присутствующий в здании) и образовавшийся в процессе аварии дебрис в приямки. Поскольку наличие дебриса может отрицательно влиять на работу оборудования САОЗ и теплообмен в активной зоне, в приямках необходимо устанавливать фильтры.

Первоначально РБК подается в реакторную установку из баков запаса (см. рис. 2 а), гидроемкости проливаются по достижении давления в первом контуре ниже уставки их срабатывания.

По мере исчерпания первоначального запаса САОЗ переходят на рециркуляцию (см. рис. 2 б). Контур циркуляции САОЗ: приямок – фильтр САОЗ – теплообменник САОЗ – насосы САОЗ – реакторная установка (реактор) – разрыв – приямок. Аналогично происходит питание спринклерной системы.

Бак запаса РБК может располагаться как за пределами контейнмента (проекты с ВВЭР-1000 и др.) – рис. 2, так и непосредственно в нём (проект АЭС-2006 с ВВЭР-1200) рис. 3.



a)

б)



Рис. 1 – Разрушение теплоизоляции типа волокнистая некомплектная тепловая изоляция (ВНТИ) высокоэнергетической струей воды на стенде Д1 ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»:

- (а) мишень до эксперимента;
- (б) вид на мишень в момент разрыва теплоизоляционного покрытия;
- (в) мишень после эксперимента;
- (г) вид на опорную раму с мишенью после эксперимента



 а – начальный момент аварии с потерей теплоносителя; б – этап длительного расхолаживания аварийного энергоблока с рециркуляцией РБК

1 – приямок, 2 – фильтр САОЗ, 3 – теплообменник САОЗ, 4 – насос САОЗ высокого давления, 5 – насос САОЗ низкого давления, 6 – реакторная установка, 7 – место разрыва, 8 – насос спринклерной системы, 9 – форсунки спринклерной системы, 10 – клапан, 11 – клапан, 12 – бак запаса РБК, (гидроемкости САОЗ на рисунках не показаны)





В [8] и ряде других работ отмечалось, что перенос баков запаса РБК в контейнмент и совмещение с функциями приямков позволяет существенно упростить схему подачи воды в РУ от САОЗ, решить проблему отказа открытия/закрытия арматуры приямков (клапаны поз. 10 и 11 на рис. 2) при переходе на рециркуляцию и реализовать возврат в баки РБК, попавшего в пространство контейнмента из течи или вследствие работы спринклерной системы.

При проектировании фильтра, кроме требований со стороны оборудования САОЗ и активной зоны необходимо учитывать, что по мере фильтрации при многократной циркуляции раствора на фильтрующей поверхности создается дебрисный слой, являющийся более тонким фильтром по сравнению с исходной очищающей поверхностью. Этот слой состоит из непрошедшего фильтр волокна. По мере циркуляции дебрисный слой уплотняется за счет улавливания им мелких частиц краски, разрушенных цинковых покрытий, коллоидных частиц и других загрязнителей. Таким образом со временем эффективность фильтра возрастает, причем чем толще и плотнее дебрисный слой, тем выше эффективность фильтра. С другой стороны, чем толще и плотнее дебрисный слой, тем выше его гидравлическое сопротивление, и если потеря давления на фильтрующем слое превысит уровень раствора над фильтром, внутри фильтра начнется дегазация (кавитация), то эффективная фильтрующая поверхность станет меньше конструктивной. Дальнейший рост сопротивления дебрисного слоя может привести и к кавитации насосов САОЗ.

Таким образом, выбор величины фильтрующей поверхности представляет собой оптимизационную задачу, которая может быть решена только с проведением экспериментального исследования. Оптимизационным параметром при этом является отношение массы дебриса к единице площади фильтрующей поверхности. Для фильтра САОЗ, выполненного в соответствии с [9], эта величина составляет  $\approx 1.7$  кг/м<sup>2</sup>. Соответственно, если известна масса исходного дебриса, транспортируемого потоком раствора к фильтру, то определить фильтрующую поверхность достаточно легко. Очевидно, что фильтрующая поверхность должна быть рассчитана на максимально возможное количество дебриса, т.е. должны быть определены место и диаметр разрыва, при котором разрушения теплоизоляции, лакокрасочных и антикоррозионных покрытий будут максимальны.

Задача нахождения координат точки максимального выхода дебриса может быть решена на основании анализа источников воздействия. Для этого необходимо провести перебор всевозможных мест разрывов высокоэнергетических трубопроводов и для каждого из них рассчитать объем теплоизоляции, антикоррозионных и лакокрасочных покрытий, попавших в зону воздействия, т.е. применяется сканирующий алгоритм. В этом случае целесообразно использование сферической модели разрушения, когда все, что попадает в сферу радиуса  $R_{ZOI} = K_{ZOI} \cdot D_{DREAK}$ , разрушается в степени, определенной коэффициентом  $K_{ZOI}$ :

- *К*<sub>*ZOI</sub> коэффициент* зоны воздействия;</sub>
- *D<sub>DREAK</sub>* диаметр разорвавшейся трубы.

Коэффициент зоны воздействия  $K_{ZOI}$  зависит от конструкции теплоизоляции и для применяемых типов приведен в таблице, где n – доля выхода дебриса при разрушении теплоизоляции в зависимости от радиуса зоны воздействия. Для отражающей металлической теплоизоляции (ОМТИ) и волокнистой некомплектной тепловой изоляции (ВНТИ) коэффициенты зоны воздействия определены в работе [10], для блочной съемной тепловой изоляции (БСТИ) приводится по данным ОКБ «ГИДРОПРЕСС» [6].

#### Таблица

Тип теплоизоляции	Коэффициент зоны воздействия <sup>*</sup> <i>K<sub>ZOI</sub></i>	Доля выхода дебриса <i>n</i> , %
	0 - 2.0	100
Отражающая металлическая	больше 2.0	0
	0 – 2.3	100
	2.3 - 4.2	37
Блочная съёмная	4.2 - 6.1	22
	6.1 - 8.0	7
	больше 8.0	0
D	0 - 17.0	100
Волокнистая некомплектная	больше 17.0	0

#### Коэффициенты зоны воздействия для различных типов теплоизоляционных конструкций

\*Для лакокрасочных и антикоррозионных покрытий коэффициент  $K_{ZOI}$  принимается равным 10 [7].

Применение сканирующего алгоритма осуществляется применением равномерного разбиения исследуемой трассы высокоэнергетического трубопровода с заданным шагом. В каждую точку разбиения помещается сфера соответствующего радиуса, если теплоизолированные элементы захватываются сферической областью воздействия, то они попадают в выборку. Для элементов, попавших в выборку, вычисляются интегральные характеристики (объём и/или масса). Автоматическое перемещение зоны воздействия (сферического фильтра) в 3D модели помещений контейнмента позволяет в режиме реального времени провести последовательное «сканирование» трассы трубопровода и определить координаты точки, разрыв в которой приводит к наихудшим последствиям с точки зрения выхода дебриса. Для анализа случаев неполного попадания детали в зону разрушения дополнительно рассматриваются координаты концов. Все прямые участки труб проходят проверку на предмет принадлежности точек концов А и В к внутренности сферы воздействия по той же формуле шара. Если одна из точек попадает в сферу, а другая нет, то для этого отрезка АВ решается задача по поиску точки пересечения.

Для каждой выборки происходит подсчет количества арматуры, в него входящей, и выполняется вычисление объема теплоизоляции для каждой арматуры ( $V_{anv}$ ).

Общий объем теплоизоляции  $V_{\text{общ}}$  для трубопровода определяется как сумма объема теплоизоляции на участках трубопровода V и объема теплоизоляции арматуры трубопровода  $V_{\text{арм}}$ :

$$V_{\rm obilit} = V + V_{\rm apm}$$

Данный подход является наглядным и достаточно прост с точки зрения автоматизации выполнения вычислений.

Строительные конструкции (стены, перекрытия) выполняют зонирование контейнмента и локализуют последствия от воздействия истечения теплоносителя первого контура. В боксах парогенераторов наибольшие последствия формируются при разрыве главного циркуляционного трубопровода DN 850. В этих зонах на выход теплоизоляции существенное влияние оказывают внутренние строительные конструкции. Таким образом, место разрыва с прогнозируемым наибольшим выходом дебриса будет расположено вблизи приварки главных циркуляционных трубопроводов к корпусу реакторной установки или коллекторам парогенераторов. Зона воздействия на теплоизоляционные конструкции типа ВНТИ при разрыве главного циркуляционного трубопровода приведена на рис. 4.

В этой области критериями для выбора места разрыва являются:

- прямое соединение трубы с первым контуром;
- максимальный DN трубы;
- расположение строительных перегородок;
- плотность расположения близлежащих трубопроводов с теплоизоляцией.



Рис. 4 – Зона воздействия на теплоизоляционные конструкции типа ВНТИ при разрыве главного циркуляционного трубопровода:

(1) – место разрыва трубопровода; (2) – предельный радиус зоны воздействия на ВНТИ

На практике возникает необходимость поиска наибольшего выхода дебриса в случае разрыва не только трубопровода DN 850, но и трубопроводов меньшего диаметра. Однако, учитывая, что объем сферы зоны воздействия пропорционален диаметру разрушенного трубопровода в третьей степени, наибольшее воздействие и, соответственно, наибольший выход изоляции возникает при разрыве главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ). При разрыве дыхательного трубопровода DN 346 объем зоны воздействия составляет менее 7 % от зоны воздействия, возникающей при разрыве ГЦТ. С учетом неравномерной по объему компоновки трубопроводов, выход дебриса при разрыве трубопроводов DN 300, DN 346 возрастает до 20 % от DN 850 (см. рис. 5).



Рис. 5 – Относительный выход дебриса:



Расчеты показывают, что если все технологические трубопроводы покрыты ВНТИ, то выход волокна составит до 125 м<sup>3</sup>, что отвечает массе более 4700 кг дебриса. Сделать фильтр на такое количество волокна практически невозможно. Соответственно требуется принятие дополнительных мер по снижению выхода дебриса и уменьшению нагрузки на фильтр, а именно:

- создать условия для осаждения дебриса при его транспортировании до фильтра;
- оптимизировать конструкцию теплоизоляции с целью уменьшения объема формируемого дебриса.

Выполнение первого предложенного мероприятия возможно при размещении бакаприямка непосредственно в контейнменте и использовании его в качестве гравитационного отстойника. При этом бак-приямок должен быть спроектирован таким образом, чтобы он обеспечивал возможность максимального осаждения составляющих дебриса на его дно до попадания охлаждающей воды с дебрисом на фильтр.

Второе мероприятие обеспечивается максимально возможным использованием ОМТИ, в которой отсутствует волокнистый наполнитель. Например, в зарубежных проектах АЭС (Южной Кореи) в контейнменте ВНТИ не применяется, она полностью заменена ОМТИ [11]. Можно рассмотреть варианты частичной замены ВНТИ на ОМТИ или БСТИ на трубопроводах, вносящих значительный вклад в формирование дебриса. Как правило, это трубопроводы больших диаметров. Возможен вариант усиления конструкции ВНТИ с целью снижения величины коэффициента зоны воздействия.

Расчеты показывают, что если принять следующий компромиссный вариант выполнения теплоизоляционных конструкций:

- для технологических трубопроводов DN менее 100 мм ВНТИ;
- для технологических трубопроводов DN 100 и более ОМТИ;
- для первого контура (DN 850) и оборудования РУ БСТИ,

то выход волокна составит до 32 м<sup>3</sup>, что соответствует 854 кг дебриса.

По сравнению с вышеуказанным выходом дебриса при использовании для технологических трубопроводов только ВНТИ, количество дебриса снизилось в 4 раза.

Для данного варианта выполнения теплоизоляционных конструкций была разработана и экспериментально обоснована система фильтрации, состоящая из ступени гравитационного осаждения, сформированной в баке-приямке, и фильтра с цилиндрическими щелевыми элементами [12].

Результаты экспериментов по обоснованию фильтра, проведенные во АО «ВНИИГ им. Б.В. Веденеева» по заказу АО «Атомэнергопроект» [13], показали, что эффективность фильтрации составляет 97–99 %, в том числе доля гравитационного осаждения составляет 74–76 %.

#### Заключение

Проведенные расчетные оценки и экспериментальные исследования показывают принципиальное влияние выбора типа и конструкции теплоизоляции на количество формирующегося дебриса и, следовательно, на эффективность и надежность работы системы аварийного водяного охлаждения АЭС с ВВЭР. На основании приведенного обзора можно сделать следующие выводы и рекомендации по проведению оптимизации выбора типа и конструкции теплоизоляции.

- 1. Фильтр САОЗ играет важную роль в обеспечении безопасности, поскольку определят надежную работу оборудования САОЗ при авариях с потерей теплоносителя.
- 2. Для правильного выбора фильтрующей поверхности необходимо знать количество дебриса и пути его транспортировки от места возникновения до фильтра.
- 3. Количество дебриса, образующегося в результате разрыва трубопровода, зависит от диаметра разорвавшегося трубопровода, а также от локальной компоновки трубопроводов и теплоизоляции в окрестности места разрыва.
- 4. Необходимо оптимизировать использование волокнистой теплоизоляции на трубопроводах различных диаметров. Усиление конструкции ВНТИ также можно рассматривать как возможный способ снижения количества, образующегося при аварии дебриса.

#### Conclusions

- 1. ECCS sump strainer plays an important role in safety assurance because it is responsible for reliable operation of ECCS equipment in loss-of-coolant accidents.
- 2. Knowledge of debris amounts and paths of debris transport from the generation location to the strainer is required for the right choice of the filtering surface size.
- 3. The amount of debris generated by an accident such as a pipeline break depends on the break size and layout of pipelines and thermal insulation around the break location.
- 4. The design of fibrous thermal insulation for different diameter pipes should be improved. Also, reinforcement of the fibrous thermal insulation structure can be considered as a possible method to reduce the amounts of debris generated by loss-of-coolant accidents.

#### Литература

- 1. IAEA (1996). Defence in Depth in Nuclear Safety, INSAG-10. Vienna: IAEA.
- 2. НП-006-16. Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности блока атомной станции с реактором типа ВВЭР.

- 3. НП-082-07. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций.
- 4. НП-010-16. Правила устройства и эксплуатации локализующих систем безопасности атомных станций.
- 5. Источники и виды дебриса, образующегося при аварии с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР / И.А. Магола, В.О. Кухтевич, Н.А. Осмаков, Л.А. Матюшев, Е.Л. Шамрай, А.Г. Митрюхин, А.Г. Ефимов, В.К. Маликов, Т.Б. Черный, М.В. Девяткин // Атомная энергия. 2022. Т. 133, № 3. С. 156–164.
- Стребнев А.Н. Разработка металлической тепловой изоляции для оборудования и трубопроводов РУ ВВЭР Бюллетень основных научно-технических работ АО ОКБ «Гидропресс» / А.Н. Стребнев, В.А. Гаврилин: электронное издание. – Подольск: АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2022.
- 7. NRC Staff Review Guidance Regarding Generic Letter 2004-02 «Closure in the Area of Coatings Evaluation», March 2008.
- Особенности концепции безопасности проекта АЭС-2006 на площадке ЛАЭС-2 / Онуфриенко С.В., Безлепкин В.В., Молчанов А.В. [и др.] // Тяжелое машиностроение. – 2008. – № 2. – С. 6–10.
- 9. Устройство защиты приямков в аварийной системе охлаждения водо-водяного ядерного реактора, фильтрующий модуль устройства защиты приямков: патент 2686684 С1 / В.В. Безлепкин, А.И. Курчевский, В.О. Кухтевич, Л.А. Матюшев, А.Г. Митрюхин, опубликовано: 30.04.2019. – Бюл. № 13.
- Topical Report NEI 04-07. Pressurized Water Reactor Sump Performance Evaluation Methodology. Revision 0, December 2004, Volume 1 and 2, by the Nuclear Energy Institute (volume 2, table 3–2 Revised Damage Pressures and Corresponding Volume-Equivalent Spherical ZOI Radii).
- 11. APR1400-E-A-T(NR)-13001-P. APR1400 Design Features to Address GSI-191 Technical Report, Revision A, May 2013.
- 12. Бак для фильтрации и сбора мусора / Л.А. Матюшев, А.Г. Митрюхин, Е.Л. Шамрай, К.Ю. Коробейников: патент РФ № 2778712 С1, опубликовано: 23.08.2022. Бюл. № 24.
- Экспериментальное обоснование фильтров баков-приямков проекта АЭС-2006 / И.А. Магола, Л.А. Матюшев, Е.Л. Шамрай, А.Г. Митрюхин, П.А. Арсеньев, В.Б. Штильман // Атомная энергия. 2022. Т. 133, № 3. С. 164–170.

УДК 621.039.526; 621.039.586

### Взаимодействие расплава тяжёлого жидкометаллического теплоносителя с поступающей в его объём водой Часть 2. Анализ и обобщение

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

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

#### Аннотация

Работа посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия тяжёлого жидкометаллического теплоносителя (расплав свинцово-висмутовой эвтектики) с водой применительно к условиям аварии с разрывом трубки парогенератора. В данной части работы представлены анализ размерности параметров процесса, получена система безразмерных комплексов, выполнен корреляционный анализ и предложена зависимость, удовлетворительно описывающая экспериментальные данные.

Ключевые слова: тяжёлый жидкометаллический теплоноситель, расплав свинцововисмутовой эвтектики, взаимодействие расплава с водой, анализ размерности, корреляционный анализ, обобщающая зависимость.

## Interaction of molten heavy liquid metal coolant with inflow water Part 2. Analysis and correlation

A.A. Sulatsky, V.I. Almjashev, E.V. Shevchenko, S.A. Vitol, E.V. Krushinov, S.Yu. Kotova, E.K. Kalyago, V.R. Bulygin, E.B. Shuvaeva, A.V. Timchuk, E. M. Belyaeva

FSUE "Alexandrov NITI", Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

#### Abstract

The paper describes an experimental study of the interaction between heavy liquid metal coolant (molten lead-bismuth eutectic) and water in the steam generator tube rupture accident. This part of the study presents an analysis of the dimensionality of the process parameters. A system of dimensionless groups is obtained. A correlation analysis is performed and a correlation is proposed which adequately describes experimental data.

**Key words**: heavy liquid metal coolant, molten lead-bismuth eutectic, interaction of melt with water, dimensionality analysis, correlation analysis, correlation.

#### Введение

Одним из возможных сценариев аварии реакторной установки (РУ) с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) является разрыв трубопроводов второго контура теплоносителя и поступление воды в объём расплава теплоносителя первого контура. При этом вследствие большого по сравнению с температурой кипения воды перегрева металлического расплава поверхность воды на интерфейсе с расплавом окружена паровой плёнкой. Случайные, вызванные каким-либо возмущением, пульсации давления могут спровоцировать локальные или более пространственно протяженные разрушения или утончения паровой плёнки и диспергирование водяных фракций. Это, в свою очередь, приводит к увеличению площади теплообмена воды с жидким металлом, вызывающему ещё большую парогенерацию с возможностью инициирования так называемого обращённого парового взрыва [1].

В настоящее время отсутствуют достаточно обоснованные доказательства того, что при течи трубок парогенератора и проникновении воды в объём расплава ТЖМТ обязательно инициируется обращённый паровой взрыв. Однако нет достаточных оснований и для утверждения, что паровой взрыв в таких условиях невозможен. В ряде расчётно-теоретических работ [2÷4] делается вывод о том, что обращённый паровой взрыв маловероятен. Необходимо отметить, что существуют и экспериментальные работы, в которых подтверждается, что в условиях подачи воды (в жидкой фазе) в объём расплавленного свинца или свинцово-висмутовой эвтектики паровых взрывов не возникает [5, 6]. В данных работах были предложены и отрабатывались на действующих макетах технологии опреснения воды, генерации водорода и углубленной переработки нефтепродуктов при прямом контакте воды или жидких углеводородов с расплавом тяжёлого металла (Pb или Pb–Bi). Вода в макетах промышленных установок подавалась с постоянным малым расходом на дно большого объёма расплавленного металла. При этом паровых взрывов не наблюдалось. Однако условия подачи воды в расплав ТЖМТ в работах [5, 6] значительно отличаются от условий аварии РУ с разрывом трубок парогенератора. Поэтому вопрос о возможности инициирования парового взрыва при такой аварии остается открытым.

Кроме того следует учитывать, что даже при отсутствии парового взрыва взаимодействие воды с расплавом сопровождается всплеском давления, характеристики которого необходимо воспроизводить расчетными кодами, моделирующими теплогидравлические процессы в РУ.

Целью данной работы является:

- экспериментальная проверка возможности инициирования парового взрыва при поступлении воды под уровень расплава ТЖМТ;
- получение экспериментальных данных о динамике давления и температуры при вводе в расплав ТЖМТ порций воды заданной массы;
- обобщение экспериментальных данных и разработка теоретической модели взаимодействия расплава ТЖМТ с поступающей в его объём водой.

В опубликованной ранее первой части данной работы [7] были изложены описание экспериментальной установки, методика проведения эксперимента и первичные результаты экспериментального исследования. В данной, второй, части работы представлены результаты размерного и корреляционного анализа полученных экспериментальных данных.

#### Анализ размерности параметров процесса

Ранее во ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» было проведено экспериментальное исследование взаимодействия расплава ТЖМТ с водой, подаваемой в объём расплава. Подробное описание методики проведения экспериментов, экспериментальной установки и непосредственных результатов исследования приведены в [7]. Кратко методику проведения экспериментов можно изложить следующим образом. Расплав ТЖМТ наплавлялся и поддерживался при заданной температуре в герметичном объёме, верхняя часть которого изначально была заполнена воздухом (парогазовый или расширительный объём установки). Вода подавалась под уровень расплава порционно в количестве от 0.5 до 3 г в свинцовых ампулах с помощью стального штока через верхнюю крышку установки. Ампула разрушалась либо механически о донный рассекатель, либо расплавлялась. При этом регистрировалось повышение давления и температуры в парогазовом объёме в ходе взаимодействия воды с расплавом, а также изменение температуры расплава.

Ввиду того, что как визуальные, так и основанные на иных физических принципах контроль, наблюдение и измерение за локальными быстропротекающими процессами взаимодействия воды и образующегося водяного пара с расплавом металлического теплоносителя в экспериментальной установке [7] не производились, то обобщение полученных экспериментальных данных реально осуществить лишь на основе измеримых интегральных параметров процесса до взаимодействия (заданные условия или определяющие параметры) и после взаимодействия (определяемые параметры). На основании приведённых в [7] схемы экспериментальной установки и процедуры проведения экспериментов к определяющим параметрам можно отнести, следующие параметры процесса:

- масса воды в ампуле, вводимой в расплав (m<sub>w</sub>);
- температура воды в ампуле (Т<sub>w</sub>);
- объём воздуха в незаполненном водой пространстве ампулы (V<sub>2</sub>);
- глубина, на которой происходит разрушение ампулы (L);
- величина расширительного объёма установки перед вводом в расплав ампулы с водой (V<sub>e,0</sub>);
- начальное давление в расширительном объёме (Р<sub>0</sub>);
- начальная температура парогазовой среды в расширительном объёме установки (Т<sub>е 0</sub>);
- масса металлического расплава (m<sub>m</sub>);
- начальная температура расплава (Т<sub>то</sub>).

Отметим, что количество веществ, находящихся газообразной форме (для воды в виде перегретого пара), часто более удобно измерять не в единицах массы, а в единицах количества вещества – молях. Поэтому к списку параметров, определяющих процесс, добавим начальное количество молей газообразной среды в расширительном объёме ( $v_e$ ), количество молей воды ( $v_w$ ) и воздуха ( $v_a$ ) в ампуле.

Здесь под словом «начальный» подразумеваются параметры, имевшие место непосредственно перед вводом конкретной порции воды. Отметим, что расширительный объём установки (V<sub>e,0</sub>), начальное давление (P<sub>0</sub>), массу металлического расплава (m<sub>m</sub>) и температуру воды в ампуле (T<sub>w</sub>) можно считать фактически постоянными. Их величины приведены в [7].

К измеряемым определяемым параметрам процесса в проводимых экспериментах относятся:

- максимум избыточного давления после ввода воды в расплав, т.е. величина первого пика давления ΔР (разность давлений в момент пика давления и в начальный момент времени);
- максимальное значение температуры парогазовой среды в расширительном объёме установки после введения воды в расплав (T<sub>e.max</sub>);
- минимальное значение температуры металлического расплава после введения воды в расплав (T<sub>m.min</sub>).

Все приведённые выше параметры (как определяющие, так и определяемые) имеют исключительно или геометрический, или термодинамический характер. Тогда как кинетические (тепломассобменные) параметры полностью отсутствуют. В силу этого получить адекватные, т.е. верифицированные на экспериментальных данных, модели кинетики процесса невозможно. В этом случае, т.е., при отсутствии достоверных знаний о локальных тепломассобменных процессах, происходящих при взаимодействии воды при введении её в объём расплава металла (в нашем случае в расплав свинцово-висмутовой эвтектики), построение сложных матема-

тических моделей неизбежно будет иметь характер в значительной степени спекулятивный. Поэтому необходим подход, минимизирущий возможные артефакты математической модели, но позволяющий получить связи между интегральными параметрами процесса. Как известно, в подобной ситуации применимы классические методы, основанные на теории размерности, аналогиях и основных принципах (законах сохранения). Таким образом, можно сделать первое предположение – в обобщениях экспериментальных результатов не должны присутствовать параметры, относящиеся к тепломассобменным процессам, такие как коэффициенты тепло- и массообмена, переносные свойства сред и т.п., а лишь термодинамические параметры состояния системы перед взаимодействием и после него.

Сначала рассмотрим размерности параметров процесса, как определяющих, так и определяемых (общим количеством 15 шт.). При этом будем выражать размерности через 5 основных единиц измерения СИ (м, с, кг, К и моль):

$$\begin{split} - & [m_w] = [m_m] = \kappa \Gamma; \\ - & [\nu_e] = [\nu_w] = [\nu_a] = \text{MOAL}; \\ - & [T_w] = [T_{e,0}] = [T_{m,0}] = [T_{e,max}] = [T_{m,min}] = K; \\ - & [V_e] = [V_a] = M^3; \\ - & [L] = M; \\ - & [P_0] = [\Delta P] = \Pi a \equiv \kappa \Gamma / (M \cdot c^2). \end{split}$$

В этом случае 5 размерностей из 6 независимы друг от друга. Действительно, 1-я, 2-я и 3-я размерности параметров процесса (кг, моль и К) – линейно независимы друг от друга по определению, т.к. относятся основным единицам измерения СИ. 4-я и 5-я размерности ( $M^3$  и м, соответственно) – представляют собой степени ещё одной основной единицы измерения СИ – единицы длины. А 6-ю размерность ( $\Pi a = \kappa r/(m \cdot c^2)$ ) невозможно никоим образом составить из четырёх прочих размерностей, т.к. в ней присутствуют секунды – основная единица СИ, полностью отсутствующая в предыдущих четырёх размерностях. Т.е. 5 из 6 приведённых выше размерностей параметров интересующего нас процесса являются линейно независимыми.

Отметим, что к списку параметров процесса необходимо добавить термодинамические свойства веществ, участвующих в процессе:

- плотность металлического расплава (ρ<sub>m</sub>), плотность воздуха (ρ<sub>a</sub>), плотность воды (ρ<sub>w</sub>), водяного пара (ρ<sub>s</sub>) и начальная плотность среды в расширительном объёме (ρ<sub>e,0</sub>), имеющие размерность кг/м<sup>3</sup>;
- удельные на единицу массы теплоёмкости металлического расплава ( $c_m$ ), воздуха ( $c_s$ ), воды ( $c_w$ ) и водяного пара ( $c_s$ ), имеющие размерность Дж/(кг·K) =  $M^2/(c^2 \cdot K)$ ;
- удельное тепло парообразования воды (r) с размерностью Дж/кг =  $M^2/c^2$ .

Перечисленные свойства веществ (в количестве 10 шт.) увеличивают количество параметров процесса до 25 шт., при этом количество независимых размерностей остаётся по-прежнему равным 5.

Согласно  $\pi$ -теореме Бэкингема [8] из п размерных переменных (параметров) любого физического процесса с k линейно независимыми размерностями можно сконструировать n–k безразмерных комплексов. Таким образом, количество возможных безразмерных комплексов, которые можно образовать в рассматриваемой ситуации, равно 20 (= 25–5). Понятно, что при таком большом их количестве для получения адекватного, т.е. относительного малого, но достаточного количества безразмерных комплексов необходимо принять во внимание дополнительные соображения. Во-первых, учитывая малое по объёму содержание в ампуле с водой воздуха (от 0.7 до 3.6 см<sup>3</sup>, что соответствует содержанию по массе от 0.9 до 4.3 мг) влиянием воздуха на процесс можно полностью пренебречь. То есть, из списка определяющих параметров можно исключить объём воздуха в свинцовой ампуле ( $V_a$ ), плотность, удельную теплоёмкость и количество молей воздуха ( $\rho_a$ ,  $c_a$  и  $v_a$ , соответственно), что снижает количество параметров процесса до 21 (= 25–4).

На следующем шаге учтём, что глубина разрушения ампулы (L) важна, скорее всего, не сама по себе, а в виде лишь гидростатической добавки к давлению в расплаве в месте ввода в него воды:

$$\Delta P_{\rm hs} = \rho_{\rm m} g L \,, \tag{1}$$

где  $g = 9.81 \text{ м/c}^2$  – ускорение свободного падения.

Т.е. заменим один из параметров процесса на другой с размерностью Па ≡ кг/(м·с<sup>2</sup>), что не изменяет количество размерных параметров процесса – оно остаётся равным 21.

Далее обратим внимание на один из качественных выводов, сделанных в [7], а именно: на тот эмпирический факт, что экстремумы температур расплава и парогазовой среды в расширительном объёме существенно запаздывают от пика давления. Более того, эти две температуры даже не успевают заметно измениться к моменту достижения максимума давления. Причём в особой степени это относится к температуре расплава – она, в силу высокой тепловой инерции расплава, остаётся фактически постоянной. При этом наиболее «интересным» определяемым параметром процесса является именно величина пика давления ( $\Delta P$ ). На основании этого соображения и упомянутого выше фактического постоянства температур расплава и среды в расширительном объёме до достижения пика давления исключим два определяемых параметра процесса (T<sub>е,max</sub> и T<sub>m,min</sub>) из общего списка параметров. Кроме того, поскольку температура расплава остаётся фактически постоянной, из списка рассматриваемых величин можно исключить массу и свойства расплава: m<sub>m</sub>, c<sub>m</sub> и  $\rho_m$ . Отметим, однако, что плотность расплава ( $\rho_m$ ) была уже использована в определении гидростатической добавки давления  $\Delta P_{\rm hs}$ , т.е. она исключается из дальнейшего использования, но не из выражения (1). Т.е., количество размерных параметров процесса снижается до 16 (= 21-5). При этом температуру расплава Т<sub>т.0</sub> исключать из общего списка параметров не следует, т.к. пар, образовавшийся в глубине расплава, будет, скорее всего, термически близок к этой величине, особенно при малых массах вводимой в расплав воды и достаточно больших глубинах расплава. Более того, в данном анализе будем считать, что пар, поступающий в расширительный объём, имеет температуру расплава Т<sub>т.0</sub>.

На следующем шаге можно сократить количество параметров, относящихся к воде и образующемуся водяному пару, перейдя от температур к удельным на единицу массы энтальпиям, с размерностью Дж/кг =  $m^2/c^2$ . Можно ввести три характерных удельных энтальпии:

- $h_w(P_0, T_w)$  удельная энтальпия воды в ампуле при давлении в ней, равном  $P_0$ , и при начальной температуре воды  $T_w$ ;
- h<sub>0</sub>(P<sub>0</sub> + ΔP<sub>hs</sub>, T<sub>m,0</sub>) удельная энтальпия образующегося в объёме расплава пара в месте разрушения ампулы при начальном давлении P<sub>0</sub> + ΔP<sub>hs</sub> (т.е. в самом начале процесса) и при температуре расплава T<sub>m,0</sub>;
- $h_1(P_0 + \Delta P_{hs} + \Delta P, T_{m,0})$  удельная энтальпия образующегося в объёме расплава пара в месте разрушения ампулы в момент пика давления, т.е. при давлении  $P_0 + \Delta P_{hs} + \Delta P$  и при температуре расплава  $T_{m,0}$ .

В условиях эксперимента величины  $h_0$  и  $h_1$  меняются в узких пределах от  $3.0 \cdot 10^6$  до  $3.2 \cdot 10^6$  Дж/кг, величина  $h_w$  – постоянна и равна  $6.31 \cdot 10^4$  Дж/кг, что составляет  $\approx 2$  % от величин  $h_0$  и  $h_1$ .

Так как удельные энтальпии  $h_0$  и  $h_1$  на два порядка больше, чем  $h_w$ , то можно предположить, что от последней величины зависимость пика давления  $\Delta P$  будет не слишком существенной. Поэтому удельную энтальпию  $h_w$  исключим из общего списка. По этой же причине исключим из параметров задачи также плотность воды ( $\rho_w$ ), удельную теплоёмкость воды ( $c_w$ ) и удельное тепло парообразования (r). При этом массу введённой в расплав воды ( $m_w$ ) из этого списка исключать нельзя, т.к. это параметр процесса, от которого сильнее всего зависит величина пика давления  $\Delta P$  [7]. Кроме того, т.к. был осуществлён переход от температуры пара к удельным энтальпиям, то из списка параметров можно исключить удельную теплоёмкость пара ( $c_s$ ). Более того, так как известно термическое уравнение состояния водяного пара (в виде формулы или в виде компьютерной программы) и в числе параметров фигурируют два параметра (давление и температура), от которых однозначно зависит плотность водяного пара ( $\rho_s$ ), то из числа параметров процесса эту плотность также можно исключить.

Таким образом, в общий список параметров процесса введены 2 новые величины:  $h_0 u h_1$ , а исключены 6:  $T_w, \rho_w, c_w, r, \rho_s u c_s$ . Это привело к снижению количества размерных параметров процесса до 12 (= 16+2–6).

Априори можно предположить, что величина пика давления  $\Delta P$  как разность давлений в начальный и в конечный момент времени, должна зависеть не от абсолютных величин удельных энтальпий h<sub>1</sub> и h<sub>0</sub>, а от их разностей в конечный и начальный момент времени:

$$\Delta \mathbf{h} = \mathbf{h}_1 - \mathbf{h}_0 \,. \tag{2}$$

Переход от абсолютных величин удельных энтальпий к их разнице снижает количество размерных параметров процесса на единицу, до 11 (= 12–1).

Отметим также то, что величина пика давления  $\Delta P$  (разность давлений в начальный и в конечный момент времени) является сугубо положительной, тогда как разница удельных на единицу массы энтальпий  $h_1$  и  $h_0$ , вычисленных при одной и той же температуре ( $T_{m,0}$ ) и при давлениях  $P_0 + \Delta P_{hs} + \Delta P$  и  $P_0 + \Delta P_{hs}$ , соответственно, является величиной отрицательной (в условиях экспериментов [7] она меняется в пределах от -6.4 до -0.7 кДж/кг). Поэтому с практической точки зрения удобства использования от удельных на единицу массы энтальпий полезно перейти к удельным на единицу объёма величинам:  $h_{v1}$  и  $h_{v0}$ , разница которых:

$$\Delta \mathbf{h}_{\mathbf{v}} = \mathbf{h}_{\mathbf{v},1} - \mathbf{h}_{\mathbf{v},0} \tag{3}$$

– величина положительная (в условиях экспериментов [7] меняется от 0.37 до 2.41 МДж/м<sup>3</sup>). Более того, разница  $\Delta h_v$  имеет размерность Дж/м<sup>3</sup> = кг/(м·c<sup>2</sup>), что совпадает (в основных единицах измерения СИ) с размерностью давления Па = кг/(м·c<sup>2</sup>). Таким образом, одну и ту же размерность имеют 4 параметра процесса:  $P_0$ ,  $\Delta P_{bs}$ ,  $\Delta P$  и  $\Delta h_v$ .

Окончательный список размерных параметров процесса имеет вид: {m<sub>w</sub>, V<sub>e,0</sub>,  $\rho_{e,0}$ ,  $\nu_{w}$ ,  $\nu_{e}$ , T<sub>e,0</sub>, T<sub>m,0</sub>,  $\Delta h_v$ , P<sub>0</sub>,  $\Delta P_{hs}$ ,  $\Delta P$ }, т.е. 11 параметров. Тогда в соответствии с  $\pi$ -теоремой Бэкингема при наличии 5-и основных линейно независимых размерностей {кг, моль, м, с, K} можно образовать 6 (= 11–5) определяющих процесс безразмерных комплексов. Первые три параметра приведённого выше списка имеют размерности кг, м<sup>3</sup> и кг/м<sup>3</sup>, соответственно. Поэтому из них легко скомбинировать 1-й безразмерный комплекс:

$$M = m_w / [\rho_{e,0}(P_0, T_{e,0}) V_{e,0}], \qquad (4)$$

имеющий смысл безразмерной массы воды, введённой в расплав. Причём можно (в соответствии с выводами [7]) ожидать, что от этого параметра будет иметь место наиболее сильная зависимость. Четвёртый и пятый параметры вышеприведённого списка — это мольное количество вводимой в систему воды и начальное мольное количество газовой среды в расширительном объёме, соответственно, поэтому из них легко скомбинировать второй определяющий комплекс — безразмерное мольное количество вводимой в расплав воды:

$$N = v_w / v_e . (5)$$

Шестой и седьмой параметры вышеприведённого списка – это температуры, поэтому они образуют третий определяющий комплекс – безразмерную температуру расплава:

$$\Theta = T_{m.0} / T_{e,0} . \tag{6}$$

Отметим, что, так как в числителе и знаменателе выражения (6) стоят не разности температур, а сами температуры, то их величины должны быть приведены в градусах абсолютной температуры (в градусах Кельвина).

Последние четыре параметра вышеприведённого списка имеют в основных единицах измерения СИ одну и ту же размерность – кг/(м· $c^2$ ), поэтому существует вариативность конструирования из них трёх возможных безразмерных комплексов. В данной работе был выбран следующий вариант:

$$\Sigma = \Delta P_{\rm hs} / P_0 , \qquad (7)$$

$$H = \Delta h_{v} / \Delta P = \left[ h_{v,1} \left( P_{0} + \Delta P_{hs} + \Delta P, T_{m,0} \right) - h_{v,0} \left( P_{0} + \Delta P_{hs}, T_{m,0} \right) \right] / \Delta P , \qquad (8)$$

$$\Pi = \Delta \mathbf{P} / \mathbf{P}_0 \,. \tag{9}$$

Комплекс Σ составлен из определяющих процесс размерных параметров, поэтому и сам безразмерный комплекс имеет такой же характер, т.е., это аргумент процесса. Смысл его прост – это отношение гидростатической добавки к давлению к начальной величине давления в расширительном объёме.

В комплексах Н и П присутствует определяемый параметр процесса –  $\Delta P$ , поэтому оба комплекса имеют смысл определяемых, т.е., функций процесса. Рассмотрим сначала смысл комплекса Н. При стремлении к нулю массы вводимой в расплав воды  $m_w$  (соответственно, при стремлении к тому же пределу изменения удельной энтальпии  $\Delta h_v$  и прироста давления  $\Delta P$ ) и при условии математической непрерывности термодинамических параметров водяного пара, т.е., при отсутствии скачков уплотнения (ударных волн) комплекс Н должен стремиться к частной производной удельной энтальпии пара по давлению при постоянной температуре ( $T_{m_0}$ ):

$$H = \frac{\Delta h_{v}}{\Delta P} \xrightarrow{m_{w} \to 0} \left( \frac{\partial h_{v}}{\partial P} \right)_{T},$$
(10)

т.е., определяться исключительно свойствами пара (частной производной от его калорической функции состояния) и зависеть исключительно от температуры и давления, но не от прочих параметров процесса взаимодействия воды с расплавом. При конечной величине массы вводимой в расплав воды комплекс Н будет, естественно, зависеть от процесса (хотя бы в силу изменения давления), но при отсутствии скачков уплотнения его величина всё равно будет достаточно близка к значению указанной производной при некоем среднем (эффективном) давлении процесса. Т.е., безразмерный комплекс Н может служить неким индикатором наличия или отсутствия скачкообразных (взрывных) явлений при взаимодействии воды и расплава металла.

Комплекс П представляет собой отношение величины повышения давления в экспериментальной установке в момент пика давления к начальному давлению.

Можно ограничиться полученными безразмерными комплексами, полностью определяющими процесс взаимодействия воды с расплавом тяжёлого металла. Но для последующего анализа, не связанного с теорией размерности, и ввиду объективно имеющегося значительного произвола выбора вида безразмерных комплексов дополним их список ещё одним определяющим комплексом:

$$\mathbf{K} = \mathbf{N}\Theta = \left(\nu_w T_{m,0}\right) / \left(\nu_e T_{e,0}\right). \tag{11}$$

Подобный вид безразмерного комплекса обусловлен тем, что в уравнениях состояния идеальных газов в их правых частях мольное количество вещества и абсолютная температура присутствуют в виде произведения. Таким образом, определяющий процесс безразмерный комплекс К представляет собой отношение правых частей уравнений состояния образующегося водяного пара (считая его идеальным газом) и среды в расширительном объёме, находящейся в начальных условиях.

Необходимо оговорить одну неопределённость, характерную для экспериментов [7]. После завершения процесса взаимодействия воды с расплавом шток, на котором крепилась ампула с водой, полностью извлекался из рабочего объёма экспериментальной установки для закрепления на нём новой ампулы. При этом через открывшееся отверстие в верхней крышке экспериментальной установки (через которое вводится шток) в расширительный объём поступал холодный и более плотный, чем горячий пар, воздух, который за время замены ампулы мог частично или полностью заместить образовавшуюся в расширительном объёме установки атмосферу из более лёгкого перегретого водяного пара. Поэтому в дальнейшей обработке рассматриваются 2 крайних случая начального состояния в расширительном объёме: 1) воздушная атмосфера и 2) паровая атмосфера. В последнем случае свойства водяного пара, как находящегося изначально в расширительном объёме, так и образующегося из вводимой в расплав воды, рассчитывались с помощью стандартизированных свойств воды и водяного пара [9], т.е. водяной пар не считался идеальным газом.

Получив 7 приведённых выше безразмерных комплексов, полностью определяющих (в случае экспериментов [7]) процесс взаимодействия воды с расплавом тяжёлого металла, можно приступить к обработке полученных экспериментальных данных. В табл. 1 представлены величины безразмерных комплексов, рассчитанных на основании значений параметров, характеризующих условия проведения экспериментов, и первичных экспериментальных данных, представленых в [7]. Кроме того, по указанной выше причине возможной связи комплекса H с частной производной удельной на единицу объёма энтальпии пара по давлению при постоян-

ной температуре в табл. 1 для каждой из ампул были приведены  $\left(\frac{\partial h_v}{\partial P}\right)_T$  – значения указанной

частной производной в интервале давлений (на глубине разрушения ампулы) от  $P_0 + \Delta P_{hs}$  до  $P_0 + \Delta P_{hs} + \Delta P$  и при температуре расплава  $T_{m,0}$ , рассчитанные с использованием свойств воды и водяного пара [9].

По результатам расчёта безразмерных комплексов следует отметить, что водяной пар в расширительном объёме (относительно холодный по сравнению с паром, образующимся из вводимой в расплав воды) был достаточно близок по параметрам, присутствующим в термическом уравнении состояния, к идеальному газу. Об этом свидетельствует почти полное совпадение значений N, рассчитанных в указанных выше двух крайних случаях (см. столбцы 6 и 7 табл. 1), т.е. безразмерных мольных количеств среды, находящейся в расширительном объёме (точнее – обратной величины), как и должно быть для идеальных газов, занимающих одинаковый объём при одинаковой температуре. Вследствие почти полного совпадения рассчитанных
в двух крайних случаях значений N имеет место такое же почти полное совпадение комплексов К для этих двух крайних случаев. Таким образом, можно констатировать, что водяной пар в условиях экспериментов [7] по параметрам, связывающим плотность с давлением и температурой, состояния близок к идеальному газу, и при разработке теоретических моделей для описания соответствующих свойств водяного пара можно использовать термическое уравнения идеального газа.

Отметим также, что полное совпадение значений, приведённых в столбцах 5 и 7 не случайно, т.к. в ситуации, когда в образующемся паровом пузыре и в расширительном объёме находится одно и тоже вещество (водяной пар), то отношения масс М (столбец 5) в точности равно отношению мольных количеств N (столбец 7) в этих объёмах.

Таблица I

Безразмерные комплексы, определяющие процесс взаимодействия воды с расплавом тяжёлого металла

		П, 1		14	0.35 (±0.03)	0.81 (±0.07)	0.52 (±0.02)	0.32 (±0.02)	$0.56\ (\pm 0.02)$	$1.00 (\pm 0.08)$	$0.77~(\pm 0.05)$	$0.77~(\pm 0.04)$	$0.77~(\pm 0.03)$	$1.72 (\pm 0.05)$	$1.24 (\pm 0.05)$	$1.86 (\pm 0.04)$	$1.51 (\pm 0.03)$	2.02 (±0.05)	$1.51 (\pm 0.01)$	$1.40 (\pm 0.02)$	$0.45 \ (\pm 0.05)$	$0.40 \ (\pm 0.05)$	$0.34~(\pm 0.05)$	$0.81 \ (\pm 0.05)$	$0.77 (\pm 0.05)$
		Η, 1	13	$11.1 (\pm 0.9)$	$11.3 (\pm 0.9)$	$11.4 \ (\pm 0.4)$	$11.4~(\pm 0.9)$	$11.4 (\pm 0.5)$	$11.6 (\pm 0.9)$	$11.7 (\pm 0.7)$	$11.7 (\pm 0.6)$	$11.7~(\pm 0.4)$	$11.7~(\pm 0.3)$	$11.7 (\pm 0.3)$	$11.7~(\pm 0.2)$	$11.7 (\pm 0.3)$	$11.7~(\pm 0.3)$	$11.7~(\pm 0.1)$	$11.7 (\pm 0.2)$	12 (±1)	12 (±1)	12 (±2)	$12.2~(\pm 0.8)$	$12.4(\pm 0.8)$	
		$\left( rac{\partial \mathbf{h}_{\mathrm{v}}}{2\mathbf{n}}  ight), 1$	12	$11.086 (\pm 0.004)$	$11.25 (\pm 0.01)$	$11.377 (\pm 0.008)$	$11.373 (\pm 0.005)$	$11.353 (\pm 0.009)$	$11.60 \ (\pm 0.02)$	$11.71 (\pm 0.02)$	$11.74 \ (\pm 0.02)$	$11.70 \ (\pm 0.01)$	$11.72 (\pm 0.03)$	$11.67 (\pm 0.02)$	$11.72 (\pm 0.04)$	$11.69 \ (\pm 0.03)$	$11.69 \ (\pm 0.04)$	$11.68 \ (\pm 0.03)$	$11.71 \ (\pm 0.03)$	$12.47~(\pm 0.01)$	$12.36 (\pm 0.01)$	$12.43 (\pm 0.01)$	$12.24 \ (\pm 0.02)$	$12.35 (\pm 0.02)$	
[10, 11]		Σ, 1	11	0.25	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.25	0.30	0.30	0.25	0.30	0.25	0.25	0.25	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	
В-03 [7] и	1	la b Tejibhom ëme	водяной пар	10	0.54	0.53	0.52	0.52	0.52	1.01	1.00	0.99	1.00	2.00	2.01	2.00	3.01	3.01	3.01	3.00	0.45	0.46	0.45	0.93	0.92
В-01 и СІ	K,	сре расширт обт	Ta3 <sup>1)</sup>	6	0.54	0.53	0.52	0.52	0.52	1.02	1.00	1.00	1.00	2.00	2.02	2.00	3.02	3.02	3.02	3.01	0.45	0.46	0.46	0.94	0.92
ентах С]		Θ, 1	8	1.14	1.13	1.12	1.13	1.17	1.12	1.10	1.10	1.10	1.10	1.11	1.11	1.12	1.12	1.13	1.14	1.08	1.05	1.03	1.05	1.04	
эксперим	1	ца в тельном ёме	водяной пар	7	0.48	0.47	0.47	0.46	0.45	0.90	0.91	0.90	0.91	1.81	1.80	1.80	2.69	2.69	2.67	2.62	0.42	0.44	0.44	0.89	0.89
В	Ň	сре; расшири объ	$\Gamma a3^{1)}$	6	0.48	0.47	0.47	0.46	0.45	0.90	0.91	0.90	0.91	1.82	1.81	1.81	2.70	2.70	2.68	2.63	0.42	0.44	0.44	0.89	0.89
	1	да в тельном ёме водяной	водяной пар	5	0.48	0.47	0.47	0.46	0.45	0.90	0.91	0.90	0.91	1.81	1.80	1.80	2.69	2.69	2.67	2.62	0.42	0.44	0.44	0.89	0.89
	M	сре, расшири объ	ra3 <sup>1)</sup>	4	0.30	0.29	0.29	0.29	0.28	0.56	0.57	0.56	0.57	1.13	1.12	1.12	1.68	1.68	1.66	1.63	0.26	0.27	0.27	0.55	0.55
		№ ампулы		3	-	2	3	4	5	9	7	8	6	10	11	12	13	14	15	16	1	2	3	4	S
	Tecr 2							CB-01										CB-03							
		$\tilde{\Sigma}_{\bar{0}}$		1	-	2	3	4	5	6	٢	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21

П, 1				0.72 (±0.03)	0.92 (±0.09)	$0.84~(\pm 0.04)$	$1.03 (\pm 0.07)$	0.82 (±0.06)	0.72 (±0.07)	$0.74~(\pm 0.06)$	$1.19 (\pm 0.07)$	$1.17 (\pm 0.05)$	$1.31 (\pm 0.06)$	$1.37 (\pm 0.04)$	$1.91 (\pm 0.08)$	$1.18 (\pm 0.05)$	$1.0 (\pm 0.1)$	$0.81 (\pm 0.04)$	$1.11 (\pm 0.07)$	$1.84 (\pm 0.03)$	16.7 (±0.2)
	H, 1 13 12.3 $(\pm 0.5)$						12.2 (±0.8)	12 (±1)	12 (±1)	12 (±1)	12.5 (±0.7)	12.3 (±0.6)	$12.4 (\pm 0.6)$	12.4 (±0.4)	12.4 (±0.5)	12.4 (±0.5)	12 (±2)	$11.6 (\pm 0.6)$	$11.6 (\pm 0.8)$	$11.6 (\pm 0.2)$	$10.7~(\pm 0.1)$
	$\left( rac{\partial \mathbf{h}_{\mathrm{v}}}{2\mathbf{n}}  ight), 1$	( OF )T	12	12.30 (±0.02)	12.32 (±0.03)	$12.29 (\pm 0.02)$	$12.25 (\pm 0.03)$	12.32 (±0.02)	12.41 (±0.02)	12.41 (±0.02)	$12.46 (\pm 0.04)$	12.28 (±0.03)	12.37 (±0.04)	$12.45 (\pm 0.04)$	$12.45 (\pm 0.06)$	12.41 (±0.04)	11.62 (±0.02)	$11.58 (\pm 0.01)$	$11.57 (\pm 0.02)$	$11.65 (\pm 0.03)$	$10.7~(\pm 0.2)$
	$\Sigma, 1$		11	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.10
1	(а в тельном ёме	водяной пар	10	0.93	1.39	1.39	1.40	1.39	1.37	1.37	1.82	1.86	1.84	2.73	2.74	2.74	1.01	1.52	2.03	3.03	I
K,	сред расшири объё	ra3 <sup>1)</sup>	6	0.93	1.39	1.40	1.40	1.39	1.37	1.37	1.83	1.86	1.85	2.74	2.75	2.76	1.01	1.53	2.04	3.03	10.2
	Θ, 1		8	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.02	1.02	1.02	1.04	1.03	1.02	1.02	1.02	1.05	1.03	1.04	1.03	1.41
1	(а в тельном ёме	водяной пар	7	0.89	1.34	1.34	1.34	1.33	1.34	1.34	1.79	1.79	1.79	2.68	2.68	2.68	0.96	1.47	1.96	2.95	I
N,	сред расшири объё	ra3 <sup>1)</sup>	9	0.89	1.34	1.34	1.34	1.34	1.35	1.35	1.79	1.79	1.79	2.69	2.69	2.69	0.97	1.48	1.97	2.95	7.28
1	ца в тельном ёме	водяной пар	5	0.89	1.34	1.34	1.34	1.33	1.34	1.34	1.79	1.79	1.79	2.68	2.68	2.68	0.96	1.47	1.96	2.95	I
M,	сред расшири объ	ra3 <sup>1)</sup>	4	0.55	0.83	0.83	0.83	0.83	0.84	0.84	1.11	1.11	1.11	1.67	1.67	1.67	0.60	0.92	1.22	1.84	3.28
	N <u>e</u> amitynai		ю	9	7	8	6	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22 <sup>2)</sup>	23	flask no.15
	Тест	2					_				CB-03			_						[10]	
	$\mathcal{N}_{\underline{0}}$		1	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34 35 35 36 37 38 38					39

Примечания:

1. Для экспериментов [7] CB-01 и CB-03 газ – воздух, для экспериментов [10, 11] – аргон.

В последнем случае в расширительном объёме перед вводом в расплав воды гарантированно находится только аргон.

2. Данные, полученные на ампуле № 21 эксперимента CB-03, не обрабатывались и в таблице не приводятся по причине, указанной в [7].

Далее, как следует из табл. 1, производная  $\left(\frac{\partial h_v}{\partial P}\right)_T$  в интервалах изменения давления в экспериментах меняется чрезвычайно слабо. И, как показывают расчёты с использованием свойств воды и водяного пара [9], эта производная зависит фактически только от температуры. Кроме того, из табл. 1 видно, что вычисляемая по свойствам водяного пара средняя величина производной  $\left(\frac{\partial h_v}{\partial P}\right)_T$  для каждой использованной ампулы с водой и безразмерный комплекс H, в который входит экспериментально определяемая величина  $\Delta P$ , совпадают с высокой точностью. Это свидетельствует о том, что при взаимодействии воды и расплава ТЖМТ не наблюдалось (покрайней мере, в экспериментах [7]) эффектов нарушения непрерывности термодинамических параметров (скачков уплотнения, ударных волн), а значит и взрывных процессов (обращённых паровых взрывов), всегда сопровождающихся подобными явлениями.

Помимо экспериментальных данных [7] в табл. 1 представлена экспериментальная точка из работ [10, 11]. К сожалению, в данных работах не были приведены первичные экспериментальные данные, а лишь только результаты их обработки по методике, отличающейся от представленной выше. Для обработки по вышеизложенной методике из работ [10, 11] удалось использовать только одну точку (саse no.15 по терминологии, принятой в [10], или саse no.3 – в [11]), для которой были представлены первичные экспериментальные данные в виде графиков зависимостей давления и температур от времени. Численные значения параметров экспериментальной установки [10, 11] и измеренных в экспериментальной установке и методике проведения экспериментов [10, 11], которые концептуально не отличались от использованных в экспериментах [7]. Схема установки [10, 11] показана на рис. 1.

Из приведённой схемы ясно, что отличия от экспериментальной установки НИТИ носят в основном количественный характер: больший масштаб установки [10, 11], и, соответственно, бо́льшие масса расплава и величина расширительного объёма, существенно большее количество термопар, датчиков давления, наличие тензодатчиков, более сложная многослойная конструкция и т.п. Фактический единственный параметр, по которому экспериментальная установка НИТИ превосходила установку, использованную в [10, 11], – глубина расплава и, соответственно, глубина, на которой происходило поступление воды в расплав: 255...300 мм в установке НИТИ против 120 (±20) мм в установке [10, 11].

Из качественных различий экспериментальных установок необходимо упомянуть, во-первых, автоматизированный механический ввод ампулы с водой в расплав вместо принятого в установке НИТИ ручного. Во-вторых, материал самой ампулы (по терминологии, принятой в [10, 11] – flask, т.е. колбы) – стекло вместо использованного в экспериментах НИТИ свинца. И главным качественным отличием экспериментов [10, 11] от экспериментов НИТИ является применение металлического расплава иного состава (Bi 60 % – Sn 20 % – In 20 %), более легкоплавкого, чем свинцово-висмутовая эвтектика в экспериментах НИТИ [7].

Методика проведения экспериментов [10, 11], точнее, испытаний одиночной ампулы с водой, принципиально не отличалась от методики, принятой в экспериментах НИТИ. Отметим, что указанная сложность и, необходимо признать, совершенство конструкции экспериментальной установки [10, 11], по сравнению установкой «Расплав-CB1», неизбежно должно было привести к тому, что испытание одной ампулы с водой превращалось в отдельный самостоятельный эксперимент с достаточно долгим процессом подготовки к нему. Тогда как в каждом из двух экспериментов, проведённых в НИТИ, испытывалось в среднем по два десятка ампул.



Рис. 1 – Экспериментальная установка [10, 11] (взято из [1]):

FM – воздушный расходомер, PSn и PTn – датчики давления, SGn – тензодатчики, TGn – термопары, расположенные в парогазовой атмосфере реакционного сосуда, TFn – термопары, измеряющие температуру воды в ампуле (в колбе), TMn – термопары, расположенные в расплаве, а также на внешней стенке реакционного сосуда в области локализации расплава, TWn – термопары, расположенные на внешней стенке реакционного сосуда

Приведём значения некоторых параметров экспериментальной установки (рис. 1) [10, 11] и колбы с водой № 15, для которой в [10] приведены результаты эксперимента, и измеренных параметров процесса: масса расплава ( $m_m$ ) – 18.3 кг, величина расширительного объёма, заполненного перед вводом в расплав колбы с водой аргоном ( $V_{e,0}$ ) – 6·10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup>, начальное давление в расширительном объёме ( $P_0$ ) – 10<sup>5</sup> Па, начальная температура газа в расширительном объёме ( $T_{e,0}$ ) – 389 K, объём стеклянной колбы ( $V_a$ ) – 50 см<sup>3</sup>, масса воды в колбе ( $m_w$ ) – 20 г, температура воды в колбе ( $T_w$ ) – 330 K (57 °C), начальная температура расплава ( $T_{m,0}$ ) – 675 K. Величина избыточного давления в максимуме ( $\Delta P$ ) составила 1690 (±20) кПа.

Необходимо отметить, что, несмотря на небольшую глубину разрушения колбы с водой в экспериментах [10, 11], образовавшийся при этом пар во время всплытия сквозь расплав успел прогреться практически до температуры расплава – для колбы № 15 недогрев пара составил всего ≈ 20 К. С учётом того, что в экспериментах [7] глубина расплава была в 2...2.5 раза больше,

а массы вводимой в расплав воды меньше на порядок, можно сделать вывод о том, что, как и было предположено выше, в экспериментах [7] парообразование происходило фактически в изотермических условиях (при температуре расплава  $T_{m,0}$ ).

Отметим, что, как видно из табл. 1 (совпадение значений в столбцах 12 и 13), сделанный выше вывод об отсутствии взрывных процессов вполне применим и для экспериментальной точки [10, 11].

Из данных, представленных в табл. 1, также видно, что в экспериментах [7] (CB-01, CB-03) [7] определяющие параметры  $\Theta$  (безразмерная температура расплава) и  $\Sigma$  (безразмерный гидростатический перепад на глубине парообразования) меняются в чрезвычайно узких пределах: 1.09 ± 0.08 (±7 %) и 0.275 ± 0.025 (±9 %), соответственно. Диапазоны изменения безразмерных комплексов M, N, K и П более широкие.

#### Корреляционный анализ

Для выявления возможных связей полученных безразмерных комплексов был проведён корреляционный анализ с использованием линейных коэффициентов корреляции (коэффициентов корреляции Пирсона) [12], вычисляемых следующим образом:

$$\mathbf{r}_{XY} = \sum_{i=1}^{n} \left[ \left( \mathbf{X}_{i} - \overline{\mathbf{X}} \right) \cdot \left( \mathbf{Y}_{i} - \overline{\mathbf{Y}} \right) \right] / \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left( \mathbf{X}_{i} - \overline{\mathbf{X}} \right)^{2} \cdot \left( \mathbf{Y}_{i} - \overline{\mathbf{Y}} \right)^{2}} , \qquad (12)$$

где  $\overline{X} = (1/n) \sum_{i=1}^{n} X_i$ ,  $\overline{Y} = (1/n) \sum_{i=1}^{n} Y_i$  – средние значения выборок из n элементов параметров X и Y, предположительно связанных друг с другом причинно-следственным образом.

Величина коэффициента корреляции  $r_{XY}$  в соответствии с определением (12) может меняться в пределах от -1 до +1. Причём, чем ближе абсолютная величина коэффициента  $r_{XY}$  к 1, тем сильнее статистическая связь этих двух параметров и тем вероятнее наличие существенной причинно-следственной связи. Чем ближе абсолютная величина коэффициента к 0, тем слабее их статистическая связь и тем менее вероятна связь причинно-следственная.

Так как выше была установлена однозначная связь (фактическое совпадение) безразмерного комплекса Н и  $\left(\frac{\partial h_v}{\partial P}\right)_T$  – величины частной производной удельной на единицу объёма энтальпии

пара по давлению при постоянной температуре, равной температуре расплава (T<sub>m,0</sub>), то из регрессионного анализа эта производная исключена. Для комплекса Н был посчитан только коэффициент корреляции с П – вторым определяемым комплексом процесса. В расчётах были использованы данные, приведённые в табл. 1. В табл. 2 приведены абсолютные величины полученных коэффициентов корреляции по результатам экспериментов в двух вариантах. Первый вариант – в расчёте коэффициентов корреляции использовались только экспериментальные данные CB-01, CB-03 [7]. Второй вариант – к расчётам была добавлена единственная доступная экспериментальная точка из работ [10, 11]. Сразу отметим, что расчёты для двух крайних случаев начальной атмосферы в расширительном объёме (либо газ, либо пар) приводят к фактическому совпадению коэффициентов корреляции (различия имеются только в третьей значащей цифре). Единственное значимое различие наблюдается для коэффициента корреляции между определяющим комплексом М и определяемым П (см. примечание под табл. 2).

Таблица 2

				(Х, П)			
		(М, П)	(N, П)	(Θ, Π)	(К, П)	(Σ, Π)	(Н, П)
r <sub>XY</sub>	Данные НИТИ [7] (всего 38 точек)	0.87	0.87	0.03	0.88	0.12	0.003
	Данные НИТИ [7] и [10, 11] (всего 39 точек)	0.72 (0.49)*)	0.85	0.75	0.92	0.81	0.42

Абсолютные значения линейных коэффициентов корреляции |r<sub>XY</sub>| между парами безразмерных комплексов (X, П)

Примечание: \*) – первое значение соответствует газовой начальной атмосфере в расширительном объёме (воздух – для опытов [7] и аргон – для [10, 11]), значение в скобках – начальная паровая атмосфера в опытах [7] и аргон в опытах [10, 11].

Во-первых, отметим, что статистическая связь между двумя определяемыми комплексами Н и П фактически отсутствует (см. последний столбец табл. 2). Особенно явно это прослеживается при рассмотрении только экспериментальных данных [7]. Впрочем, и при добавлении экспериментальной точки [10, 11] статистическая связь между комплексами Н и П остаётся самой слабой из всех рассмотренных. Таким образом, несмотря на то, что в определениях этих комплексов (формулы (8), (9)) наличествует одна и та же величина максимума избыточного давления ( $\Delta P$ ), они описывают два разных физических подпроцесса интегрального процесса взаимодействия воды с расплавом тяжёлого металла: комплекс Н – изменение термодинамических свойств генерируемого водяного пара (как индикатор наличия эффектов нарушения непрерывности), а комплекс П – изменение давления в конкретной экспериментальной установке при вводе в неё определённого количества воды.

Из табл. 2 видно, что наиболее сильная статистическая связь определяемого комплекса П наблюдается с определяющим комплексом К. Несколько более слабая статистическая связь у комплекса П имеется с комплексами N и M. Т.к., эти комплексы математически однозначно связаны, то математическую зависимость комплекса П будем искать только от комплекса К, с которым корреляция наиболее сильна.

На рис. 2 показана зависимость комплекса П от комплекса К. Экспериментальные точки экспериментов [7] описываются степенной зависимостью:

$$\Pi = 0.76 \,\mathrm{K}^{0.72} \,. \tag{13}$$

Стандартное отклонение расчётных значений от экспериментальных составляет ±22 %, а за пределы ±35 % выпадает 5 точек из 38 экспериментальных точек [7]. Отметим, что в формуле (13) отсутствует зависимость от состава начальной атмосферы в расширительном объёме – различия значений коэффициента и степени в формуле (11) при изменении состава атмосферы возникают лишь в третьей значащей цифре.



1, 2 –данные [7]: 1 – эксперимент CB-01, 2 – CB-03; 3 – зависимость (13) Рис. 2 – Зависимость комплекса П от безразмерного комплекса К

Точка эксперимента [10] на рис. 2 не приведена в силу того, что она лежит в четыре раза выше значения, предсказываемого корреляцией (13), что явно указывает на не универсальный характер этой зависимости.

Обсудим возможное влияние на величину максимума избыточного давления  $\Delta P$  от величины гидростатической добавки к давлению  $\Delta P_{hs}$ , зависящей от глубины, на которой происходит генерация пара (в безразмерных обозначениях – зависимости комплекса П от комплекса  $\Sigma$ ). Априори понятно, что, чем больше глубина места парогенерации, тем больше на этой глубине локальное давление, тем меньше удельный объём образующегося пара и, следовательно, тем меньше пик давления в расширительном объёме. В математическом пределе бесконечной глубины величина  $\Delta P$  должна стремиться к нулю ( $\Pi \xrightarrow{\Sigma \to +\infty} \to 0$ ).

Как указывалось выше, в экспериментах [7] диапазон изменения безразмерного комплекса  $\Sigma$  достаточно узок – от 0.25 до 0.30. При этом в экспериментах [10, 11] этот комплекс заметно меньше и равен  $\approx 0.1$ . Поэтому можно оценить качественное влияние гидростатики на величину пика давления  $\Delta P$  (и комплекса П). Для этого построим график зависимости величины (П/ П<sub>13</sub>) от  $\Sigma$ , где П<sub>(13)</sub> – величина, рассчитываемая по формуле (13). Искомая зависимость приведена на рис. 3.



2 – данные [7]: 1 – эксперимент CB-01, 2 – CB-03; 3 – данные [10, 11]
 Рис. 3 – Зависимость (П/П<sub>13</sub>) от безразмерного комплекса Σ

Из рис. 3 видно, что априорные предположения о качественном виде зависимости вполне подтверждаются (на рисунке пунктиром показана приблизительная обратно пропорциональная зависимость). Однако, определение корректной количественной зависимости на столь скудном статистическом материале не представляется возможным.

### Заключение

В данной статье, представляющей вторую часть работы:

- на основании анализа размерности получена система из 7 безразмерных комплексов (5 определяющих комплексов и 2 определяемых), полностью описывающих процесс взаимодействия воды и расплава ТЖМТ;
- показано, что водяной пар в условиях экспериментов НИТИ [7] по параметрам термического уравнения состояния достаточно близок к идеальному газу, и при разработке теоретических моделей для описания соответствующих свойств водяного пара можно использовать термическое уравнение идеального газа;
- подтверждено отсутствие в экспериментах [7] явлений с нарушением непрерывности термодинамических параметров (скачков уплотнения, ударных волн), т.е., взрывных процессов (обращённых паровых взрывов);
- на основании проведённого корреляционного анализа подтверждено выявленное в [7] определяющее влияние на изменение давления при взаимодействии воды с расплавом ТЖМТ количества введённой в расплав воды;
- получена корреляция, обобщающая в безразмерной форме результаты экспериментов [7].

В статье, посвященной третьей, заключительной, части работы будет представлена разработанная математическая модель процесса взаимодействия воды с расплавом ТЖМТ.

### Conclusions

This paper (Part 2 of the study):

- presents a system of 7 dimensionless groups (5 determining groups and 2 determined groups) obtained from the dimensionality analysis and fully describing the process of interaction between water and molten heavy liquid metal coolant;
- shows that, under NITI experiment conditions [7], water vapor in terms of thermal equation of state is sufficiently close to ideal gas and, therefore, the thermal equation of state for ideal gas can be used to construct theoretical models for describing water vapor properties;
- confirms the absence of thermodynamic parameter discontinuities (compression waves, shock waves), i.e. explosive processes (steam explosions induced by water injection), in experiments [7];
- based on correlation analysis, demonstrates the determining effect of injected water amount on pressure change as water interacts with molten heavy liquid metal coolant;
- proposes a correlation that integrates experiment results in the dimensionless form [7].

Part 3 of the paper will present a mathematical model of interaction between water and molten heavy liquid metal coolant.

### Литература

- 1. *Мелихов В.И.* Гидродинамика и теплофизика паровых взрывов / В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, С.Е. Якуш. М.: ИПМех РАН, 2020. 276 с.
- SIMMER-III and SIMMER-IV Safety Code Development for Reactors with Transmutation Capability / W. Maschek [et al.] // CD-ROM Proceedings of Mathematics and Computation, Supercomputing, Reactor Physics and Biological Applications. – Avignon, France, 2005. – P. 14.
- Maschek W. Some New Results on the SGTR Problem in EFIT / W. Maschek, S. Wang, M. Flad // EUROTRANS WP5.1. – Brussels, 2006. – P. 23.
- 4. Леонов В.Н. Расчетно-экспериментальные исследования процессов, сопровождающих аварию «межконтурная неплотность парогенератора» и рекомендации к схемным и конструктивным решениям реакторной установки со свинцовым теплоносителем: дис. ... канд. техн. наук (05.14.03). Нижний Новгород: НГТУ, 2012. 217 с.
- 5. Применение теплоносителей Рb и Pb-Bi в новых технологиях переработки твердых, жидких и газообразных сред / В.В. Ульянов, В.А. Гулевский, П.Н. Мартынов [и др.] // Изв. ВУЗов. Ядерная энергетика. 2012. №4. С. 102–109.
- Современные вопросы и задачи технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей (свинец, свинец-висмут) / П.Н. Мартынов, Р.Ш. Асхадуллин, Ю.И. Орлов [и др.] // Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях (ТЖМТ-2013): доклад на IV науч.-практическая конф. Обнинск. 23–26 сентября 2013.

- Взаимодействие расплава тяжёлого жидкометаллического теплоносителя с поступающей в его объём водой. Часть 1. Эксперимент / А.А. Сулацкий, В.И. Альмяшев, Е.В. Шевченко, С.А. Витоль, Е.В. Крушинов, С.Ю. Котова, Е.К. Каляго, В.Р. Булыгин, Е.Б. Шуваева, А.В. Тимчук, Е.М. Беляева, М.В. Девяткин // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2023. – 1(31). – С. 46–59.
- 8. *Крейт* Ф. Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэк. М.: Мир, 1983. 512 с.
- 9. International Association for the Properties of Water and Steam, IAPWS R6-95(2018), Revised Release on the IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use (2018).
- An experimental study on local fuel-coolant interactions by delivering water into a simulated fuel pool / S. Cheng, K. Matsuda, M. Isozaki M. [et al.] // Nuclear Engineering and Design. V. 275. 2014. P. 133–141.
- The effect of coolant quantity on local fuel-coolant interactions in a molten pool / S. Cheng, K. Matsuda, M. Isozaki M. [et al.] // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – V. 75. – P. 20–25.
- 12. *Елисеева И.И*. Общая теория статистики: учебник / И.И. Елисеева, М.М. Юзбашев. М.: Финансы и Статистика, 2002. 480 с.

# ПРАВИЛА ПОДАЧИ МАТЕРИАЛОВ

## для публикации в рецензируемом научно-техническом сборнике «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок»

Все материалы, предназначенные для опубликования в рецензируемом научно-техническом сборнике, должны направляться авторами в электронном виде на адрес foton@niti.ru (с пометкой: в редакцию научно-технического сборника).

В комплект материалов, направляемых в редакцию Сборника, должны входить в электронном виде:

- текст статьи, оформленной в соответствии с установленными редколлегией Требованиями к оформлению и содержанию статей, публикуемых в научнотехническом сборнике «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок»;
- копии документов о возможности открытого опубликования статьи в сборнике «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок»;
- «Лицензионный договор», заполненный и подписанный всеми соавторами.

Файлы с шаблоном лицензионного договора (license\_agreement.doc) и требованиями к оформлению статей (Требования к оформлению.doc) размещены на сайте www.niti.ru в рубрике «Научно-технический сборник».

# ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ И СОДЕРЖАНИЮ СТАТЕЙ,

## публикуемых в научно-техническом сборнике «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок»

Сборник публикует статьи и краткие сообщения о результатах теоретических и экспериментальных исследований и разработок, выполненных при создании, отработке и эксплуатации объектов с ЯЭУ на всём их жизненном цикле.

В Сборник принимаются статьи для опубликования основных результатов диссертационных работ на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, соответствующие тематике Сборника.

Все статьи, публикуемые в Сборнике, проходят рецензирование. Подготовка рецензий на поступающие для публикации в Сборнике статьи осуществляется независимыми рецензентами на условиях анонимности (для авторов).

Ответственный секретарь редколлегии Сборника организует процедуру рецензирования статей, а также взаимодействие между авторами и рецензентами в соответствии с «Положением об институте рецензирования статей научно-технического Сборника», утверждённым главным редактором и размещенным на интернет сайте <u>www.niti.ru</u> в рубрике «Научно-технический сборник «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок». После получения рецензии на статью редакция направляет автору перечень замечаний рецензента, которые должны быть учтены автором при подготовке окончательной версии статьи. После получения замечаний рецензента откорректированный автором вариант статьи направляется в редакцию Сборника в максимально короткие сроки (не более 14 календарных дней). Подготовленный и утвержденный к публикации вариант статьи редакция направляет автору для окончательного согласования.

## Тематические рубрики научно-технического сборника

- 1. Стендовые испытания транспортных ЯЭУ.
- 2. Исследование динамики и создание технологий испытаний объектов с ЯЭУ.
- 3. Моделирование и исследование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов объектов с ЯЭУ.
- 4. Технологии создания систем контроля и управления (СКУ) ЯЭУ.
- 5. Химические технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, радиохимические и материаловедческие исследования.
- 6. Исследование процессов при тяжёлых авариях на объектах атомной энергетики.
- 7. Влияние объектов атомной энергетики на окружающую среду.
- 8. Обеспечение экспериментальных исследований.
- 9. Дискуссионные вопросы развития атомной энергетики.
- 10. Информационные сообщения.

### 1. Условия опубликования статей

1.1 Представляемые для публикации статьи на русском языке должны обладать научно-практической актуальностью и новизной и содержать:

- индекс универсальной десятичной классификации для научных работ (УДК) приводится вместе с аббревиатурой УДК в верхнем левом углу первой страницы (классификационный индекс УДК должен подробно отражать тематику статьи);
- заглавие (название статьи на русском и английском языках, с указанием фамилий, и инициалов авторов, наименований и адресов организаций, в которых выполнялась работа);
- аннотацию на русском и английском языках (краткое описание цели и задачи проведенного исследования, а также возможности практического применения полученных результатов, что поможет читателю быстрее уяснить суть обсуждаемой проблемы); объём аннотации — 5–10 предложений;
- ключевые слова на русском и английском языках (7-10 слов);
- основной текст (включая введение в тематику проблемы или постановку задачи, описание методики исследования или экспериментальной части, описание основных результатов исследования, полученных автором с характеристикой их новизны и научно-практической актуальности, выводы);
- список литературы, оформленный в соответствии с правилами оформления, представленными ниже.
- 1.2 Соответствовать правилам оформления.

#### 2. Правила оформления статей

2.1 Научная статья должна иметь ограниченный объём (7–12) страниц формата А4 книжной ориентации, включая таблицы, иллюстрации и список литературы (статьи большего объёма могут быть приняты к публикации по согласованию с Редакцией).

2.2 При форматировании текста статей необходимо придерживаться следующих требований по оформлению:

- все поля по 20 мм.;
- формат страницы А4 (книжной ориентации);
- шрифт основного текста Times New Roman, размер шрифта 12 пт.;
- название статьи пишется полужирным шрифтом (Строчные, как в предложениях), размер шрифта — 16 пт.;
- наименование подразделов статьи пишется полужирным шрифтом (Строчные, как в предложениях) размер шрифта — 14 пт.;
- межстрочный интервал одинарный;
- обязателен отступ первой строки абзаца;
- выравнивание текста по ширине;
- автоматическая расстановка переносов включена;
- нумерация страниц отсутствует;
- рисунки и таблицы располагаются по тексту;
- в подписях к рисункам пишется «Рис.», при ссылке на рисунок в тексте рис.
- таблицы должны иметь название и нумероваться в порядке упоминания их в тексте арабскими цифрами; название таблицы после номера таблицы; все графы в таблице должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями, а цифровой материал должен четко соответствовать строкам; сокращения слов в таблицах не допускается; при наличии в тексте одной таблицы с заголовком слово Таблица не пишется, и таблица не нумеруется;
- формулы набираются в редакторе формул «MS Equation», ссылки на формулу приводятся в круглых скобках — (1);
- в качестве разделителя в десятичных дробях используется точка;
- расшифровка физической величины (и других обозначений, например, аббревиатур) должна приводиться при первом упоминании их в тексте;
- количество рисунков, включая их разбивку на подрисунки, не должно превышать 10–12 для оригинальной статьи, 3 — для краткого сообщения;
- авторам следует избегать повторения одних и тех же данных на рисунках, в таблицах и тексте;
- ссылки на литературу приводятся в квадратных скобках [1];

2.3 При подготовке иллюстраций и графических файлов необходимо придерживаться следующих рекомендаций.

2.3.1 Иллюстрации не должны иметь разрешение ниже 150 dpi. Рекомендуемое разрешение:

- Halftones (color or grayscale) 300 dpi.
- Bitmap 600–1200 dpi.

- 2.3.2 Иллюстрации не должны быть менее 6 см по ширине (расположение на одну колонку) и более 17 см (на полосу).
- 2.3.3 Графики, диаграммы, схемы желательно готовить в векторных графических редакторах (CorelDRAW, Adobe Illustrator) и предоставлять в формате той программы, в которой они были выполнены (\*.cdr, \*.ai), или в формате \*.eps. Для остальных иллюстраций желательны форматы \*.tif, \*.jpg.
- 2.3.4 Фотографии желательно предоставлять в двух вариантах. Первый соответствующий оригиналу со всеми надписями и обозначениями; второй чистый (без текста, обозначений и пр.). Желательный формат файлов (\*.tif), (\*.jpg).

2.4 В конце статьи помещается Список литературы. Библиографические записи в списке литературы оформляют согласно требованиями ГОСТ Р 7.0.100 –2018 и ГОСТ Р 7.05–2008.

2.5 Библиографические записи в списке литературы приводятся в той же последовательности, что и упоминаются в тексте статьи, или в алфавитном порядке (по фамилиям авторов или заглавиям документов. Библиографические записи произведений авторов-однофамильцев располагают в алфавите их инициалов.

2.6 При наличии в списке литературы на других языках, кроме русского, образуется дополнительный алфавитный ряд.

2.7 Оформленные в соответствии с указанными выше правилами материалы статей пересылаются в редколлегию сборника в виде файла в формате «Microsoft Word». Размещаемые в статье рисунки (схемы, графики), фотографии прилагаются дополнительно в виде отдельных файлов формата \*.tif, \*.jpg. с требуемым разрешением.

2.8 Совместно с материалами статьи в редакцию авторами высылаются электронные копии документов о возможности открытого опубликования данных материалов в виде статьи в сборнике «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок».

2.9 При возникновении вопросов по подаче материала и его оформлению следует обращаться в редакцию научно-технического сборника.

2.10 Адрес редакции: 188540 Сосновый Бор, Ленинградская область, Копорское шоссе д. 72, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», телефон: 8 (813-69) 6-01-43, факс: 8 (813-69) 2-36-72; E-mail: foton@niti.ru — с пометкой «В редакцию научно-технического сборника».

Выпускающий редактор: Крюков Ю.В.

Дизайн и вёрстка: Куликова Е.В.

Подписано в печать 10.08.2023. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать цифровая. Формат 60×90/8. Усл.-печ. л.11,75. Заказ 49567. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Типографии "Грейт Принт" 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Швецова, д. 12, корп. 2, лит. А, пом. 6-Н, ком. 6 www.great-print.ru

Тел.: +7(812) 622-00-22