#### 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 (28) 2022

Сосновый Бор

#### ТЕХНОЛОГИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

#### Периодический рецензируемый научно-технический сборник

№ 2 (28) 2022

Издается с 2015 года

Сборник распространяется на территории Российской Федерации

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

#### ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

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

**А.Я. Благовещенский,** доктор технических наук, профессор, ВУНЦ-ВМФ «Военно-морская академия»,

Военно-морской политехнический институт, Санкт-Петербург.

**В.И. Бурсук**, доктор технических наук, директор центра сервиса АО «Концерн «НПО «Аврора», Санкт-Петербург.

В.С. Гурский, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

**В.В. Гусаров**, чл.-корр. РАН, доктор химических наук, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург.

А.Л. Дмитриев, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

Ю.Э. Зевацкий, доктор химических наук, АО «Новбытхим», Санкт-Петербург.

А.В. Ельшин, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

С.С. Ермаков, доктор химических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет.

А.А. Ефимов, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

**Ю.В. Крюков,** (ответственный секретарь), кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

Ю.А. Мигров, доктор технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

Л.Н. Москвин, доктор химических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет.

**Е.Б. Панкина,** кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

С.А. Петров, доктор технических наук, НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ, Санкт-Петербург.

О.Ю. Пыхтеев, кандидат химических наук, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

О.В. Родинков, доктор химических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет.

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

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

А.А. Сулацкий, (ответственный редактор), кандидат технических наук, ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова».

**В.Б. Хабенский,** доктор технических наук, профессор, ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор.

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

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций Свидетельство о регистрации СМИ: ПИ № ФС77–58865 от 28.07.14.

Адрес редакции: 188540 Россия, Ленинградская область, г. Сосновый Бор, Копорское шоссе 72, ФЯО ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова».

Телефон: 8 (813-69) 6-05-46 — отв. секретарь редколлегии. Факс: 8 (813-69) 2-36-72. E-mail: foton@niti.ru; Интернет сайт: www.niti.ru.

#### Подписной индекс 43300 в объединенном каталоге «Пресса России».

Научно-технический сборник включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальности 05.14.03 — Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации (технические науки).

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

#### FEDERAL NUCLEAR ORGANIZATION

Federal state unitary enterprise "Alexandrov Research Institute of Technology"

# NUCLEAR PROPULSION REACTOR PLANTS. LIFE CYCLE MANAGEMENT TECHNOLOGIES

COLLECTION OF PAPERS

№ 2 (28) 2022

Sosnovy Bor

#### NUCLEAR PROPULSION REACTOR PLANTS. LIFE CYCLE MANAGEMENT TECHNOLOGIES

#### Collection of papers. Periodical edition

№ 2 (28) 2022

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.

A.Ya. Blagoveshchensky, Dr. Sc. (Engineering), Professor, Naval Polytechnic Institute of the Naval Academy

(Military Educational and Research Center) in Saint Petersburg.

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), the Ioffe Institute of RAS,

Saint Petersburg.

A.L. Dmitriev, Alexandrov Research Institute of Technology, Sosnovy Bor.

A.A. Efimov, Dr. Sc. (Chemistry), 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, Alexandrov Research Institute of Technology, Sosnovy Bor.

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.Yu. Pyhteyev, Cand. Sc. (Chemistry), Alexandrov Research Institute of Technology, Sosnovy Bor.

O.V. Rodinkov, Dr. Sc. (Chemistry), Professor, Saint Petersburg State University.

O.B. Samoilov, Dr. Sc. (Engineering), 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, Executive Editor, 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  $\Pi II$  No.  $\Phi C77-58865$ , 28.07.14.

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

FNO FSUE "Alexandrov NITI", 72 Koporskoye shosse, Sosnovy Bor, Leningrad region, 188540 Russia Tel.: 8 (813 69) 6 05 46 — Assistant Editor.

Fax: 8 (813 69) 2 36 72. E-mail: foton@niti.ru; Website: www.niti.ru.

#### Subscription number in the "Russian Press" aggregate catalogue is 43300.

This Collection of Papers is included in the List of peer-reviewed scientific editions accredited for publishing results of doctoral and candidate degree thesis studies in discipline 05.14.03 — Nuclear power installations: design, operation, and decommissioning (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 (28) 2022

Предисловие главного редактора	7
К юбилею ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»	
А.Я. Благовещенский	
К 60-летию НИТИ им. А.П. Александрова	8
Информационные сообщения	
Поздравление В.Л. Столяровой с избранием академиком РАН	7
Поздравление Заслуженному деятелю науки Российской Федерации, доктору технических наук, профессору В.Б. Хабенскому с 85-летием со дня рождения	8
Поздравление члену-корреспонденту РАН, доктору химических наук,	
профессору В.В. Гусарову с 70-летием со дня рождения	.2
Моделирование и исследование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов объектов с ЯЗ	<b>)</b> }
А.В. Вакарин, В.С. Грановский, А.С. Грицай, С.Н. Румянцев	
Моделирование пространственной гидродинамики в активной зоне реакторной установки стенда КМ-1	6
В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, В.Г. Коротаев, А.Н. Кузнецов	
Моделирование потвэльного энерговыделения в нестационарных режимах ВВЭР 3	8
В.Г. Артемов, Н.С. Нерсесян	
Сопоставление многогрупповой и малогрупповой нейтронно-физических моделей малогабаритного газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов 4	9
Химические технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, радиохимические и материаловедческие исследования	
С.Н. Орлов, А.А. Змитродан, Е.Е. Щербаков	
Расчетное моделирование концентрации аммиака и газообразных продуктов в теплоносителе первого контура транспортных ЯЭУ	1
Исследование процессов при авариях на объектах атомной энергетики	
$A.A.$ Фиськов, $H.A.$ Рышкевич, $T.\Gamma.$ Варданидзе, $A.A.$ Дитц	
Исследование характеристик рекомбинаторов водорода типа РВК 500/1000 и обоснование их работоспособности в условиях проектных и запроектных аварий 6	9
Информация для авторов	
Правила подачи материалов в редакцию	9

#### **Contents**

#### Issue № 2 (28) 2022

Chief editor's foreword
On the occasion of FSUE "Alexandrov NITI" anniversary
A. Ya. Blagoveshchensky
On the occasion of 60th anniversary of FSUE "Alexandrov NITI"
Information messages
Congratulations to V.L. Stolyarova, member of the Editorial Board, on being elected as an Academician of the Russian Academy of Sciences
Congratulations to Professor V.B. Khabensky, Doctor of Science in Engineering, the Honored Scientist of the Russian Federation, for his 85th birthday
Congratulations to Professor V.V. Gusarov, Doctor of Science in Chemistry, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, for his 70th birthday 22
Modeling and research of neutron and thermal-physical processes in propulsion reactor plants
A.V. Vakarin, V.S. Granovsky, A.S. Gritsai, S.N. Rumyantsev
Simulation of 3D fluid dynamics in the reactor core of the KM-1 test facility
V.G. Artemov, L.M. Artemova, V.G. Korotayev, A.N. Kuznetsov
Study of the KV-1 facility core burnup using results of numerical simulations and gamma scanning of fuel assemblies
V.G. Artemov, N.S. Nersesian
Comparison between multi-group and few-group neutronic models of small gas-cooled fast reactors
Use of chemical technologies in propulsion reactor plant life cycle management, radiochemical and material research
S.N. Orlov, A.A. Zmitrodan, E.E. Shcherbakov
Numerical simulation of the ammonia and gaseous product concentrations in the primary coolant of nuclear marine reactors
Research of accidents in nuclear
A.A.Fiskov, I.A. Ryshkevich, T.G.Vardanidze, A.A. Ditz
Investigation of the recombiners of hydrogen RVK 500/1000 characteristics and substantiation of their performance under the conditions of design and beyond design accidents
Information for authors
Submission procedure

#### Предисловие главного редактора Chief editor's foreword

В двадцать восьмом выпуске периодического рецензируемого научно-технического сборника «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок» продолжена публикация статей и материалов по актуальным направлениям тематики.

В рубрике «К юбилею ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» публикуются воспоминания ветерана атомной отрасли, первого руководителя Военного Представительства в НИТИ, д.т.н., профессора Военно-Морского Политехнического Института, Заслуженного деятеля науки Российской Федерации, капитана 1 ранга в/о А.Я. Благовещенского об истории создания и становления института и его сотрудниках.

В рубрике «Информационные сообщения» размещены поздравления членам редколлегии научно-технического сборника В.Л. Столяровой – с избранием действительным членом РАН, В.Б. Хабенскому – с 85-летием со дня рождения и В.В. Гусарову – с 70-летием со дня рождения.

В рубрике «Моделирование и исследование нейтронно-физических и теплогидравлических процессов объектов с ЯЭУ» публикуются статьи с результатами исследований и разработок, проводимых в обеспечение эффективной и безопасной эксплуатации объектов с ядерными энергетическими установками.

В рубрике «Химические технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ, радиохимические и материаловедческие исследования» публикуется статья с результатами исследования свойств аппроксимирующих функций, используемых для расчёта концентраций растворенных газов в теплоносителе первого контура транспортных ЯЭУ.

В рубрике «Исследование процессов при авариях на объектах атомной энергетики» публикуется статья с оценкой влияния физико-химического воздействия различных веществ, поступающих в контейнмент АЭС с ВВЭР в режимах проектных и запроектных аварий, на производительность рекомбинатора водорода.

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 chief editor

B. A. Василенко V. A. Vasilenko

#### К 60-летию НИТИ им. А.П. Александрова

#### А. Я. Благовешенский

Военно-Морской Политехнический Институт ВУНЦ ВМФ «Военно-Морская Академия», Санкт-Петербург, Россия

#### On the occasion of 60th anniversary of FSUE "Alexandrov NITI"

A. Ya. Blagoveshchensky

Naval Polytechnic Institute of the "Naval Academy" Military Educational and Research Center, St. Petersburg, Russia



А.Я. Благовещенский первый руководитель Военного Представительства в НИТИ (4939 ВП МО) д.т.н., профессор Военно-Морского Политехнического Института, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, капитан 1 ранга в/о

Отмечая славный юбилей ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», невольно оцениваешь значимость его своевременного создания (вначале Государственной Испытательной Станции— (ГИС) корабельных ядерных энергетических установок (ЯЭУ), преобразованной затем в Институт). НИТИ по праву считается детищем академика А.П. Александрова и носит его имя. Однако, сам факт создания НИТИ явился результатом консолидации позиций всех заинтересованных сторон промышленности и Генерального заказчика — Военно-Морского Флота. От ВМФ непосредственное организационное участие в создании ГИС принимало командование Ордена Ленина 1 ЦНИИ МО (военного кораблестроения), включая выбор площадки для начала строительных работ (совместно был отклонен вариант размещения предприятия в районе фортов «Красная горка» и «Серая лошадь»).

С самого начала у НИТИ сложились прочные научно-профессиональные и организационные связи и сотрудничество с 1 ЦНИИ МО – «идеологическим центром по созданию ко-

раблей ВМФ СССР» [1]. Этому способствовало также то обстоятельство, что для А.П. Александрова начальник Энергетического Управления 1 ЦНИИ МО контр-адмирал И.Д. Дорофеев (д.т.н., Лауреат Ленинской премии) был непререкаемым авторитетом при решении возникающих сложных задач, требующих взвешенного обоснованного подхода. Их профессиональное сотрудничество началось ещё в годы Великой Отечественной войны при решении проблемы защиты кораблей от магнитных мин, а в рассматриваемый период оно подкреплялось их прочной человеческой дружбой.

1 ЦНИИ МО являлся научной опорной базой Главного Управления Кораблестроения (ГУК) ВМФ, имеющего функции Заказывающего с финансированием всего широкого спектра работ по проектам. В 1969 году в НИТИ было образовано Военное Представительство (4939 ВП МО), которое в соответствии с директивой ГУК ВМФ по существу являлось научным подразделением энергетического Управления 1 ЦНИИ МО. В его обязанности входило непосредственное участие на всех этапах испытаний и отработки наземных прототипов (стендов) перспективных корабельных ЯЭУ с анализом результатов с позиций выполнения требований ВМФ по надежности, безопасности и живучести. Моё назначение на должность старшего военпреда — руководителя 4939 ВП МО соответствовало и личному желанию. Хотелось принять непосредственное участие в натурной отработке реакторной установки (РУ) ОК-650Б с широким спектром использования естественной циркуляции теплоносителя (ЕЦТ) в свете реализации требований ВМФ, базирующихся в значительной степени на полученных мною ранее научных результатах в период службы в 1 ЦНИИ МО.

В своих воспоминаниях я постараюсь свести к минимуму отражение научно-технических аспектов многогранной деятельности коллектива уникального НИТИ, сконцентрировав внимание на человеческом факторе, на тех замечательных людях, с которыми тесно соприкасался по работе и в неофициальной обстановке. Начинал я свою служебную деятельность в НИТИ, когда директором был А.Н. Проценко, которого в дальнейшем сменил Е.П. Рязанцев. Это были сильные руководители, добившиеся большого авторитета коллектива возглавляемого ими Института во внешнем мире. В период их руководства были испытаны и отработаны три корабельные ЯЭУ:

- ВАУ-6с (Главный конструктор НИКИЭТ им. Н.А. Доллежаля вспомогательная ЯЭУ для модернизации дизель-электрических подводных лодок (одноконтурная, необслуживаемая с корпусным кипящим реактором);
- ОК-650Б (стенд КВ-1, Главный конструктор «ОКБМ Африкантов» блочная РУ с ВВР и высоким уровнем ЕЦТ для атомных подводных лодок (АПЛ) 3-го поколения);
- ОК-550 (стенд КМ-1, Главный конструктор «ОКБМ Африкантов», парогенератор МП-7М разработки ОКБ «Гидропресс») РУ с жидкометаллическим теплоносителем («свинец-висмут») для АПЛ пр. 705 (скоростных истребителей малого водоизмещения и численности личного состава, с высокой степенью автоматизации).

Заканчивал в 1981 году свою 12-летнюю службу в этом качестве с увольнением из ВМФ в запас при директоре Ю.А. Прохорове, пришедшим из ФЭИ А.И. Лейпунского и сменившем Е.П. Рязанцева.

Весь этот период и далее по 1991 год бессменным Главным Инженером НИТИ был Эрик Сергеевич Брянских, совершенно особенный человек, о котором трудно писать, так как, несмотря на богатство русского языка, сложно подобрать слова, правильно отражающие весь комплекс его блестящих профессиональных и душевных качеств. Скромность была необыкновенная — несмотря на номенклатурную должность, он никогда не пользовался служебным автомобилем для поездки на работу и обратно. Будучи назначенным на должность главного инженера

НИТИ в очень молодом возрасте (34 года), Э.С. Брянских имел уже серьезный опыт испытаний и сдачи Военно-Морскому Флоту АПЛ постройки завода «Ленинского комсомола» г. Комсомольск-на-Амуре, пройдя ряд должностных ступеней, включая сдаточного механика АПЛ.

Об авторитете Эрика Сергеевича на этом заводе узнал случайно при следующих обстоятельствах. В самом начале службы в НИТИ в 1969 году я был назначен заместителем председателя комиссии по проведению комплексных швартовных испытаний (КШИ) головной АПЛ 2-го поколения пр. 667А завода «Ленинского Комсомола» с последующим участием в Комиссии Госприемки. Председателем комиссии КШИ был Главный инженер завода, которому Э.С. Брянских попросил передать привет. Сделав это, я был принят по VIP-разряду с фуршетом с детальными расспросами о новой работе Э.С. Брянских, с восторженными отзывами о его деятельности на заводе и с самыми добрыми пожеланиями.

Глубина профессиональных знаний Э.С. Брянских и способность принимать взвешенные решения возникающих сложных и подчас проблемных вопросов, внимательно относясь к мнениям и предложениям коллег, являются образцом из категории «мастер-класс», как сейчас принято говорить. Несогласие с чьей-то позицией делалось предельно тактично, не вызывая никакого чувства обиды у оппонента. Заседания рабочих групп, в которые входили и представители других предприятий, участников создания данной конкретной РУ, под руководством председателя — Эрика Сергеевича, отличались четкостью проведения с большой пользой для дела. Я горжусь тем, что за весь период совместной деятельности по трем стендовым натурным ЯЭУ наши научно-технические оценки возникающих сложных ситуаций, включая «нештатные», всегда совпадали. Некоторые расхождения могли иметь место в выражении официальной позиции, так как мы «служили» под разными «ведомственными знамёнами».

На всю жизнь в памяти встречи в неофициальной обстановке. На праздничных застольях (а поводов было достаточно много) душевная притягательность Эрика Сергеевича проявлялась



Л.Н. Москвин, Е.П. Рязанцев, Э.С. Брянских (слева направо)

особенно ярко. Выплескивалась наружу его сентиментальность и любовь к хорошим песням, особое место среди которых занимала грустная лирико-героическая песня Михаила Ножкина о войне со словами «...а я в Россию домой хочу, я так давно не видел маму».

Эрику Сергеевичу я по-настоящему обязан своей научной биографией, а именно тем, что стал доктором технических наук. Конкретно, для написания докторской диссертации мне были нужны «грифованные» отчёты по моим исследованиям ЕЦТ, включая результаты испытаний на АПЛ, хранящиеся в 1 ЦНИИ МО. ГУК ВМФ запретило их высылать в НИТИ, мотивируя отказ тем, что к закрытым материалам будут допущены сотрудники Института. Ситуация приняла «тупиковый характер». Увидев меня огорченным и узнав причину, Эрик Сергеевич сказал, что постарается помочь. И действительно помог — обладая большим авторитетом в высших сферах моего командования, вышел на связь с Москвой и доказал, что к этим материалам будет допущен только А. Благовещенский, с хранением материалов весь требуемый период в индивидуальном сейфе в его кабинете. Мало того, в тот период (начало 70-х годов) оргтехника в нынешнем понимании отсутствовала, и он прикрепил ко мне сотрудницу конструкторского бюро для оформления всех графических фрагментов. В этих «тепличных условиях», созданных Эриком Сергеевичем, используя время после окончания рабочего дня до полуночи, я через четыре месяца представил сброшюрованную диссертацию в Совет для прохождения всех процедурных ступеней.

С Брянских Э.С. были очень приятные встречи в Крыму, когда он отдыхал в ведомственном санатории «Горный», а я путешествовал с семьей на автомобиле. Бережно храню сделанный мной видеофильм о торжественно-праздничном мероприятии в 1 ЦНИИ МО в 1997 году, посвященном 40-летию отдела корабельных ЯЭУ, в котором Эрик Сергеевич, будучи почетным гостем, принимал участие. Это была наша последняя встреча. Как профессионал высочайшего класса, удостоенный орденов Ленина, Трудового Красного Знамени, Почетного Звания Лауреата Государственной Премии СССР, будучи патриотом НИТИ, в становление и развитие которого им был внесен неоценимый вклад, Эрик Сергеевич в конце жизни совершил настоящий литературный подвиг, подготовив материалы фундаментального труда — книги «Подводная одиссея НИТИ им. А.П. Александрова» [1]. Эту работу завершили уже его друзья-коллеги.

Я благодарен судьбе, которая подарила мне возможность близкого многолетнего профессионального и простого общения с Человеком, которого я смело отношу к числу легендарных.

Первый день моего появления на службе в НИТИ ознаменовался приятным событием – произошла теплая встреча с Н.С. Ильинским, с физиком, с которым мы вместе работали на первой в мире АЭС, в период моей переподготовки в составе экипажа первой АПЛ. Далее уже в НИТИ мы с ним тесно взаимодействовали, начиная с физпуска реактора ТВП-4 стенда ВАУ-6с. Поражал возрастной показатель основной части коллектива – молодость, сочетаемая с высоким уровнем профессиональной подготовки и научной увлеченностью на лидирующих позициях самых передовых ядерно-энергетических технологий. При этом проявлялась яркая индивидуальность каждого человека. Ряд сотрудников может быть по праву отнесен к числу талантливых, что подтвердилось их профессиональной биографией. Прошло много лет, но память цепко хранит события того времени. В рамках сжатых воспоминаний нельзя «объять необъятное», поэтому привожу лишь те примеры, которые, возможно, покажутся небезынтересными. В отличие от корабельных ЯЭУ, натурные «стенды-прототипы» оснащались широкой сетью приборов для замеров всего комплекса нейтронно-физических, теплогидравлических, электрических и других параметров, позволяющей безопасно проводить широкий спектр динамических испытаний как для подтверждения заложенных проектных решений, так и для расширения эксплуатационных возможностей. Молодой и безусловно талантливый руководитель отдела динамических исследований С.Д. Малкин стал идеологом и создателем системы автоматического проведения эксперимента, которая параллельно обрабатывала опытные данные и корректировала математическую модель с непосредственным получением результатов, необходимых для начала следующего режима. А.П. Александров, забрав С.Д. Малкина в Москву, усилил это направление в возглавляемом им ИАЭ им. И.В. Курчатова. Очень сильным в научном плане с привязкой к широкому кругу решаемых задач проявило себя подразделение теплофизических исследований, возглавляемое В.Б. Хабенским. Он и сегодня работает в НИТИ, став крупным учёным, Заслуженным деятелем науки Российской Федерации, с большим авторитетом как в нашей стране, так и за рубежом. Я дорожу прочными научными и человеческими контактами с ним, достигшими «полувекового возраста». Несмотря на малочисленность группы теплофизиков, она успешно решала задачи, отличающиеся сложностью и новизной исследуемых процессов. В рамках служебной деятельности вызывало глубокое удовлетворение результативное общение в этом плане с В.С. Грановским, который и в настоящее время сохраняет верность профессии, продолжая работать в НИТИ.

Очень серьезные задачи, в том числе и проблемного характера, приходилось решать лабораториям химического и радиохимического профиля, входящим в отдел, возглавляемый Л.Н. Москвиным. Вопросов возникало много. Научная и организационная масштабность его как руководителя позволила так организовать работу коллектива, что он вскоре завоевал авторитет как у А.П. Александрова, так и во внешнем мире. Это явилось основанием для решения А.П. Александрова о назначении возглавляемого Л.Н. Москвиным отдела головным в отрасли по проблемам химического и радиохимического контроля технологических сред ЯЭУ.

По данному профилю НИТИ стал активно помогать ЛАЭС, начиная с пуско-наладочных работ. Не исключаю, что именно Л.Н. Москвин развил у подчиненных «бойцовские качества», проявляющиеся в умении жестко отстаивать выработанную позицию. Примером может служить В.Я. Бредихин в период испытаний и отработки режимов стендов-прототипов, особенно уникальной ВАУ-6с. О нынешнем научном авторитете Л.Н. Москвина, прошедшего яркий профессиональный путь, включая длительный период руководства кафедрой аналитической химии в Санкт-Петербургском Государственном Университете с сохранением прочных творческих связей с НИТИ, говорит вся его биография. Моё научное и приятное человеческое общение с ним достигло также «полувекового возраста».

Мне неизвестен подход к формированию эксплуатационного персонала стендовых ЯЭУ, но его профессиональный уровень был достаточно высоким. Некоторые приобрели его во время службы на АПЛ. Ряд из них был принят в НИТИ по моей рекомендации.

Работа начальников стендов-прототипов — Сидоровича В.П. (ВАУ-6с), Панова О.Г. (КМ-1), Хозичева А.И. (КВ-1), а также Кривцова А.К. и Воронина В.Е., возглавляющих уже организационно объединяющую все стенды структуру КЭЭРУ, была напряженной и ответственной на всех этапах: монтаж, пуско-наладка, целевые испытания. Первые два этапа проходили с военной приемкой, для чего в наше подчинение как головному ВП МО прикомандировывались военпреды судостроительного завода «Адмиралтейское объединение». С целью экономии времени нам было дано право согласовывать на месте изменения в технической документации при появлении такой необходимости в процессе приемки работ. Не всё комплектующее оборудование, особенно контрольно-измерительной принадлежности, соответствовало предъявленным требованиям. Но в этой сфере положение спасал совершенно особенный человек, «талант-самородок» А.П. Лукашов, по должности заместитель начальника метрологической службы НИТИ. Он обладал каким-то особым даром — вместо сложных, но ненадежных приборов измерительной техники, изготовленных известными авторитетными предприятиями, создавал силами опытного производства НИТИ простой надежный измеритель данного параметра, подтвердивший свои преимущества испытаниями в натурных условиях. Таких параметра, подтвердивший свои преимущества испытаниями в натурных условиях. Таких параметра, подтвердивший свои преимущества испытаниями в натурных условиях.

тров много, наиболее яркие — уровнемер для реактора ТВП-4 (ВАУ-6с) и расходомер питательной воды для стенда КВ-1 (ОК-650Б), который затем был принят и для АПЛ. В этих вопросах мы объединяли наши усилия и добивались успеха.

Близкие профессиональные отношения, начавшиеся с испытаний на ВАУ-6с и превратившиеся в дружбу между нашими семьями, сложились с молодым энергичным инженером В.П. Журавлёвым, ставшим потом главным инженером НИТИ. Способствовало то, что он, как и я, по образованию офицер-инженер корабельной службы. Из-за травмы ног продолжение службы в ВМФ для него было исключено, но зато он сделал много полезного для Флота в рамках «Подводной одиссеи НИТИ им. А.П. Александрова».

Институт по-настоящему был богат очень яркими людьми. В памяти Я.И. Шерман (металловед), лучезарный человек, излучающий тепло и доброту, прошедший фронт с тяжелым ранением, удостоенный Ордена Славы и в своей богатой биографии познавший цену и радость жизни. «Глубоко пашущим» и по-хорошему «въедливым» при появлении головоломок на стендах проявил себя инженер В.Я. Георге. Но размах его профессиональной деятельности как инженера и руководителя проявился позднее на стенде КВ-2 с РУ, не имеющей главного циркуляционного насоса первого контура (ГЦНПК), с всережимной ЕЦТ, когда я уже не работал в НИТИ.

Не могу не вспомнить добрым словом человека не из научно-инженерной среды, а из структуры, которая обычно у сотрудников не вызывает положительных эмоций. Речь идёт о заместителе Директора НИТИ по режиму, офицере КГБ А.П. Викторове. Андрей Петрович, выполняя ответственно свои должностные обязанности, никогда не создавал нервозную обстановку. Он понимал важность решаемых Институтом задач, старался быть полезным, вникая в техническое существо вопроса. Наглядный пример. Во время физического пуска реактора ТВП-4 ВАУ-6с при загрузке рабочих каналов оборвался и упал на верхнюю плиту активной зоны один из электромагнитов, удерживающий стержень-поглотитель нештатной системы аварийной защиты. От удара о плиту электромагнит «рассыпался» на две составные цилиндрические части, соединенные латунными болтами, установленными радиально по вершинам правильного треугольника. При тщательном осмотре этого магнита и реактора не удалось найти отломанную головку одного из болтов. Сложилась очень напряженная ситуация – работа с посторонним предметом в полости реактора недопустима, а полная разборка внутренней части реактора осуществима только в заводских условиях. А.П. Викторов предложил свою помощь, он официально передал «рассыпавшийся» магнит на экспертизу в металлографическую лабораторию своего ведомства, которая документально подтвердила, что срез на оставшейся части болта имеет большую давность, т.е. ещё до начала физпуска две части электромагнита были соединены лишь двумя болтами. Его преемник полковник А.Д. Косолапов был человеком другого плана и у меня теплых воспоминаний не оставил.

С самого начало сложилось прочное сотрудничество между НИТИ и Учебным Центром подготовки экипажей АПЛ, которым командовал контр-адмирал В.Ф. Кудрявцев, прекрасный специалист, опытный командир, человек кипучей энергии, пришедший из аналогичного центра в г. Палдиски (Эстония). Поэтому частные посещения НИТИ военно-морским командованием из Москвы носило двойственный характер «по интересам»: заместитель Главнокомандующего ВМФ по кораблестроению и вооружению – адмирал П.Г. Котов и по боевой подготовке—адмирал Г.М. Егоров, а затем сменивший его – адмирал Г.А. Бондаренко.

Учитывая важность деятельности НИТИ для ВМФ, его посетил Главком – адмирал Флота Советского Союза С.Г. Горшков с большой свитой в военно-морской форме к неудовольствию А.Д. Косолапова, который при нарушениях режима адмиралами более низкого ранга всегда официально докладывал об инциденте по своей субординационной линии.

Напряженность работы на стендах-прототипах требовала постоянного присутствия представителей задействованных структур: ЦКБ – проектантов, конструкторских бюро – разработчиков РУ, предприятий контрагентов («Эра», ЦНИИКА «Аврора» и др.). В частности, рабочую группу по стенду КМ-1 (РУ с ЖМТ) возглавлял Главный конструктор ОК-550 Н.М. Царёв. В её состав от нашего ВП входил Н.Н. Монахов, активно занимавшийся технологией тяжелого теплоносителя.

Несмотря на то, что мы (ВП МО) являлись рабочим органом 1 ЦНИИ МО, некоторые этапы требовали личного участия его научных и командных кадров. Примеров много. Председателем МВК по приемке ВАУ-6с был назначен видный учёный, начальник отдела корабельных ЯЭУ, капитан 1 ранга д.т.н. Ю.А. Убранцев (уместно отметить – главный идеолог этой установки, добившийся её реализации).

Восхищает то время, когда ныне осуждаемая партийно-государственная система стояла на страже интересов науки и развития новых высоких технологий. Большое внимание работам НИТИ по линии Минсредмаша уделяли начальник 16-го Главного управления Министерства А.Г. Мешков и начальник Управления судовых установок Б.П. Папковский, часто бывая в институте. НИТИ регулярно посещал и помогал Институту во взаимодействии с региональными смежниками Секретарь Обкома КПСС по оборонной промышленности Ю.П. Думачёв. Ход работ на важнейшем стенде КВ-1 (РУ ОК-650Б) рассматривался на расширенном совещании в Смольном под руководством Второго Секретаря Обкома Р.С. Бобовикова. Приезжал в НИТИ с целью рассмотрения состояния дел на месте член Политбюро ЦК КПСС Первый Секретарь Ленинградского Обкома партии Г.В. Романов.

Неоднократно были визиты руководителей профильных отделов ЦК КПСС. Характерно, что все эти высокие партийные посты занимали не гуманитарии (юристы, экономисты), а инженеры, профессионалы с большим опытом работы.

Состояние дел по стенду КВ-1 регулярно (1 раз в 3 месяца) рассматривалось на заседании рабочей группы Военно-Промышленной Комиссии (ВПК) в Москве под председательством первого заместителя Министра Судостроительной Промышленности И.С. Белоусова. Рассмотрение было жёстким с определением позиций, стоящих на «критическом пути» и с оказанием помощи предприятию-контрагенту, если его «выпадение из графика» было обусловлено объективными причинами.

Положительные результаты в важнейшем деле бурного развития атомного подводного кораблестроения с отработкой новейших образцов его ядерной энергетики в НИТИ достигнуты благодаря существовавшей жёсткой государственной патриотической управляющей системе, полностью оправдавшей себя.

О роли и месте Научного Руководства в работах НИТИ можно писать много — это большая и яркая тема. Повседневное взаимодействие осуществлялось сотрудниками, прикомандированными «на долгосрочной основе» (например, Г.Е. Романцов, Ю.П. Филин — ИАЭ им. И.В. Курчатова, Ю.И. Орлов — ФЭИ им. А.И. Лейпунского). На знаковых моментах присутствовал сам А.П. Александров, в частности проводя предпусковое совещание 2-й кампании ВАУ-6с. Часто на ответственных новых режимах стендов-прототипов присутствовали главные помощники А.П. Александрова — Н.С. Хлопкин или Г.А. Гладков. Помню нескрываемые восторг и радость Г.А. Гладкова после проведения на стенде КВ-1 режимов перехода с ЕЦТ на принудительную циркуляцию (подключение ГЦНПК), которые полностью сняли опасения в свете требований ядерной безопасности. Полноценные всесторонние испытания и отработка РУ ОК-650Б на стенде КВ-1 с проведением «автономного похода» обеспечили не только прогресс в атомном подводном кораблестроении, но и способствовали успешной приемке голов-

ного тяжелого атомного крейсера «КИРОВ» проекта 1144 в состав ВМФ в 1980 г. [2]. Научные результаты, полученные сотрудниками НИТИ в ходе проведения уникальных режимов на стендах-прототипах и при математическом моделировании процессов сложных систем, сделали их достойными получения учёных степеней. Став членом диссертационных советов в структурах ВМФ, я старался оказать содействие в этом вопросе соискателям. Помню прекрасно прошедшие защиты кандидатских диссертаций В.С. Грановским в ВВМИОЛУ им. Дзержинского и Л.Н. Корчагина в Военно-Морской Академии, ставшего потом директором Южно-Украинской АЭС, с которой я активно сотрудничал уже в новом качестве. После ухода «на гражданку», руководя в течение нескольких десятилетий атомным направлением кафедры «Реакторо- и парогенераторостроение» Санкт-Петербургского Политехнического Университета, мне удалось сохранить и профессиональные и дружеские контакты с коллегами по службе в НИТИ. Я ощущал большую помощь и в учебном процессе. Начальник отдела нейтронно-физических исследований А.В. Ельшин в течение многих лет на высоком профессиональном уровне читал студентам 5-го курса лекции по методам расчета ядерных реакторов. Наши выпускники Антон Грицай, Ольга Кувшинова успешно и с пользой для дела адаптировались в коллективе НИТИ и подтвердили, что мы готовили квалифицированных специалистов. Этому во многом способствовал опыт, приобретенный мной в НИТИ, позволивший правильно построить учебный процесс. Теплофизики нашей кафедры Н.Д. Агафонова и И.Л. Парамонова на протяжении ряда лет тесно сотрудничали в интересах совершенствования расчётного кода «КОРСАР» с его автором, начальником отдела теплофизических исследований НИТИ Ю.А. Мигровым. В СПбПУ был открыт и активно заработал диссертационный совет, охватывающий специальность 05.14.03. – Ядерные энергетические установки, включая проектирование эксплуатацию и вывод из эксплуатации. Совет был усилен введением в его состав В.Б. Хабенского (НИТИ). Основной поток защищающих диссертации атомного профиля, определялся соискателями НИТИ. Из преподавателей кафедры была сформирована комиссия по приёму кандидатских экзаменов, а также «предзащиты» (приём к защите) осуществлялись нашей кафедрой. Трудно сосчитать, сколько было защищено кандидатских диссертаций, а докторские, защищенные единогласно, забыть трудно – С.В. Бешта, Ю.А. Мигров, Б.А. Гусев. А.В. Ельшин, у которого я был оппонентом, защищался в МИФИ, выпускником которого являлся, хотя на нашем Совете он бы достиг такого же успеха. Не могу не коснуться блестящей защиты докторской диссертации Генеральным директором НИТИ Вячеславом Андреевичем Василенко в 1 ЦНИИ МО по очень важной для ВМФ крупномасштабной теме. Я благодарен 1 ЦНИИ МО за введение меня в состав Совета на разовую защиту с правом решающего голоса, предоставившее возможность поддержать эту работу. Военные моряки – «надежные ребята»: все было организовано профессионально и чётко, назначенные оппоненты были известными признанными учёными, дискуссия по ярко сделанному докладу прошла заинтересовано, активно.

О Василенко Вячеславе Андреевиче — видном учёном, прекрасном организаторе, Герое России, не будет преувеличением сказать, что его имя Золотыми Буквами вписано в Историю НИТИ им. А.П. Александрова. За 30 лет руководства он не только сохранил Институт, когда в лихие 90-е и далее мы наблюдали разрушение науки в нашем государстве, но и расширил научную сферу его деятельности, приобретя большой авторитет в стране и за рубежом по обеспечению надежности и безопасности стационарной атомной энергетики. Его внутренняя культура, интеллигентность, человеческая притягательность обеспечили особый духовный моральный климат в коллективе, что является бесценным качеством в наше непростое время.

Меня поддерживает «на плаву» профессиональное и человеческое общение с Вячеславом Андреевичем — главным редактором издаваемого НИТИ научно-технического сборника «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок», членом редколлегии которого я являюсь.

#### В заключение – предельно искреннее и восторженное «Да здравствует НИТИ им. А.П. Александрова!»





Памятник академику А.П. Александрову, установленный в 1997 году на территории НИТИ

#### Литература

- 1. Брянских Э.С. Подводная одиссея НИТИ им. А.П. Александрова. СПб.: Моринтех, 2004.
- 2. Благовещенский А.Я. Роль результатов испытаний стенда КВ-1 в процессе приёмки в состав ВМФ тяжелого атомного ракетного крейсера «Киров» // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. − 2019. − № 2 (16). − С. 101–107.

# Поздравление доктору химических наук, профессору В.Л. Столяровой с избранием академиком РАН

На общем собрании Российской академии наук 1—2 июня 2022 года, согласно уставу РАН, состоялись выборы её новых действительных членов (академиков) и членов-корреспондентов. Академиком РАН по Отделению химии и наук о материалах выбрана член редакционной коллегии научно-технического сборника «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок», известный учёный, признанный специалист в области высокотемпературной химии оксидных систем и материалов, доктор химических наук, профессор Валентина Леонидовна Столярова.



Доктор химических наук, профессор Столярова Валентина Леонидовна

On June 1, 2022, Professor Valentina Stolyarova, Doctor of Science in Chemistry, member of the editorial board of Collection of Papers "Nuclear Propulsion Plants. Life Cycle Management Technologies", renowned researcher, acknowledged expert in high-temperature chemistry of oxide systems and materials, was elected as Academician of the Russian Academy of Sciences.

#### Глубокоуважаемая Валентина Леонидовна!

От имени редакционной коллегии научно-технического сборника «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок» и всего коллектива ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» сердечно поздравляем Вас с избранием академиком Российской академии наук, желаем Вам дальнейших творческих успехов, развития Вашей научной школы и новых достижений на благо российской науки и её атомной энергетики!

# Поздравление Заслуженному деятелю науки Российской Федерации, доктору технических наук, профессору В.Б. Хабенскому с юбилеем

11 апреля 2022 года исполнилось 85 лет со дня рождения члена редакционной коллегии научно-технического сборника «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок», специалиста в области расчетно-экспериментального обоснования безопасности и теплотехнической надежности ядерных энергетических установок, главному научному сотруднику отдела исследований тяжелых аварий ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», Заслуженному деятелю науки Российской Федерации, доктору технических наук, профессору Хабенскому Владимиру Бенциановичу.



Заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор Хабенский Владимир Бенцианович

April 11, 2022, was the 85th birthday of Professor Vladimir Khabensky, Doctor of Technology, Chief Researcher in Severe Accident Research Department at Alexandrov NITI, member of the Editorial Board of Collection of Papers "Nuclear Propulsion Plants. Life Cycle Management Technologies", Honored Scientist of the Russian Federation, expert in the field of computational and experimental analysis of nuclear power plant safety and thermal performance.

Главный научный сотрудник отдела исследований тяжелых аварий ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», Заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор Владимир Бенцианович Хабенский — специалист мирового уровня в области расчетно-экспериментального обоснования безопасности и теплотехнической надежности ядерных энергетических установок как транспортной, так и стационарной атомной энергетики.

В 1960 году Владимир Бенцианович окончил Ленинградский кораблестроительный институт по специальности «Судовые силовые установки» и был принят на работу в Центральный научно-исследовательский институт имени академика А.Н. Крылова. С 1963 по 1966 годы работал в Институте атомной энергии Академии наук СССР, где занимался разработкой математических моделей для ядерных энергетических установок (ЯЭУ) транспортного назначения. С 1967 по 1971 год обучался в аспирантуре Центрального котлотурбинного института имени И.И. Ползунова, и в 1971 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. С 1971 года Владимир Бенцианович работает в Научно-исследовательском технологическом институте имени А.П. Александрова (НИТИ).

В 1984 году Владимир Бенцианович защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. В 1989 году ему присвоено ученое звание профессора. Большой цикл исследований, выполненных в НИТИ в 1970—1980-е годы под научным руководством и при непосредственном участии Владимира Бенциановича Хабенского, позволил обосновать теплотехническую надежность судовых ядерных энергетических установок ВАУ-6, КМ-1, КВ-1, КВ-2 и улучшить их эксплуатационные характеристики. Результатом этого является существенное увеличение эксплуатационного диапазона режима естественной циркуляции установки КВ-1, которая является базовой для атомных судов и кораблей.

При проведении исследований Владимир Бенцианович уделяет большое внимание анализу различных видов теплогидравлической неустойчивости потока теплоносителя в элементах энергетического оборудования, разработке методов оценки границ областей неустойчивости. Им получены и обоснованы способы повышения устойчивости для



В.Б. Хабенский – выступление на конференции молодых ученых, 1985 год

целого ряда энергетических систем. Результатом этих работ явилась публикация в 1994 году в издательстве «Наука» монографии «Нестабильность потока теплоносителя в элементах энергооборудования», которая стала одной из популярных настольных книг для специалистов и студентов и переведена на английский и китайский языки.

Являясь основателем и научным руководителем школы по исследованиям процессов, протекающих в активной зоне реактора при тяжелых (запроектных) авариях, Владимир Бенцианович Хабенский создал коллектив исследователей – представителей различных отечественных и зарубежных исследовательских организаций. Высокие человеческие качества, глубочайшая эрудиция и ответственность за порученное дело позволили ему сплотить коллектив и достичь научных и инженерных результатов мирового уровня.

Результаты исследований фундаментальных процессов при тяжелых авариях в активных зонах водо-водяных реакторов, проводимых под научным руководством Владимира Бенциановича Хабенского, позволили впервые в мировой практике спроектировать и создать устройство локализации расплава активной зоны ядерного реактора для Тяньваньской АЭС в Китае. Это обеспечило лидерство России в области повышения уровня безопасности АЭС.

В настоящее время устройства локализации расплава являются необходимым оборудованием для всех АЭС, сооружаемых по российским проектам в России и за рубежом.

Кроме этой важной и актуальной проблематики Владимир Бенцианович активно работает в области повышения экологической безопасности, участвуя в разработке новых технологий иммобилизации в стеклоподобных матрицах радиоактивных отходов с использованием метода индукционной плавки в холодном тигле и новых видов катализаторов окисления водорода, повышения энергоэффективности АЭС, развернув работы по исследованию возможности увеличения запаса до кризиса плотности теплового потока при использовании в качестве теплоносителя наножидкостей, получения новых способов исследования теплофизических характеристик, предложив способ определения теплопроводности натурной корки, формирующейся на расплаве активной зоны в аварийном реакторе и множестве других работ, связанных с повышением эффективности, экономичности и безопасности атомной энергетики.



Владимир Бенцианович Хабенский – трудовые будни

Несмотря на большую занятость, Владимир Бенцианович находит время и на общественную деятельность — он является членом Ученого Совета при Санкт-Петербургском политехническом университете, членом общественного Совета при главе муниципального городского округа города Сосновый Бор. Большое внимание Владимир Бенцианович уделяет подготовке научных кадров высшей квалификации, под его научным руководством подготовлено десять кандидатов и два доктора наук.

Владимир Бенцианович Хабенский — автор более 150 публикаций, 35 авторских свидетельств и патентов. Имея множество публикаций в зарубежных научных журналах, он пользуется огромным авторитетом среди научной общественности России, европейских стран, США, Канады, Южной Кореи, Японии и Китая.

Результаты научно-технической деятельности Владимира Бенциановича Хабенского отмечены государственными наградами – орденом «Знак почета», медалью «Ветеран труда», ведомственными знаками отличия. Ему присвоены звания «Заслуженный деятель науки Российской Федерации» и «Ветеран НИТИ им. А.П. Александрова».

Владимир Бенцианович является членом редакционной коллегии рецензируемого периодического научно-технического сборника «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок», выпускаемого ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», с самого его основания, а также постоянным автором публикаций в нем. Владимир Бенцианович неизменно доброжелателен, открыт к общению, полон оптимизма и интереса к жизни и научной деятельности.

#### Дорогой Владимир Бенцианович!

От имени редакционной коллегии научно-технического сборника «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок» и всего коллектива ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» сердечно поздравляем Вас с Юбилеем, желаем Вам крепкого здоровья, активного долголетия и дальнейших творческих успехов!



В.Б. Хабенский – «Заслуженный деятель науки Российской Федерации». Поздравление генерального директора Госкорпорации «Росатом» А.Е. Лихачёва. 2017 год

# Поздравление члену-корреспонденту РАН, доктору химических наук, профессору В.В. Гусарову с юбилеем

1 июня 2022 года исполнилось 70 лет со дня рождения члена редакционной коллегии научно-технического сборника «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок», известного ученого и признанного специалиста в области химии твердого тела, физической химии, технологии неорганических материалов, заведующего лабораторией новых неорганических материалов Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, члена-корреспондента РАН, доктора химических наук, профессора Виктора Владимировича Гусарова.



Член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор В.В. Гусаров

June 1, 2022 was the 70th birthday of Corresponding Member of RAS, Doctor of Science in Chemistry, Professor Victor Vladimirovich Gusarov, a member of the editorial board of Collection of Papers "Nuclear Propulsion Plants. Life Cycle Management Technologies", a prominent scientist in the field of solid state chemistry, physical chemistry, technology of inorganic materials, Head of the Laboratory of New Inorganic Materials of Ioffe Institute.

Заведующий лабораторией новых неорганических материалов Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор Виктор Владимирович Гусаров – известный ученый и признанный специалист в области химии твердого тела, физической химии, технологии неорганических материалов, в том числе материалов и технологий для обеспечения безопасности ядерных энергетических установок (ЯЭУ).

Виктор Владимирович в 1975 году окончил инженерный физико-химический факультет Ленинградского технологического института им. Ленсовета (ЛТИ) по специальности техноло-

гия редких и рассеянных элементов и был распределен на кафедру высшей математики ЛТИ. В ЛТИ он прошел путь от младшего научного сотрудника до доцента кафедры химической технологии высокотемпературных материалов. В 1997 году Виктор Владимирович защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора химических наук по специальности «Физическая химия».

В 1997 году Виктор Владимирович по приглашению заведующего лабораторией фазовых равновесий оксидных систем Института химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН) доктора химических наук Романа Георгиевича Гребенщикова перешел в его лабораторию, а в 1999 году стал заведующим этой лабораторией. В связи с расширением тематики лаборатория в 2000 году была переименована в лабораторию физикохимии наноразмерных систем. Однако тематика, связанная с изучением фазовых равновесий, в лаборатории была сохранена и развита как в аппаратурном, так и в методическом плане. В частности, совместно с ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» в рамках проектов международного научно-технического центра была проведена модернизация установок визуально-политермического анализа — микропечи конструкции профессора Ф.Я. Галахова и высокотемпературного микроскопа конструкции члена-корреспондента АН СССР Н.А. Торопова, исследован ряд двойных, тройных и многокомпонентных кориумных систем. Полученные результаты имеют широкое международное признание и включены в общие и специализированные базы данных и расчетные коды, такие как программный комплекс NUCLEA/GEMINI (Франция).

В 2003 году В.В. Гусаров был избран членом-корреспондентом РАН и стал совмещать обязанности заведующего лабораторией и заместителя директора ИХС РАН по научной работе. Виктор Владимирович установил тесные контакты с ведущими вузами Санкт-Петербурга. К работе в лаборатории было привлечено большое число студентов и аспирантов, пополнивших в дальнейшем её научный коллектив.

Работу в ИХС РАН Виктор Владимирович совмещал с преподаванием на кафедре физической химии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», которую возглавил в 2008 году. На кафедре им была возобновлена работа аспирантуры по специальности «Физическая химия», а в 2009 году начата подготовка магистрантов по оригинальной магистерской программе «Биосовместимые материалы», что привлекло на кафедру молодых ученых и преподавателей, а, впоследствии осуществлялось пополнение профессорско-преподавательского состава талантливыми выпускниками кафедры.

С 2009 по 2016 год Виктор Владимирович также возглавлял кафедру физической химии Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) (СПбГТИ(ТУ)). В 2009 году по его инициативе открыта подготовка бакалавров и магистров по направлению «Химическая технология» и разработаны оригинальные программы бакалавриата: «Химическая технология наноструктур и функциональных материалов» и магистратуры: «Физико-химическое конструирование и химическая технология наноструктур и функциональных материалов». В 2010 году открыто новое для СПбГТИ(ТУ) образовательное направление «Химия» (программы бакалавриата: «Физическая химия» и «Химия твердого тела и химия материалов», магистратуры: «Физическая химия и химия твердого тела»). Эти направления, сделав кафедру выпускающей, усилили научную работу и позволили кардинально обновить разработку необходимого научного оборудования.

Для привлечения в науку молодых и талантливых специалистов по инициативе Виктора Владимировича на кафедре физической химии СПбГТИ (ТУ) организованы ежегодные конкурсы научных работ школьников – «Химия: наука и искусство» (имени профессора Владимира Яковлевича Курбатова), и студентов – «Физическая химия – основа новых технологий и материалов» (имени члена-корреспондента АН СССР Александра Александровича Яковкина).

В работе экспертных групп этих конкурсов принимают активное участие и специалисты  $\Phi$ ГУП «НИТИ им. А.П. Александрова».

В 2009 году Виктор Владимирович Гусаров был приглашен академиком Геннадием Федоровичем Терещенко в возглавляемую им лабораторию новых неорганических материалов Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) на должность главного научного сотрудника, а в 2010 году после смерти Геннадия Федоровича Виктор Владимирович возглавил лабораторию. За время руководства лабораторией научный состав её значительно пополнился молодыми учёными и специалистами, в том числе выпускниками руководимых им магистерских программ. Необходимость пополнения коллективов лабораторий ФТИ им. А.Ф. Иоффе специалистами высшей квалификации в области физикохимии материалов инициировала организацию в институте под руководством В.В. Гусарова аспирантуры по специальности «Физическая химия».

В 2016 году Виктор Владимирович организовал и возглавил в СПбГТИ(ТУ) базовую кафедру «Физико-химическое конструирование функциональных материалов» при ФТИ им. А.Ф. Иоффе. На кафедре ведется подготовка специалистов, ориентированных на работу в лабораториях ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

В 2019 году по инициативе В.В. Гусарова в ИХС РАН создана лаборатория физико-химического конструирования и синтеза функциональных материалов, в состав которой вошли сотрудники возглавляемой им ранее лаборатории физикохимии наноразмерных систем.

Виктором Владимировичем и его учениками выполнена серия пионерских исследований по изучению влияния вещества в неавтономном состоянии на физико-химические процессы в неорганических материалах.

С 1999 года Виктор Владимирович и его сотрудники принимают активное участие практически во всех исследованиях, проводимых отделом исследований тяжелых аварий ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова». Под научным руководством Виктора Владимировича созданы физико-химические основы анализа химических процессов в условиях тяжелых аварий в реакторах ЯЭУ. Выполнен комплекс исследований, позволивший разработать принципы



Встреча с коллегами. В.В. Гусаров, В.Б. Хабенский, В.С. Грановский (слева направо)

физико-химического конструирования функциональных материалов нового класса для систем безопасности атомных реакторов – жертвенных материалов устройства локализации расплава активной зоны ядерного реактора и создать несколько вариантов таких материалов для различных проектов АЭС. Эти материалы были впервые востребованы при строительстве АЭС нового поколения с повышенным уровнем безопасности на базе реакторов ВВЭР большой мощности и являются одним из весомых конкурентных преимуществ этих реакторов.

Результаты научной работы В.В. Гусарова отражены в монографиях, патентах и более чем в 300 статьях.

В 2010 году по инициативе Виктора Владимировича Гусарова организован новый научный журнал "Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics" (входит в базы цитирования WoS, Scopus), в котором с момента основания он, как заместитель главного редактора, курирует раздел «Химия и наука о материалах».

Виктор Владимирович является членом редакционных коллегий ряда журналов химического и материаловедческого профиля, входящих в базы цитирования WoS, Scopus, РИНЦ. С 2020-го года Виктор Владимирович является членом редакционной коллегии рецензируемого периодического научно-технического сборника «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок», выпускаемого ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова». Он постоянный автор публикаций в сборнике с момента его основания. Виктор Владимирович всегда имеет свой особенный взгляд на химические проблемы и физико-химические явления, он щедро делится с коллегами своим опытом и идеями, методами и подходами.

Виктор Владимирович Гусаров активно занимается научно-организационной и экспертной деятельностью, являясь членом ученых советов ФТИ им. А.Ф. Иоффе и ИХС РАН, членом трех диссертационных советов, членом экспертного совета ВАК по неорганической химии и других экспертных организаций.

Виктор Владимирович – создатель и бессменный руководитель научной группы, сформировавшейся вокруг постоянно действующего семинара «Химическое конструирование материалов», имеющего статус семинара Российского химического общества имени Д. И. Менделеева.

Несмотря на спокойный и уравновешенный характер появление Виктора Владимировича Гусарова всегда инициирует в научной среде активную научную и преподавательскую деятельность. Учеников В.В. Гусарова объединяет не только сходство методологических подходов к решению научных проблем, но и координация направлений научной и образовательной деятельности.

#### Глубокоуважаемый Виктор Владимирович!

От имени редакционной коллегии научно-технического сборника «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок» и всего коллектива ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» сердечно поздравляем Вас с Юбилеем, желаем Вам, дорогой Виктор Владимирович, не останавливаться на достигнутом, продолжать активную творческую деятельность в научной среде, которую Вы сформировали. Здоровья и долгих Вам лет активной жизни!

УДК 621.039.51 DOI: 10.52069/2414-5726 2022 2 28 26

## Моделирование пространственной гидродинамики в активной зоне реакторной установки стенда КМ-1

А.В. Вакарин<sup>1</sup>, В.С. Грановский<sup>1</sup>, А.С. Грицай <sup>1, 2</sup>, С.Н. Румянцев <sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия <sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

#### Аннотация

Для реакторной установки со свинцово-висмутовым теплоносителем стенда КМ-1 на основе программного комплекса CFD-класса STAR-CCM+ разработаны расчетные модели пространственной термогидродинамики потока в реакторе и ТВС. При построении расчетной модели для элементов реактора, в первую очередь, активной зоны, использовалось приближение пористого тела с определением необходимых коэффициентов путем проведения расчетов на моделях этих элементов или по справочным данным. Показано, что характер течения и распределения температуры теплоносителя главным образом обусловлены наличием в центральной части ТВС кессона со стержнями органов регулирования системы управления и защиты, который вносит существенную неравномерность в регулярную решетку твэлов. Пространственными расчетами обоснована возможность применения упрощенной расчетной модели ТВС, разработанной на основе кода КОРСАР/ЖМТ. Выполнено сопоставление расчетов с экспериментальными данными по температуре на выходе активной зоны.

**Ключевые слова:** реакторная установка, свинцово-висмутовый теплоноситель, пространственная гидродинамика, контурная теплогидравлика, расчет, эксперимент.

## Simulation of 3D fluid dynamics in the reactor core of the KM-1 test facility

A.V. Vakarin<sup>1</sup>, V.S. Granovsky<sup>1</sup>, A.S. Gritsai<sup>1, 2</sup>, S.N. Rumyantsev<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University in Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

#### **Abstract**

Spatial thermal and fluid dynamics simulation models are developed to describe flow in the reactor and fuel assemblies of the KM-1 lead-bismuth cooled reactor test facility. The models are based on CFD-class STAR-CCM+ software. A porous body approximation is used in the model of reactor components, notably the core, with determination of appropriate coefficients by performing calculations in the component models or employing reference data. It is shown that the flow pattern and coolant temperature distribution is mainly determined by the presence of a water jacket with control rods, which introduces significant non-uniformity in the regular fuel rod lattice. The 3D calculations have demonstrated the applicability of the simplified fuel assembly simulation model developed on the basis of the KORSAR/LMC computer code. The calculations are compared against experiment data for the core exit temperature.

**Key words:** reactor, lead-bismuth coolant, 3D fluid dynamics, circuit thermal hydraulics, calculation, experiment.

#### Введение

В качестве одного из перспективных направлений развития ядерной энергетики в настоящее время рассматриваются реакторные установки (РУ) с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) [1]. Интерес к подобным РУ инициировал активное развитие соответствующих программных средств (ПС), используемых для обоснования безопасности, и их валидацию [2, 3, 4]. При этом достаточно остро обозначилась проблема дефицита экспериментальных данных особенно в части опытов на интегральных установках с ТЖМТ [5]. В этой связи результаты испытаний реакторной установки (РУ) транспортного назначения со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВТ) в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», проведенных на стенде КМ-1 в 1978—1986 гг., являются уникальными с точки зрения валидации расчетных программ, предназначенных для численного моделирования теплогидравлических процессов в установках с ТЖМТ.

При проведении испытаний впервые была использована автоматизированная система, позволяющая регистрировать экспериментальные данные в цифровом формате. Наиболее информативным для анализа теплогидравлических процессов в активной зоне (а.з.) реактора, является поле температур на выходе а.з., которое идентифицировалось (измерялось) с помощью 129 датчиков температуры, входящих в состав терморешетки.

Непосредственный анализ экспериментальных данных показал, что указанное температурное поле имеет сильную неравномерность, систематически повторяющуюся на разных уровнях мощности в различные моменты кампании, отражая пространственный характер течения СВТ. Это обстоятельство затрудняет прямое применение одномерных ПС для моделирования теплогидравлики а.з. и требует проведения предварительного анализа с использованием расчетных программ, обеспечивающих пространственное моделирование гидродинамических процессов.

Для решения указанной задачи необходима отработка соответствующей методологии формирования и настройки расчетных моделей РУ, разработанных на основе одномерных кодов контурной теплогидравлики, по результатам моделирования пространственной термогидродинамики с применением ПС CFD-класса. Попытка реализовать подобную методологию с применением ПС STAR-CCM+ и расчетного кода (РК) КОРСАР/ЖМТ [4] предпринята в настоящей статье.

### Экспериментальное распределение температуры на выходе активной зоны и методология её расчетного моделирования

Типичная картина показаний термопар для одного из режимов, проведенных на стенде КМ-1, представлена в безразмерном виде на рис. 1 в виде поля (поверхности) в декартовых координатах.

Из рис. 1 видно, что поле температуры характеризуется множественными локальными деформациями с рядом выраженных максимумов и минимумов. Данная картина является устойчивой и на качественном уровне проявляется во всех экспериментах.

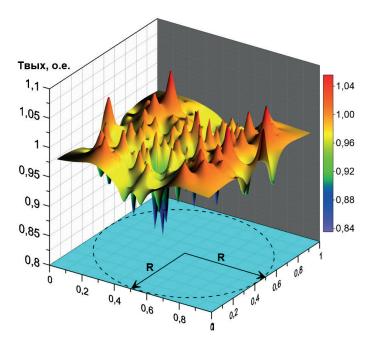


Рис. 1. Поле температуры теплоносителя на выходе активной зоны

Результаты предварительного анализа свидетельствуют о том, что сложный рельеф температурного поля обусловлен наличием кессонов, чехлы которых имеют форму треугольной призмы со скругленными ребрами, со стержнями органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ), вносящих существенную неравномерность в регулярную решетку твэлов. Указанные кессоны омываются изнутри относительно холодным теплоносителем, поступающим далее в межтвэльное пространство через перфорацию чехлов, что приводит к большому градиенту температуры вблизи кессонов.

Наглядной демонстрацией «кессонного эффекта» является представленная на рис. 2 взаимосвязь температуры на выходе а.з. с расстоянием термопар от оси кессонов (в плане), на котором обобщены показания термопар центральной группы из 7-ми однотипных ТВС, характеризующихся близким энерговыделением и одинаковой конструкцией кессонов. Разброс точек обусловлен отсутствием азимутальной симметрии гидродинамики потока СВТ.

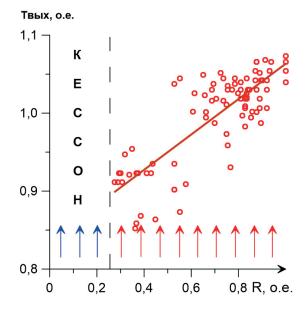


Рис. 2. Зависимость показаний термопар от расстояния до центра кессона (в плане) для 7-ми ТВС центральной зоны

Однако проверка значимости всех факторов, которые могут вносить вклад в неравномерность распределения температуры, и возможность использования одномерных моделей требуют пространственного моделирования.

В целом, расчетный анализ распределения температуры СВТ в а.з. и, в частности, на её выходе должен выполняться в указанной ниже последовательности.

- 1. С использованием модели контурной теплогидравлики ППУ определяются расходы и температуры СВТ в циркуляционных петлях при работе на стационарном уровне мощности.
- 2. С использованием в качестве граничных условий полученных значений расходов СВТ и разработанной с помощью СFD-пакета трехмерной модели гидродинамики реактора, включая модель пористого тела а.з. (без моделирования кессонов), определяется распределение скорости (расхода) на входе в а.з.
- 3. С использованием в качестве граничных условий полученных значений скорости (расхода) и температуры СВТ, а также полученного нейтронно-физическими расчетами энерговыделения в твэлах и стержнях ОР СУЗ и разработанной с помощью СГО-пакета трехмерной расчетной модели термогидродинамики СВТ в ТВС, включая кессон, определяется распределение скорости и температуры СВТ в ТВС.
- 4. С использованием граничных условий и энерговыделения по п. 3, а также одномерной («потвэльной») модели выделенной ТВС определяется распределение скорости и температуры СВТ в ТВС. Модель выделенной ТВС представляет собой систему параллельных каналов, включая кессон, расчетные ячейки которых по высоте теплогидравлически связаны с соседними ячейками с помощью элементов типа «поперечная связь» (jn).

Сравнение результатов расчетов с использованием пространственной модели ТВС с экспериментальными значениями температуры на выходе а.з. позволяет оценить важность учета тех или иных факторов, которые, в принципе, могут влиять на результаты расчета. Если выявленные таким образом существенные факторы могут быть воспроизведены в одномерной модели ТВС, то, при удовлетворительном согласовании расчетных и экспериментальных значений температуры СВТ на выходе а.з., обосновывается тем самым применимость одномерной расчетной модели для анализа теплогидравлических характеристик ТВС и, соответственно, оценки температурного состояния отдельных твэлов.

#### Контурная теплогидравлика ППУ

Для моделирования интегральных параметров динамических, в общем случае, режимов работы двухконтурной паропроизводящей установки (ППУ) стенда КМ-1 на основе РК КОРСАР/ЖМТ была разработана расчетная модель, нодализационная схема которой представлена на рис. 3. Первый контур (СВТ) моделировался в полном объеме, второй – в граничных условиях: расход питательной воды на входе и давление перегретого пара на выходе. Из 3-х циркуляционных петель первого и второго контуров на рис. 3 показана только одна.

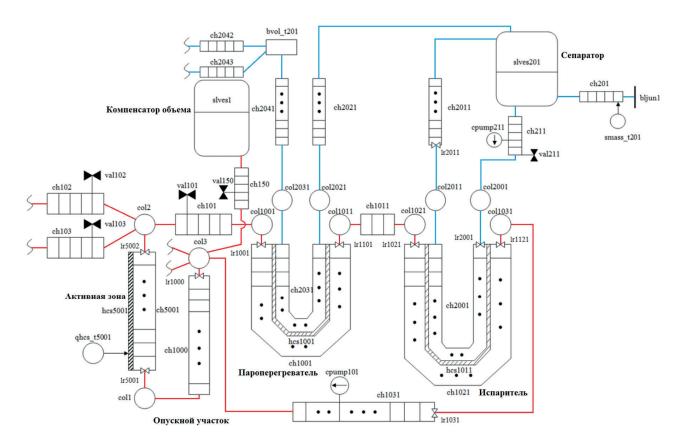


Рис. 3. Нодализационная схема расчетной модели ППУ стенда КМ-1

Расчетная модель сформирована с использованием типовых элементов РК КОРСАР/ЖМТ и включает в себя элементы типа «канал» (ch), описывающие проточную часть а.з. и парогенераторов как по первому, так и по второму контурам, трубопроводы циркуляционных петель с учетом местных сопротивлений (lr) и отсечных клапанов (val), опускной участок реактора между отражателем и корпусом реактора, трубопроводы питательной воды, пароводяной смеси, насыщенного и перегретого пара. Нижняя и верхняя смесительные камеры реактора описывались элементами типа «коллектор» (col); компенсатор объема и сепараторы циркуляционных петель – типовым элементом «сосуд под давлением» (slves); твэлы а.з. и трубные пучки парогенераторов – элементом «теплопроводящая конструкция» (hcs). Энерговыделение в твэлах задавалось с помощью элемента «заданное энерговыделение в теплопроводящей конструкции» (qhcs\_t). Насосы первого контура и контуров МПЦ описывались элементом «центробежный насос» (сритр). Граничные условия по расходу и температуре питательной воды задавались элементом «заданный источник массы» (smass\_t), а по давлению – элементом «заданная граничная ячейка» (bvol\_t).

Моделируемая с помощью РК КОРСАР/ЖМТ расчетная модель ППУ с одноканальным представлением а.з., разумеется, не позволяет получить данные по распределению температуры СВТ. Однако с её помощью могут быть рассчитаны параметры СВТ в циркуляционных петлях, которые необходимы для последующего проведения пространственных расчетов.

#### Пространственная гидродинамика СВТ в реакторе

Анализ пространственных эффектов в а.з. реактора выполнялся для стационарного режима работы установки на уровне мощности  $N=30~\%N_{HOM}$  с заданием в качестве граничных условий соответствующих расходов СВТ в циркуляционных петлях, которые были получены расчетом на контурной теплогидравлической модели.

Корректное пространственное моделирование течения СВТ в а.з. требует рассмотрения всего проточного тракта реактора от входных до выходных патрубков. На рис. 4 показана САD-модель расчетной области с обозначениями всех структурных элементов. Теплоноситель из входных патрубков l последовательно поступает в кольцевую полость 2 (опускной участок), во входной коллектор 3, в фильтр 4, в полость под нижней опорной плитой 5, далее движется через отверстия нижней опорной плиты 6, через зазор 7, дистанционирующую решетку 8, активную зону 9, дистанционирующую решетку 10, зазор 11, отверстия в плите терморешетки 12, полость 13; через отверстия в верхней опорной плите 14 поступает в выходной коллектор 15 и далее в выходные патрубки 16.

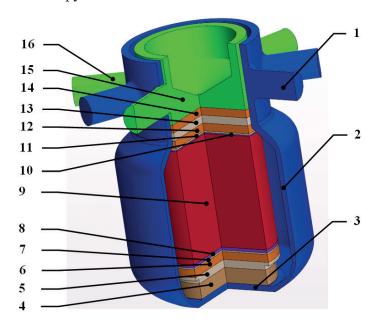


Рис. 4. CAD-модель расчетной области:

1 — входные патрубки; 2 — кольцевая полость; 3 — входной коллектор; 4 — фильтр; 5 — полость под нижней опорной плитой; 6 — нижняя опорная плита; 7 — зазор; 8 — дистанционирующая решетка; 9 — активная зона; 10 — дистанционирующая решетка; 11 — зазор; 12 — плита терморешетки; 13 — полость; 14 — верхняя опорная плита; 15 — выходной коллектор; 16 — выходные патрубки.

Расчетный анализ пространственной гидродинамики течения СВТ в реакторе выполнялся с использованием программного комплекса STAR-CCM+ [6]. При разработке конечно-элементной модели для а.з., фильтра, опорных плит, дистанционирующих решеток и плиты терморешетки применялась модель пористого тела, для остальных участков — СFD модель. В сеточной модели использовались многогранные ячейки с заданием призматического слоя вблизи стенок. Суммарное число расчетных ячеек сетки составило приблизительно 6·106.

Коэффициенты для модели пористого тела всех участков кроме а.з. определялись с использованием справочных данных для коэффициентов гидравлического сопротивления [7]. Определение указанных коэффициентов для а.з. потребовало проведения предварительных расчетов на CFD модели её фрагмента. Твэлы а.з. в поперечном сечении размещены в узлах правильной треугольной решетки, при этом во взаимно перпендикулярных направлениях они образуют

шахматный и псевдокоридорный пучки стержней. Поскольку оболочки твэлов имеют навивку, обеспечивающую их самодистанционирование, в осевом направлении размер фрагмента соответствовал минимально необходимому для моделирования повороту навивки на угол 90°. В качестве граничных условий в продольном направлении задавались скорость на входе и давление на выходе. Для моделирования поперечных перетечек по боковым сторонам задавались циклические условия и перепады давления на противоположных границах.

Результаты расчетов для продольного обтекания твелов показаны на рис. 5, а для поперечного обтекания — на рис. 6 в виде зависимостей перепадов давления от скорости.

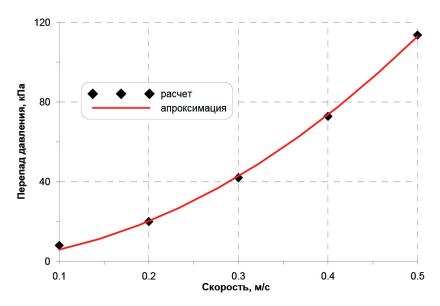


Рис. 5. Зависимость перепадов давления от скорости потока теплоносителя при продольном обтекании твэлов

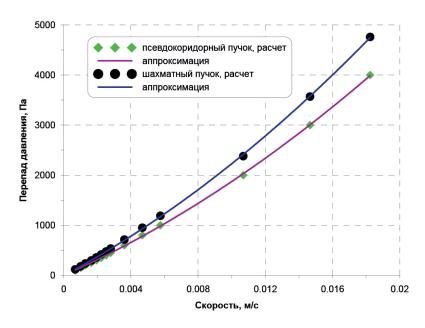


Рис. 6. Зависимости перепадов давления от скорости потока теплоносителя при поперечном обтекании твэлов

В соответствии с полученными гидравлическими характеристиками были определены коэффициенты в модели пористого тела а.з. по всем трём координатам.

В результате расчета течения СВТ в реакторе было установлено следующее. Азимутальная неравномерность скорости опускного течения СВТ в кольцевой полости 2 (здесь и далее см. рис. 4), обусловленная дискретностью и азимутальной несимметричностью входных патрубков I, при движении через участки тракта от входного коллектора 3 до входа в а.з. 9 в большой степени нивелируется благодаря наличию фильтра, нижних плиты и решетки. По результатам расчета максимальная неравномерность скорости СВТ на входе в а.з. составляет всего  $\pm 0.02$  м/с при среднем значении  $\approx 0.3$  м/с. Выше по течению распределение скорости быстро становится практически равномерным. Сказанное иллюстрируется показанным на рис. 7 распределением скоростей СВТ в поперечных сечениях а.з.

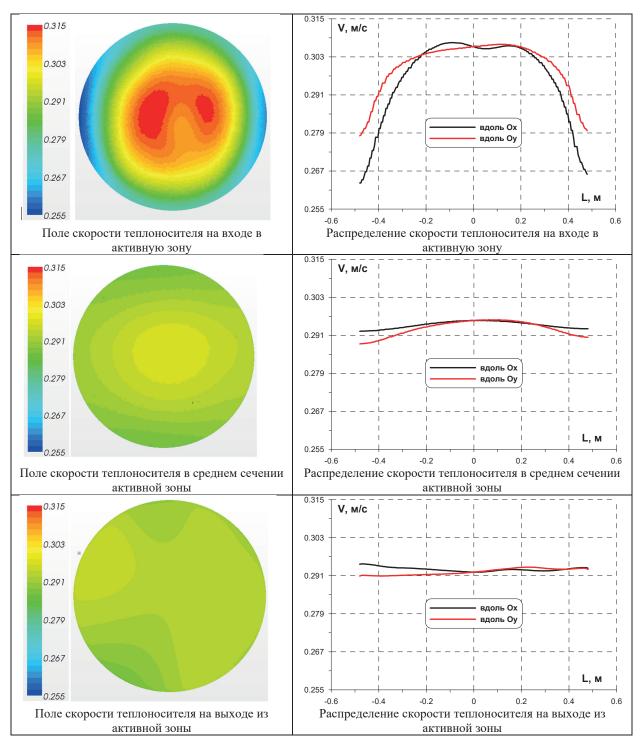


Рис. 7. Распределение скоростей СВТ в активной зоне

#### Пространственная модель ТВС

В качестве примера рассмотрена одна из ТВС, расположенных в центральной части а.з. Расчетная модель на основе STAR-CCM+ для анализа пространственного течения в пределах ТВС включала в себя части опорных плит, дистанционирующих решеток и плиты терморешетки, твэльный пучок и кессон со стержнями ОР СУЗ. В качестве граничных условий задавались полученные в пространственном расчете а.з. расход и температура СВТ на входе ТВС и давление на выходе. Потвэльное распределение энерговыделения задавалось по результатам нейтронно-физического расчета с использованием комплекса программ САПФИР\_РФ&RС [8].

На рис. 8 схематично показано поперечное сечение ТВС с кессоном, размещенным в её центральной части. В кессоне расположены три стержня ОР СУЗ, а на гранях чехла кессона – сквозные отверстия, сообщающие внутреннее пространство кессона с межтвэльным пространством ТВС. На этом же рисунке показано расположение (в плане) термодатчиков терморешетки с указанием их номеров. Четыре термодатчика №№ 40, 93, 97, 116 расположены на периферии ТВС, а три №№ 94, 95, 96 – вблизи кессона.

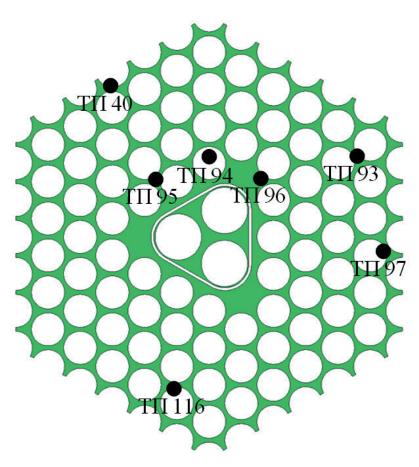


Рис. 8. Поперечное сечение САД-модели ТВС

В серии расчетов было проанализировано влияние на указанную неравномерность следующих факторов: протечки теплоносителя между плитами опор твэлов соседних ТВС (элементов дистанционирующей решетки), спиральная навивка на оболочках твэлов, теплопроводность твэлов, энерговыделение в стержнях ОР СУЗ.

В табл. 1 приведены экспериментальные значения температуры ( $T_{\text{эксп}}$ ) и результаты серии расчетов ( $T_{\text{расч}}$ ).

Таблица  $\it I$  Расчетные и экспериментальные значения температуры в точках измерения. Пространственная модель

№ термопары	T <sub>эксп</sub> , °C	T <sub>pacч</sub> , °C				
ж термопары		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
ТП40	392	391	391	392	392	391
ТП93	392	391	392	392	392	393
ТП94	330	312	316	317	319	325
ТП95	339	311	312	313	314	318
ТП96	339	314	315	318	319	324
ТП97	383	390	393	392	393	393
ТП116	396	381	390	385	386	386

В расчете № 1 не учитывался ни один из перечисленных факторов. СВТ через отверстия в чехле кессона поступал в межтвэльное пространство с температурой, равной её значению на входе ТВС. Можно видеть, что расчетные значения температуры на периферии близки к эксперименту, а вблизи кессона заметно (приблизительно на 24 °C) меньше экспериментальных.

В расчете № 2 было учтено только наличие щелевых зазоров между плитами опор твэлов, которые, в принципе, увеличивают расход «холодного» СВТ на периферии ТВС. Однако, по результатам расчета этого влияния обнаружено не было, и результаты близки к расчету № 1.

В расчете №3 дополнительно к расчету № 2 учитывалась теплопроводность твэлов. Предполагалось, что высокая теплопроводность топлива может привести к перераспределению тепловых потоков по поверхности твэлов и к некоторому выравниванию выходной температуры СВТ. Для учета теплопроводности расчетная модель была преобразована: в нее включены твердотельные элементы (твэлы), в которых задавалось внутреннее тепловыделение. Во всех других расчетах, где моделировалась только проточная часть ТВС, энерговыделение задавалось в виде подводимого к СВТ равномерного по окружности твэла теплового потока. Однако результаты расчета показали, что указанное влияние невелико.

В расчете № 4 дополнительно к расчету № 2 воспроизводилась реальная геометрия проточной части ТВС, учитывающая наличие спиральной навивки на оболочках твэлов (без учета других факторов). Так же как и остальные факторы, учет навивки не оказал большого влияния на распределение выходной температуры ТВС.

Наконец, в расчете № 5 дополнительно к расчету № 2 было проверено влияние энерговыделения в стержнях ОР СУЗ (~1 % мощности ТВС). Как и следовало ожидать, связанное с этим увеличение температуры СВТ в кессоне привело к повышению температуры в зазоре между чехлом кессона и соседними твэлами и, соответственно, к повышению расчетной температуры вблизи кессона: различие с экспериментом существенно уменьшилось и, в среднем, составило приблизительно 14 °С.

Таким образом, сопоставлением расчетных и экспериментальных данных было установлено, что значимыми являются наличие кессона с протоком СВТ через боковые грани его чехла в межтвэльное пространство и энерговыделение в стержнях ОР СУЗ. Это обстоятельство определяет требование к одномерной (потвэльной) модели ТВС, а именно, учет наличия кессона и энерговыделения в ОР СУЗ.

#### Потвэльная модель ТВС

Расчетная модель ТВС на основе РК КОРСАР/ЖМТ представляет собой систему параллельных каналов, в совокупности моделирующих межтвэльное пространство и связанные с ними теплопроводящие конструкции – твэлы, а также каналов, моделирующих пространство, ограниченное чехлом кессона и близлежащими твэлами. С этими каналами связан канал, моделирующий проточную часть кессона со стержнями ОР СУЗ.

С определенной дискретностью расчетные ячейки каждого из каналов гидравлически связаны с ячейками соседних каналов в соответствии с картограммой. Коэффициент гидравлического сопротивления указанных поперечных связей определяется по осредненным гидравлическим характеристикам при поперечном обтекании пучка твэлов (см. рис. 6). Энерговыделение задавалось в твэлах и стержнях ОР СУЗ, так же как для пространственной модели ТВС, по результатам нейтронно-физического расчета с использованием комплекса программ САПФИР РФ&RC.

В качестве граничных условий задавались раздельно расход на входе в «твэльную» часть, равномерный в соответствии с результатами пространственного расчета, и в кессон, полученный также пространственным расчетом, температура СВТ на входе и давление на выходе.

О точности одномерной модели ТВС можно судить по результатам сравнения расчета с теми же экспериментальными данными, которые использовались для сравнения с пространственными расчетами (см. табл. 2). Можно видеть удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных – расхождение между ними не превышает  $14\,^{\circ}$ С или по отношению к величине нагрева СВТ в ТВС –  $10\,^{\circ}$ М.

Таблица 2 Расчетные и экспериментальные значения температуры в точках измерения. Одномерная модель

№ термопары	Т₃ксп, °С	T <sub>pacu</sub> , °C
ТП40	392	391
ТП93	392	392
ТП94	330	326
ТП95	339	325
ТП96	339	326
ТП97	383	391
ТП116	396	392

Таким образом, моделируя любую, в том числе наиболее теплонапряженную ТВС, можно определить детальное температурное состояние а.з., необходимое в расчетных обоснованиях безопасности установки.

#### Выводы

1. По результатам моделирования пространственной гидродинамики установлены основные факторы, определяющие неравномерность поля температуры в выходном сечении а.з. ППУ стенда КМ-1. Наибольшее влияние оказывают кессоны ОР СУЗ с протоком СВТ через боковые грани их чехлов в межтвэльное пространство.

- 2. Пространственными расчетами термогидродинамических процессов обоснована возможность моделирования теплогидравлики ТВС в одномерном приближении.
- 3. Показана возможность использования результатов испытаний на стенде КМ-1 в части показаний терморешетки на выходе а.з. для валидации контурных кодов.

## Литература

- 1. Современное состояние и перспективы развития реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем / В.В. Лемехов, А.В. Моисеев, М.К. Саркулов [и др.] // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики (V МНТК НИКИЭТ 2018): материалы 5-й междунар. науч.-техн. конф. Москва: НИКИЭТ, 2–5 октября, 2018.
- 2. Расчетные коды нового поколения для новой технологической платформы ядерной энергетики / Л.А. Большов, Н.А. Мосунова, В.Ф. Стрижов, О.В. Шмидт // Атомная энергия. 2016. Т. 120, вып. 6. С. 303—312.
- 3. Интегральный код ЕВКЛИД/V1 для обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем. Часть 2: верификация / В.М. Алипченков, А.В. Болдырев, Д.П. Вепрев, Ю.А. Зейгарник [и др.] // Теплоэнергетика. 2018. № 9. С. 57–72.
- 4. Разработка, верификация и практическое использование расчетного кода КОРСАР/ ЖМТ / С.Н. Волкова, Д.В. Бенедиктов, А.В. Вакарин, И.Г. Данилов, А.В. Мицкевич, А.О. Попов, А.В. Ярушина // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2021. № 2(24). С. 23–34.
- 5. *Гордон Б.Г.* Анализ теплогидравлических обоснований РУ БРЕСТ // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики (V МНТК НИКИЭТ 2018): материалы 5-й междунар. науч.-техн. конф. Москва: НИКИЭТ, 2–5 октября, 2018.
- 6. www.plm.automation.siemens.com
- 7. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975.
- 8. *Иванов А.С.* Модернизация нейтронных библиотек и программы САПФИР\_95, предназначенной для расчета ячеек реактора / А.С. Иванов, А.С. Карпов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2018. Вып. 1. С. 27–34.

УДК 621.039.51 DOI: 10.52069/2414-5726\_2022\_2\_28\_38

# Моделирование потвэльного энерговыделения в нестационарных режимах ВВЭР

В.Г. Артемов, Л.М. Артемова, В.Г. Коротаев, А.Н. Кузнецов

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

#### Аннотация

Представлено описание двух подходов к моделированию потвэльного энерговыделения, реализованных в комплексе программ САПФИР\_95&RC\_ВВЭР — метод суперпозиции микро- и макропотока и мелкосеточный метод, в котором узлы радиальной расчетной сетки в активной зоне совпадают с центрами твэлов ТВС. Мелкосеточный расчет потвэльного энерговыделения проводится с известными распределениями выгорания, температуры топлива и плотности теплоносителя, полученными на основе расчета потвэльного энерговыделения методом суперпозиции. Оба подхода реализованы для решения стационарных и нестационарных задач. При моделировании нестационарных процессов задача решается в комплексе с теплогидравлическим расчетным кодом КОРСАР. Приведены результаты моделирования тестовой задачи, в основу которой положен натурный эксперимент с отключением двух смежных из четырех работающих главных циркуляционных насосов ВВЭР-1000.

**Ключевые слова:** потвэльное энерговыделение, метод суперпозиции, мелкосеточный расчет, динамический режим, сопряженный нейтронно-физический и теплогидравлический расчет.

# Pin by pin simulation of VVER core power distribution under transient conditions

V.G. Artemov, L.M. Artemova, V.G. Korotayev, A.N. Kuznetsov

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

#### **Abstract**

Two approaches to pin-by-pin simulation of core power distribution are described which are implemented in the SAPFIR\_95&RC\_VVER program package. These are the microscopic and macroscopic neutron flux superposition method and fine grid method in which radial grid nodes in the core are coincident with the centers of fuel pins. The pin-by-pin fine grid calculation of the core power distribution uses known burnup, fuel temperature, and coolant density distributions obtained from a pin-by-pin core power calculation with the superposition method. Both approaches are used for solution of steady-state and unsteady-state problems. Unsteady state calculations are coupled with calculations by the KORSAR thermal-hydraulic computer code. Test problem simulation results are presented. The test problem simulates a real experiment where two neighboring pumps of four VVER-1000 main coolant pumps are stopped.

**Key words**: pin-by-pin core power distribution, superposition method, fine-grid calculation, transient, coupled neutronic/thermal-hydraulic calculation.

#### Введение

На протяжении последних трех лет в отделе нейтронно-физических исследований НИТИ им. А.П. Александрова в рамках развития комплекса программ САПФИР 95&RC BBЭР [1]

осуществляется разработка и верификация модуля для проведения нестационарных потвэльных нейтронно-физических расчетов ВВЭР. Итогом этой работы стала разработка методики расчета потвэльного энерговыделения в динамических режимах на основе сопряженных нейтронно-физических и теплогидравлических моделей. Методика реализована на базе комплекса программ КОРСАР-RC [2], разработанного на основе теплогидравлического расчетного кода (РК) КОРСАР/ГП [3].

В стационарных расчетах по КП САПФИР\_95&RC\_ВВЭР реализованы и отработаны два метода расчета потвэльного энерговыделения — метод суперпозиции микро- и макропотока и комбинированный «мелкосеточный» метод (pin-by-pin), в котором узлы радиальной расчетной сетки в активной зоне совпадают с центрами твэлов ТВС. Мелкосеточный расчет проводится с известными распределениями выгорания, температуры топлива и плотности теплоносителя, полученными на основе расчета потвэльного энерговыделения методом суперпозиции, поэтому такой подход получил название комбинированный метод [4].

### Методика расчета потвэльного энерговыделения методом суперпозиции

Методика потвэльного расчета с использованием принципа суперпозиции отрабатывалась при проведении стационарных расчетов с использованием программ САПФИР\_95&RC\_BBЭP [5] и САПФИР\_95&RC\_BBЭP.2 [6].

Приставки «микро-» и «макро-» используются здесь для идентификации нейтронных потоков в моделях программы САПФИР 95.1 и программы RC BBЭР соответственно.

В рамках разработанного подхода при расчете конкретного аварийного режима последовательно выполняются следующие операции.

В процессе подготовки нейтронно-физических характеристик ТВС программа САПФИР\_95.1, учитывая особенности конструкции ТВС, рассчитывает плотность потока нейтронов (далее, для краткости, поток нейтронов) в каждом твэле на основе решения уравнения переноса нейтронов в многогрупповом приближении. С использованием вычисленного потока нейтронов рассчитываются массивы относительных распределений скоростей деления в твэлах.

В программном блоке расчета нейтронной кинетики RC\_BBЭР решается уравнение диффузии нейтронов для всей активной зоны. Плотность потока нейтронов рассчитывается на конечно-разностной сетке с 6-ю, 24-я или 96-ю узлами на кассету в плане.

Методика суперпозиции микро- и макро- потока позволяет в каждый момент времени восстановить значения энерговыделения в твэлах ТВС в динамическом процессе на основе вычисленных значений потоков нейтронов в реакторном расчете и рассчитанных заранее с использованием программы САПФИР\_95.1 относительных распределений скоростей деления в твэлах. Алгоритм основан на предположении, что распределение потока нейтронов в твэле в каждый момент времени можно представить в виде суперпозиции микро- и макро- полей:

$$\Phi_i^g = \varphi_i^g F_i^G, \tag{1}$$

где i — номер твэла;

G – номер макрогруппы;

g – номера микрогрупп, входящих в макрогруппу G;

 $\varphi_{i}^{g}$  — микропоток группы g в *i*-м твэле (нормированное распределение);

 $F_i^G$  – макропоток группы G в месте расположения i-го твэла.

В таком предположении энерговыделение в твэлах на высоте z определяется из соотношения:

$$Q_i(z) = \sum_G F_i^G(z) \sum_{fi}^G SF_i^G, \qquad (2)$$

где  $F_i^G$ ,  $\Sigma_{fi}^G$  — макропоток и сечение деления в группе G в месте расположения i-го твэла;

 $SF_{i}^{\ G}$  — относительные значения скоростей деления в i-м твэле в группе G в «бесконечной» решетке ячеек.  $SF_{i}^{\ G}$  рассчитываются по формулам:

$$SF_i^G = \left(\sum_{g \in G} \phi_i^g \Sigma_{fi}^g\right) / \left(\frac{1}{V} \sum_i \sum_{g \in G} \phi_i^g \Sigma_{fi}^g v_i\right),\tag{3}$$

где V – объем расчетной ячейки;

 $v_i$  – объем *i*-го твэла;  $\varphi_i^g$ ;

 $\Sigma^g_{fi}$  — микропоток и сечение деления в группе g в i-м твэле.

Значения макропараметров — потока нейтронов в месте расположения твэла  $F_i^G$  и сечения деления  $\Sigma_{fi}^G$  в местах расположения твэлов вычисляются путем линейной интерполяции по значениям, полученным в расчетных узлах ячейки ТВС (6, 24 или 96 узлов на ячейку) при решении уравнения диффузии нейтронов в программе RC\_BBЭР.

Относительные значения скоростей реакций деления в твэлах  $SF_i^G$  рассчитываются программой САПФИР\_95.1 одновременно с малогрупповыми константами. Они зависят от тех же, что и константы, параметров состояния расчетной ячейки — энерговыработки  $\Psi$ , плотности теплоносителя  $\mathcal{I}_{H_2O}$ , концентрации борной кислоты  $C_{H_3BO_3}$  и температуры топлива  $T_u$ . Для всех наборов опорных значений параметров состояния для всех топливных ячеек, моделирующих ТВС, вычисляются матрицы скоростей реакций деления в твэлах  $SF_i^G(\psi, \gamma_{H_2O}, C_{H_3BO_3}, T_u)$ , из которых формируется двоичный архив на внешнем носителе.

В стационарных расчетах значения плотности теплоносителя  $\gamma_{H_2O}$  и температуры топлива  $T_u$  рассчитываются стационарным теплогидравлическим блоком программы RC. В случае нестационарного сопряженного расчета эти значения вычисляются по программе КОРСАР и передаются в программу RC. С использованием этих значений путем линейной интерполяции между опорными значениями параметров в каждом расчетном слое вычисляются функционалы  $SF_i^G(z,t)$  и энерговыделение в твэлах TBC:

$$Q_{i}(\psi, \gamma_{H_{2}O}, C_{H_{3}BO_{3}}, T, z, t) = \sum_{G} F_{i}^{G}(\psi, \gamma_{H_{2}O}, C_{H_{3}BO_{3}}, T, z, t) \Sigma_{fi}^{G}(\psi, \gamma_{H_{2}O}, C_{H_{3}BO_{3}}, T, z, t) SF_{i}^{G}(\psi, \gamma_{H_{2}O}, C_{H_{3}BO_{3}}, T, z, t) .$$
(4)

Полная мощность i-го твэла вычисляется суммированием  $Q_i(z)$  по высоте:

$$Q_i = \sum_{i} Q_i(z_j) \Delta z_j . \tag{5}$$

### Комбинированный метод расчета потвэльного энерговыделения

Методика потвэльного расчета с использованием комбинированного метода отрабатыва-

лась при проведении стационарных расчетов с использованием программы CAПФИР\_95&RC\_ micro [7].

Расчет потвэльного энерговыделения комбинированным методом — это мелкосеточный метод (pin-by-pin) расчета в диффузионном приближении, который выполняется на конечно-разностной сетке, узлы которой в радиальном направлении совпадают с центрами твэлов ТВС в активной зоне. В комбинированном методе подготовка малогрупповых констант также проводится с использованием программы САПФИР\_95 на основе решения уравнения переноса в бесконечной решетке ТВС методом ВПС. При этом для различных конструкционных элементов ТВС (твэлов, твэгов, ПЭЛов и т.д.) или отражателя (стальные конструкции, технологические каналы с водой) готовятся свои наборы диффузионных констант, которые формируют расчетную модель активной зоны. В алгоритмах программы RC реализована возможность решения стационарного и нестационарного уравнения диффузии нейтронов в потвэльном приближении.

В стационарных расчетах теплогидравлические параметры обратной связи рассчитываются заранее на основе потвэльных расчетов, выполненных с помощью метода суперпозиции. Моделирование нестационарных режимов проводится в сопряженном расчете по комплексу КОРСАР-RC.

## Схема сопряженного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета

Совместный нейтронно-физический и теплогидравлический расчет проводится с помощью комплекса программ КОРСАР-RC, состоящего из двух программ. Программа теплогидравлического расчета подготовлена на основе РК КОРСАР/ГП. Нейтронно-физический расчет выполняется программой RCkin, в котором реализованы обе методики потвэльного расчета. Обе программы имеют собственные файлы входных данных и запускаются параллельно на отдельных процессах. В процессе решения задачи обмен данными между процессами осуществляется с помощью стандарта MPI (Message Passing Interface). Ведущей является теплогидравлическая программа, формирующая команды для нейтронно-физической программы, которая, в свою очередь, передает ведущей информацию о своем состоянии в виде кода ошибки.

В ходе совместного расчета теплогидравлическая (ТГ) и нейтронно-физическая (НФ) программы проводят четыре типа обменов информацией. Первые два типа обменов носят подготовительный характер и осуществляются до начала основного расчетного цикла решения задачи в обоих кодах. В них идет синхронизация параметров модели ТГ и НФ программы и согласование параметров исходного состояния по распределению начальной мощности (с выделением доли остаточного тепловыделения) и распределению выгорания (необходимого для расчета энерговыделения в RCkin и температуры топлива в КОРСАР). Данные распределения являются входными параметрами, полученными из квазистационарного нейтроннофизического расчета с учетом предыстории работы реактора. Третий и четвертый тип обменов производится в основном цикле расчетов. В третьем обмене ТГ программа передает в НФ программу рассчитанные теплофизические параметры обратной связи и положение ОР. В ходе 4-го обмена на основе полученных данных НФ программа вычисляет мощности ТВС (твэл) и передает их в ТГ программу. Цикл обменов 3 и 4 повторяется до завершения расчета режима.

При моделировании теплогидравлики ТВС предусматривается два уровня детализации: эквивалентный (т.е. в приближении эффективного твэла) – для основной массы ТВС активной зоны и поячейковый – для ТВС, выделенных для потвэльного моделирования. В первом случае на каждом временном шаге теплогидравлического расчета в нейтронно-физический модуль передаются средние для ТВС значения плотности теплоносителя, концентрации борной кис-

лоты и температуры топлива. Для выделенных ТВС выполняется теплогидравлический расчет в поячейковом приближении, с учетом влияния на параметры теплоносителя потвэльного распределения энерговыделения (при этом возможен учет поперечных связей между ячейками).

Основой программной реализации комплекса КОРСАР-RC является системный теплогидравлический расчетный код (РК) КОРСАР/ГП, на базе которого подготовлен компонент, выполняющий нестационарный теплогидравлический расчет. В качестве компонента, выполняющего нестационарный нейтронно-физический расчет, используется программа RCkin. В нестационарных расчетах теплогидравлические параметры обратных связей как для макрорасчета, так и для микрорасчета поставляются кодом КОРСАР/ГП.

Технология сопряженного нестационарного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета с использованием двух методов потвэльного расчета энерговыделения отработана и проверена при моделировании потвэльного энерговыделения в международной тестовой задаче "Benchmark Rostov 2" [8].

В данной статье приведены результаты верификации методов расчета потвэльного энерговыделения в нестационарном режиме при моделировании динамического испытания с отключением двух из четырех ГЦН, проведенного на 6-ом блоке АЭС «Козлодуй» [9].

## Результаты расчета

Испытание было проведено на мощности 90 % N<sub>НОМ</sub> на момент кампании 172 эффективных суток первой топливной загрузки 6-го блока АЭС «Козлодуй». В исходном состоянии перед началом испытаний регулирующая 10-я группа находилась в положении 78 % от низа активной зоны. В начальный момент испытания были отключены ГЦН первой и второй петли. После этого регулятор ограничения мощности (РОМ) начал разгружать реактор. По факту отключения двух из четырех ГЦН на мощности выше 75 % N<sub>НОМ</sub> сработал сигнал на ускоренную разгрузку блока (УРБ), и в активную зону (а.з.) была введена первая группа органов регулирования (ОР) системы управления защитой СУЗ.

Дальнейшая разгрузка мощности до уровня менее 45 % от номинальной происходила за счет работы РОМ, введением регулирующей 10-й группы, после чего реакторная установка (РУ) была переведена в режим поддержания заданной мощности.

Схема проведения расчета состояла из следующих этапов:

- подготовка малогрупповых диффузионных констант для расчета методом подготовка расчетных моделей для первой загрузки 6-го блока АЭС «Козлодуй» для обоих методик расчета для программ RC\_BBЭР и RC\_micro соответственно;
- расчет первой кампании 6-го блока АЭС «Козлодуй» с подбором критической концентрации борной кислоты в теплоносителе по программе RC\_BBЭP;
- расчет потвэльного энерговыделения в заданные моменты кампании методом суперпозиции по программе RC BBЭP;
- подготовка на основе расчета потвэльного энерговыделения методом суперпозиции архивов потвэльного выгорания, а также архивов плотности теплоносителя и температуры топлива для стационарного мелкосеточного метода расчета;
- проведение динамического сопряженного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета режима от момента, соответствующего началу эксперимента с

расчетом потвэльного энерговыделения методом суперпозиции и мелкосеточным методом.

Результаты моделирования показаний датчиков аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) в сравнении с экспериментальными данными показаны на рис. 1.

В качестве экспериментальных значений рассматриваются два комплекта АКНП, каждый из которых включает три измерительных канала, расположенных равномерно по азимуту в соответствии с проектной документацией. Расчет среднего значения мощности по каждому из комплектов АКНП включает в себя учет постоянной времени измерения нейтронного потока и усреднение по трем каналам.

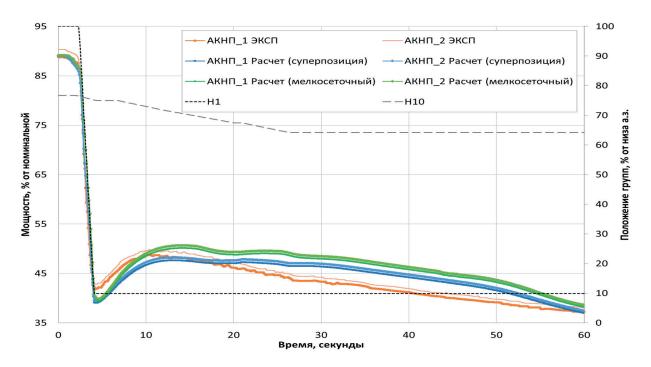


Рис. 1. Результат расчета показаний датчиков АКНП

Изменение положения регулирующих групп в процессе нестационарного режима моделировалось в соответствии с данными измерений.

Результаты расчетов качественно воспроизводят все характерные особенности режима: быстрое снижение мощности в результате введения первой группы по сигналу УРБ, подъем мощности за счет обратных связей, стабилизация мощности путем перемещения рабочей группы  $\mathbb{N}$  10.

На рис. 2—4 представлены результаты сравнения покассетного энерговыделения, полученного при расчете методом суперпозиции (макро-расчет) и мелкосеточным методом (микро-расчет). Результаты расчетов полей энерговыделения приведены для трех моментов режима:

- 0 секунд начальное состояние до введения возмущения;
- 4 секунды момент полного погружения первой группы;
- 60 секунд стабилизация уровня мощности.

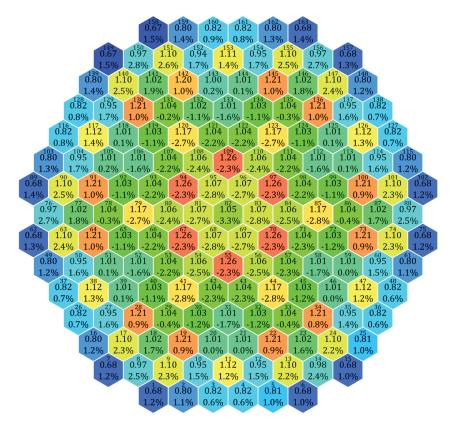


Рис. 2. Начальное состояние. Отклонение относительного распределения энерговыделения в активной зоне (№ ТВС/микро-расчет/отклонение). Отклонение в максимально напряженной ТВС № 55 - 2.3 %. Среднеквадратичное отклонение -1.7 %

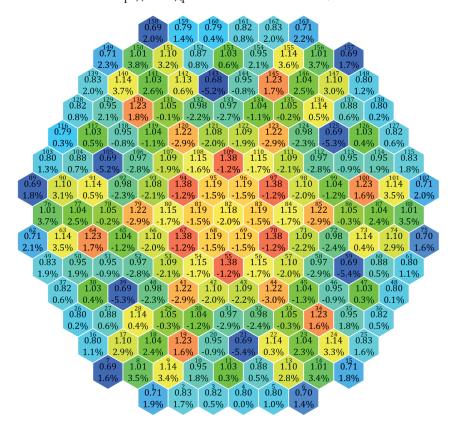


Рис. 3. Момент времени T=4 с. Отклонение относительного распределения энерговыделения в активной зоне (№ ТВС/микро-расчет/отклонение. Отклонение в максимально напряженной ТВС № 55 - 1.2 %. Среднеквадратичное отклонение - 2.2 %

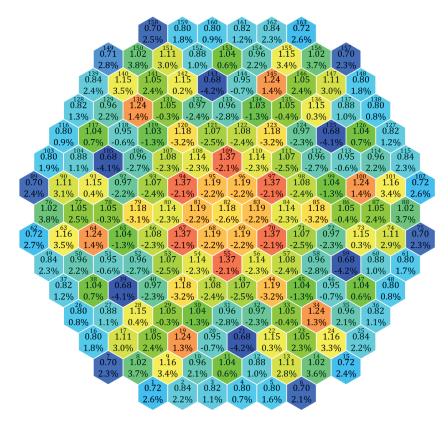


Рис. 4. Момент времени T=60 с. Отклонение относительного распределения энерговыделения в активной зоне (№ ТВС/микро-расчет/отклонение. Отклонение в максимально напряженной ТВС № 70 -2.1 %. Среднеквадратичное отклонение -2.3 %

В рассмотренном динамическом режиме изменение распределения относительного энерговыделения в активной зоне, в первую очередь, связано с введением группы № 1 по сигналу УРБ. Этот фактор оказывает определяющие влияние и на перераспределение потвэльного энерговыделения.

На рис. 5 показана общая картина изменения относительного потвэльного энерговыделения в активной зоне до (начало режима) и после введения группы № 1 (момент времени T = 4 с).

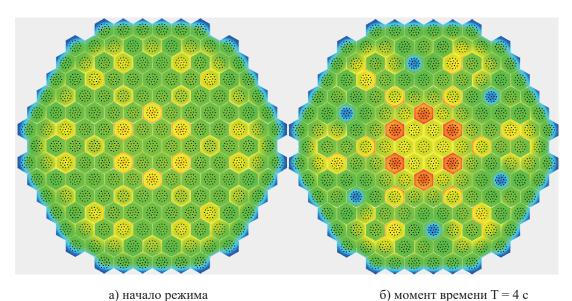


Рис. 5. Относительное потвэльное распределение энерговыделения в активной зоне до и после введения группы OP СУЗ № 1

Наиболее сильно изменяется распределение относительного потвэльного энерговыделения в ТВС (например, № 143), в которых перемещаются стержни первой группы ОР СУЗ.

На рис. 6 показаны графики изменения мощности твэлов в центре и на периферии ТВС № 143 в сравнении с аналогичными данными для твэлов рядом стоящей ТВС № 144.

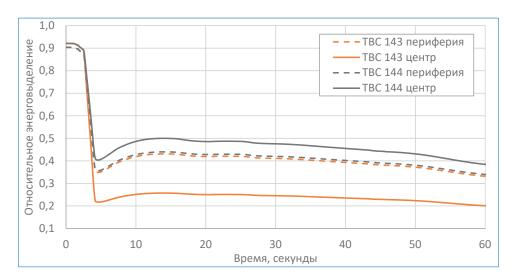


Рис. 6. Изменение относительной мощности твэл в кассетах № 143 и № 144

На рис. 7–8 представлены результаты сравнения распределения относительного потвэльного энерговыделения в ТВС № 143, полученные методом суперпозиции и прямым потвэльным расчетом для начала режима и для момента полного погружения стержней первой группы ОР СУЗ.

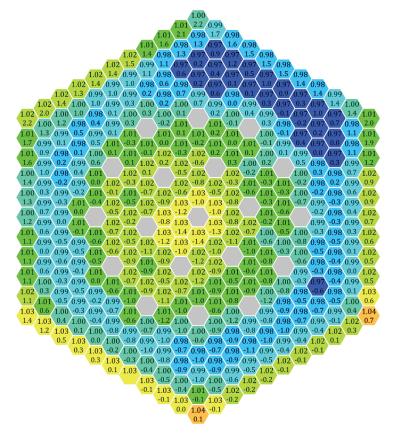


Рис. 7. Начальное состояние. Отклонение относительного распределения энерговыделения в ТВС № 143 (микро-расчет/относительное отклонение, %). Отклонение в максимально напряженном твэле -0.1 %. Среднеквадратичное отклонение -0.8 %

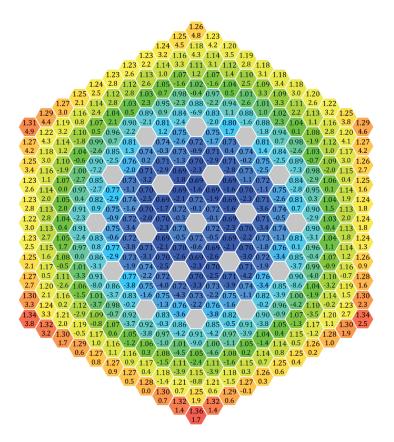


Рис. 8. Момент времени T=4 с. Отклонение относительного распределения энерговыделения в ТВС № 143 (микро-расчет/относительное отклонение, %). Отклонение в максимально напряженном твэле 1.7 %. Среднеквадратичное отклонение -2.6 %

Сравнение результатов расчетов энерговыделения показывает, что наибольшие различия в оценке энерговыделения наблюдаются в ТВС, в которой перемещаются стержни ОР СУЗ, что вполне предсказуемо, поскольку именно в этих ТВС наиболее ярко проявляется различие между прямым потвэльным расчетом и алгоритмом, основанным на методике восстановления. При этом погрешности обоих алгоритмов имеют разную природу. В методе восстановления она определяется детальностью прорисовки макрохода плотности потока нейтронов по ТВС, а в прямом потвэльном расчете — погрешностью диффузионного приближения в областях с существенными неоднородностями на границах ячеек, в которых движутся стержни ОР СУЗ. С учетом сказанного, различия между расчетами, выполненными с использованием обеих методик, можно рассматривать как оценку методической погрешности потвэльного энерговыделения расчета снизу. Верификация расчетных моделей в стационарных состояниях показывает, что с реперными результатами расчета, выполненными методом Монте-Карло, лучше согласуются результаты прямого потвэльного расчета.

#### Заключение

В статье представлена методика сопряженного трехмерного потвэльного нейтронно-физического и теплогидравлического расчета, основанного на разработанных в ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова» КП САПФИР-RC (нейтронная физика) и ПК КОРСАР (теплогидравлика).

Модели расчета потвэльного энерговыделения реализованы в двух вариантах: на основе метода суперпозиции микро- и макро-потока нейтронов и на основе прямого потвэльного расчета. При проведении прямого потвэльного нестационарного расчета использована комбинированная схема, включающая расчет потвэльного выгорания на основе метода суперпозиции.

Для апробации сопряженных нейтронно-физических и теплогидравлических моделей, подготовленных на базе КП САПФИР-RC и ПК КОРСАР использована тестовая задача с отключением двух смежных из четырёх работающих ГЦН, подготовленная на основе реального режима, проведенного на 6-ом блоке АЭС «Козлодуй».

Сопоставление результатов расчетов с использованием двух методик с разной природой методической погрешности дает возможность оценить её величину снизу для расчетов потвэльного энерговыделения в динамических режимах.

## Литературы

- 1. Развитие алгоритмов комплекса программ САПФИ\_95&RC\_ВВЭР для обоснования нейтронно-физических характеристик реакторов различных типов / В.Г. Артемов, Л.М. Артёмова, А.С. Иванов, А.С. Карпов, В.Г. Коротаев, А.Н. Кузнецов // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно технический сборник. − 2021. − № 2 (24). − С. 9–24.
- 2. Развитие алгоритмов и методов расчета потвэльного энерговыделения в КП САПФИР\_95&RC\_ВВЭР, / В.Г. Артемов, Л. М. Артемова, А.С. Иванов, В.Г. Коротаев, А. Н. Кузнецов, А.В. Пискарев // ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»: годовой отчет 2019. Сосновый Бор: ФГУП НИТИ, 2020. С. 73–78.
- 3. КОРСАР/ГП: аттестационный паспорт ПС № 537. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 28.12.2021.
- 4. Комбинированный метод расчета потвэльного энерговыделения в комплексе программ САПФИР\_95&RC\_ВВЭР / В.Г. Артемов, А.С. Иванов, А.Н. Кузнецов, Ю.П. Шемаев // ВАНТ. Серия: ЯДЕРНО-РЕАКТОРНЫЕ КОНСТАНТЫ. 2014. В. 3. С. 85–89.
- 5. САПФИР\_95&RC\_ВВЭР: аттестационный паспорт программного средства № 388.— Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 16.12.2015.
- 6. САПФИР\_95&RC\_ВВЭР.2: аттестационный паспорт программного средства № 321. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 18.04.2013.
- 7. САПФИР\_95&RC\_micro: аттестационный паспорт программного средства № 496. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 19.12.2019.
- 8. Результаты моделирования тестовой задачи «BENCHMARK ROSTOV 2» с использованием комплекса программ САФПИР\_95&RC\_BBЭР и КОРСАР // В.Г. Артемов, Л. М. Артемова, В.Г. Коротаев, А. Н. Кузнецов // ВАНТ. Серия: ЯДЕРНО-РЕАКТОРНЫЕ КОНСТАНТЫ. 2019. В. 4. С. 118–127.
- 9. Разработка объединенного комплекса ДКМ для расчета локальных параметров в активной зоне ВВЭР с учетом трехмерной кинетики / Г.В. Алехин, Ю.В. Беляев, С.И. Зайцев, М.А. Быков, Ю.Н. Надинский, О.В. Кудрявцев // ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС С ВВЭР: 3-я научно-техническая конференция; труды конференции. Подольск, 26–30 мая 2003. Т. 2. С. 25–49.

УДК 621.039.51

# DOI: 10.52069/2414-5726\_2022\_2\_28\_49

# Сопоставление многогрупповой и малогрупповой нейтронно-физических моделей малогабаритного газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов

В.Г. Артемов, Н.С. Нерсесян

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

#### Аннотация

Приведено описание многогрупповой и малогрупповой нейтронно-физических моделей малогабаритного газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов, подготовленных на базе комплекса программ САПФИР\_РФ&RC. Многогрупповая модель основана на решении уравнения диффузии нейтронов в реакторе в многогрупповом приближении, а в малогрупповой модели используется двухгрупповое приближение. На основе сопоставления с результатами реперного расчета методом Монте-Карло приведено обоснование выбора целесообразного числа энергетических групп нейтронов, обеспечивающих достаточную точность исследовательских расчетов в многогрупповой модели. Рассмотрена возможность использования разрывных граничных условий на границе активной зоны и отражателя для корректировки решения уравнения диффузии в многогрупповом приближении. Приведено описание и обоснование двухгруппового метода расчета, основанного на последовательном разделении пространственных и энергетических переменных при подготовке двухгрупповых констант и показана его эффективность и приемлемость при проведении расчетов нейтронно-физических характеристик малогабаритного газоохлаждаемого реактора на быстрых нейтронах.

**Ключевые слова:** малогабаритный газоохлаждаемый реактор с быстрым спектром нейтронов, активная зона, отражатель, многогрупповая и малогрупповая модель, целесообразное число энергетических групп нейтронов, разрывные граничные условия, реперные расчеты методом Монте-Карло, комплекс программ САПФИР\_РФ&RC, MCU-FR.

# Comparison between multi-group and few-group neutronic models of small gas-cooled fast reactors

V.G. Artemov, N.S. Nersesian

FSUE "Alexandrov NITI", Sosnovy Bor, Russia

#### **Abstract**

The paper describes multi-group and few-group neutronic models of a small gas-cooled fast reactor. The models are prepared using the SAPFIR\_RF&RC program package. The multi-group model is based on the solution of neutron diffusion equation in a multi-group approach. A two-group approach is used in the few-group model. Based on the comparison with benchmark Monte Carlo calculations, the authors justify the choice of an appropriate number of neutron energy groups to ensure adequate accuracy of research calculations with the multi-group model. The possibility is discussed of using discontinuous boundary conditions at the core-reflector interface for correcting the solution of the neutron diffusion equation in the multi-group approach. The two-group calculation method is described. The method is to successively separate space and energy variables when preparing two-group constants. The efficiency of the method is demonstrated in calculating the neutron characteristics of a small gas-cooled fast reactor.

**Key words**: small gas-cooled fast reactor, core, reflector, multi-group and few-group model, appropriate number of neutron energy groups, discontinuous boundary conditions, benchmark Monte Carlo calculations, SAPFIR\_RF&RC, MCU-FR program package.

#### Введение

Данная статья является развитием работ [1-3] по обоснованию применения комплекса программ (КП) САПФИР\_РФ&RС для расчета нейтронно-физических характеристик (НФХ) активной зоны малогабаритного газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов. Известно, что такие реакторы из-за малых размеров активной зоны и сильного влияния бокового отражателя обладают переменным по объёму активной зоны спектром нейтронов [4].

Для учета этих факторов в настоящей работе сравниваются два подхода, используемых при подготовке инженерных моделей реактора, основанных на решении уравнения диффузии нейтронов в многогрупповом и малогрупповом (двухгрупповом) приближении. Расчет спектра нейтронов и подготовка констант для обоих вариантов уравнения диффузии нейтронов проведены по программе САПФИР\_РФ с использованием многогрупповой рабочей библиотеки, подготовленной на основе файлов оцененных ядерных данных библиотеки РОСФОНД [5]. Трехмерная многогрупповая и двухгрупповая модели для расчета пространственного распределения нейтронов в стационарных и нестационарных состояниях реактора готовились на основе программы RC.

Принципиальное различие двух подходов заключается в том, на какой стадии расчета  $H\Phi X$  моделируется энергетическая зависимость плотности потока нейтронов (ППН). При использовании многогрупповой модели энергетическая зависимость ППН моделируется традиционным для быстрых реакторов способом на стадии трехмерного расчета реактора, а в двухгрупповой модели — на этапе подготовки эффективных двухгрупповых констант.

В настоящей статье приведены результаты исследовательских расчетов для обоснования методов, используемых при подготовке многогрупповой и двухгрупповой моделей, выбора целесообразного числа энергетических групп нейтронов во многогрупповой модели, выбора границы групп в двухгрупповой модели.

# Особенности подготовки констант с использованием программы САПФИР РФ для модели быстрого малогабаритного реактора

Особенность эффективной двухгрупповой методики подготовки констант, представленная в работе [1], заключается в способе расчета спектра нейтронов по программе САПФИР РФ.

Последовательность расчетов при этом следующая:

- с использованием двухмерной модели фрагмента активной зоны и бокового отражателя по программе САПФИР\_РФ проводится расчет спектра нейтронов;
- определяются малогрупповые сечения в выбранных эффективных зонах (активная зона и отражатель разбиваются на эффективные зоны).

Пространственные распределения нейтронов и энерговыделения определяются на основе решения уравнения диффузии нейтронов в малогрупповом приближении. Применение такой схемы расчетов (последовательного разделения пространственных и энергетических переменных) позволило создать эффективную двухгрупповую трехмерную расчетную модель, в которой учитываются особенности формирования энергетического спектра нейтронов в малогабаритном реакторе, в котором на спектр нейтронов значительное влияние оказывает утечка (перетечка) нейтронов между зонами. В результате образуется переменный по объему реактора энергетический спектр нейтронов, который сказывается также и на пространственном распределении энерговыделения в активной зоне [4].

При подготовке малогрупповых констант по программе САПФИР\_РФ активная зона и

отражатель разбиваются на эффективные зоны таким образом, чтобы спектр нейтронов и малогрупповые константы в пределах эффективной зоны можно было принять постоянными.

На рис. 1 на примере одной из тестовых задач, имитирующих 1/12 часть активной зоны и отражателя, проиллюстрирована принятая в модели программы САПФИР\_РФ схема разбиения активной зоны и отражателя на эффективные зоны с целью обеспечения необходимой точности расчета спектра нейтронов в эффективных зонах, для которых рассчитаны малогрупповые константы.

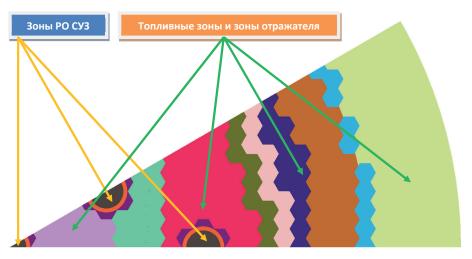


Рис. 1. Схема разбиения сектора симметрии 1/12 части активной зоны и отражателя на эффективные зоны

При подготовке расчетной модели в программе RC активная зона, отражатель и рабочие органы (PO) системы управления и защиты (СУЗ) моделируются шестигранными призмами с шагом твэлов в активной зоне. Свойства материалов шестигранных призм заданы так, чтобы сохранить массу и объем веществ. На рис. 2 схематически представлена использованная в расчетной модели программы RC картограмма активной зоны и отражателя, описанная шестигранными ячейками с шагом расположения твэлов.

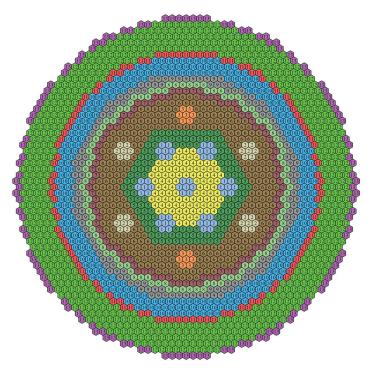


Рис. 2. Расчетная модель активной зоны и отражателя программы RC

Стержни РО СУЗ на картограмме (см. рис. 2) также представлены шестигранными ячейками (ячейки с номерами 1 соответствуют семи стержням компенсации реактивности (ЦКР, 1КР,..., 6КР), ячейки с номерами 2 – четырем стержням аварийной защиты (1АЗ,...4АЗ), ячейки с номерами 3 – двум стержням автоматических регуляторов (1АР, 2АР)).

Для каждой из указанных на рис. 1 эффективных зон по программе САПФИР $_{-}$  РФ подготовлены малогрупповые константы, которые затем были использованы при расчете по программе RC.

Для обоснования применения малогруппового метода при подготовке двухгрупповой модели были проведены исследовательские расчеты, в которых сопоставлялись результаты (коэффициента размножения, эффективности РО СУЗ и потвэльного энерговыделения), полученные многогрупповым и малогрупповым методами с результатами расчета реперной Монте-Карловской программы [6].

На двухмерной тестовой задаче с извлеченными из активная зона РО СУЗ были проведены 26 групповые расчеты ППН в различных областях из активной зоны и отражателя, а результаты сопоставления между программами САПФИР РФ и MCU-FR приведены на рис. 3 и 4.

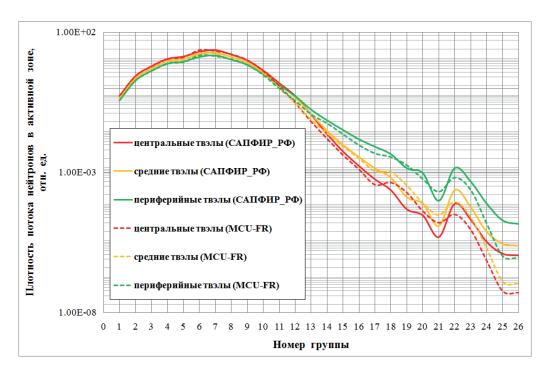


Рис. 3. Сравнение распределения плотности потока нейтронов в активной зоне по энергетическим группам для двухмерной модели между программами САПФИР\_РФ и MCU-FR

Из графиков, приведенных на рис. 3 и 4, видно взаимное влияние спектров нейтронов в активной зоне и отражателе. В активной зоне в периферийных слоях, граничащих с отражателем, спектр становится мягче (см. рис. 3), а в первом и средних слоях отражателя спектр существенно более жесткий, чем в периферийных (см. рис. 4). Результаты расчетов, полученные с использованием модели программы САПФИР\_РФ, приведенной на рис. 1, достаточно хорошо воспроизводят характер изменения энергетической зависимости ППН в различных областях активной зоны и отражателя (см. рис. 3 и 4) в сравнении с результатами реперных расчетов МСU-FR [6].

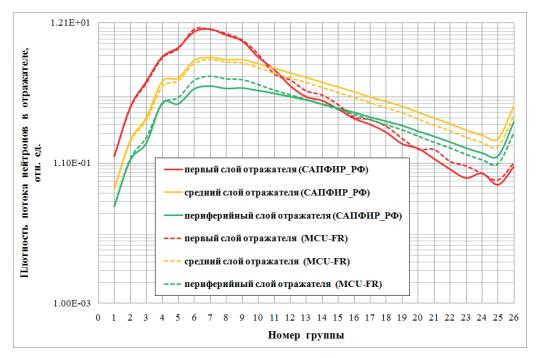


Рис. 4. Сравнение распределения плотности потока нейтронов в отражателе по энергетическим группам для двухмерной модели между программами САПФИР\_РФ и MCU-FR

Интегральную точность модели характеризует значение коэффициента размножения и эффективность РО СУЗ. Для двухмерной модели малогабаритного газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов проведены расчеты с использованием программы САПФИР\_РФ и MCU-FR. В двухмерной расчетной модели программы MCU-FR для описания переноса нейтронов в активной зоне и отражателе моделировались истории 1.6 млрд. частиц, что обеспечило статистическую оценку стандартного отклонения при расчете  $K_{\rm 3фф}$  менее  $3\cdot10^{-5}$ . Результаты расчетов  $K_{\rm 3фф}$  с извлеченными и введенными РО СУЗ представлены в табл. 1.

Программа	К <sub>эфф</sub> без РО СУЗ	Отклонение, %	К <sub>эфф</sub> с РО СУЗ	Отклонение, %
САПФИР_РФ	1.25159	0.31	1.04828	0.01
MCU-FR	1.24777	_	1.04819	_

При сопоставлении результатов расчетов  $K_{_{9\varphi\varphi}}$  видно, что результаты программы САПФИР\_РФ хорошо согласуются с результатами реперного расчета программы MCU-FR, а это в свою очередь, является подтверждением корректности проведенной работы по разбиению активной зоны и отражателя на эффективные зоны (см. рис. 1). В табл. 2 приведены результаты расчетов эффективности РО СУЗ.

Программа	Положение РО СУЗ	Эффективность, %	Отклонение, %
САПФИР_РФ	введены	15.50	1.55
MCU-FR	введены	15.26	_

Представленные в табл. 2 результаты дают согласие в оценке эффективности РО СУЗ между программами САПФИР\_РФ и MCU-FR. Вполне удовлетворительное согласование с реперным расчетом получено и при сопоставлении результатов расчета потвэльного энерговыделения (см. табл. 3) по программе САПФИР\_РФ с результатами, полученными по MCU-FR.

.  $\ensuremath{\textit{Таблица 3}}$  Результаты сравнения расчетов потвэльного энерговыделения с MCU-FR

Положение РО СУЗ	Стандартное	Отклонение энерговыделения, %		
Положение РО Суз	Стандартное отклонение, %	завышение	занижение	
Извлечены	2.7	5.26	-5.45	
Введены	1.6	3.23	-4.08	

Отличие от реперного расчета может быть связано с погрешностью расчета ППН в расчетной модели САПФИР\_РФ при выбранном разбиении на регистрационные зоны, из которых впоследствии были образованы эффективные зоны и в которых в методе вероятности первых столкновений используется приближение плоского источника нейтронов. Однако такая точность вполне достаточна для спектральных расчетов, поскольку при свертке сечений ППН присутствует и в числителе, и в знаменателе.

Представленные на рис. 3, 4 и в табл. 1, 2 и 3 результаты расчетов подтверждают необходимое качество модели программы САПРФИР\_РФ при расчете спектра нейтронов и подготовке констант для малогабаритного газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов.

Подготовка библиотеки констант для многогрупповой модели, проводилась также с использованием программы САПФИР\_РФ, но, в отличие от описанной выше схемы, константы для отдельных ячеек активной зоны рассчитывались по асимптотическому спектру нейтронов, без учета влияния соседних областей. При этом константы для отражателя и РО СУЗ рассчитывались по той же схеме, как и для малогрупповой эффективной модели.

## Многогрупповая модель

Для расчета НФХ активной зоны реактора использовалась программа RC, которая позволяет решать стационарное и нестационарное уравнение диффузии нейтронов в трехмерном многогрупповом приближении. Программа RC решает конечно-разностным методом уравнение диффузии нейтронов с использованием групповых констант, подготовленных программой САПФИР\_РФ. Ячейки конечно-разностной схемы имеют вид правильных шестигранных призм (см. рис. 2).

#### Обоснование выбора числа групп

С использованием групповых констант, подготовленных многогрупповым методом по программе САПРФИР\_РФ, были проведены трехмерные расчеты энерговыделения с извлеченными из активной зоны РО СУЗ в многогрупповом диффузионном приближении по программе RC для выбора целесообразного числа групп.

В табл. 4 приведено сопоставление результатов расчетов потвэльного энерговыделения между программами RC и MCU-FR.

 $\it Taблица~4$   $\it Peзультаты сравнения расчетов потвэльного энерговыделения с MCU-FR$ 

Число макрогрупп программы RC	Номера энергетических групп, объединенных в макрогруппы	Стандартное	Отклонение энерговыделения, %	
программы кс	ооъединенных в макрогруппы	в макрогруппы отклонение, %		занижение
2	(1-10), (11-26)	2.6	2.73	-10.5
2	(1-12), (13-26)	1.9	2.04	-7.14
2	(1-14), (15-26)	1.5	2.04	-5.95
2	(1-15), (16-26)	1.4	2.04	-4.76
2	(1-16), (17-26)	1.6	2.04	-5.95
3	(1-6), (7-12), (13-26)	2.1	2.80	-7.14
5	(1-4), (5-6), (7-9), (10-12), (13-26)	1.8	2.04	-7.14
9	(1-3), (4)(6) <sup>1</sup> , (7-8), (9), (10), (11-12), (13-26)	1.7	2.04	-5.95
12	(1)(11), (12-26)	1.7	2.04	-5.95
13	(1)(12), (13-26)	1.2	2.04	-4.76
14	(1)(13), (14-26)	0.8	1.87	-3.57
15	(1)(14), (15-26)	0.5	1.09	-1.19
16	(1)(15), (16-26)	0.6	1.20	-1.16
20	(1)(19), (20-26)	0.7	2.41	-1.12
26	(1)(26)	0.7	2.41	-1.12

При рассмотрении результатов, представленных в табл. 4, видно, что результаты расчетов с 15 до 26 группового приближения демонстрируют примерно одинаковые отклонения в полях энерговыделения при сопоставлении с результатами расчетов по MCU-FR. При уменьшении числа групп увеличивается отклонение в оценке потвэльного энерговыделения. В связи с этим, целесообразно проводить расчеты в 15 групповом диффузионном приближении, когда используется многогрупповой метод при подготовке констант.

#### Корректировка граничных условий

Результаты расчетов, полученные по программе RC с использованием 15 групповой модели программы RC, достаточно хорошо воспроизводят характер изменения энерговыделения в активной зоне, однако результаты расчета коэффициента размножения при этом оказались существенно ниже реперных расчетов, что, видимо, является следствием погрешности диффузионного приближения модели RC. Это подтверждают результаты сопоставления между программами RC и MCU-FR энергетического спектра нейтронов в различных радиальных зонах активной зоны и отражателя. Отличие спектра нейтронов, рассчитанного программой RC, наиболее заметно в областях бокового отражателя – в верхних пяти группах наблюдается явное завышение ППН, в нижних группах наблюдаются заниженные значения. Для устранения влияния погрешности диффузионного приближения при расчете энергетического спектра нейтронов в программе RC на границе активной зоны и отражателя  $(r_s)$  использовались разрывные граничные условия для ППН:  $F_{\text{a.s.}}^g(r_s) = k^g F_{\text{отр}}^g(r_s)$ .

Корректирующие коэффициенты  $k^g$  для группового потока нейтронов в отражателе подбирались таким образом, чтобы между программами RC и MCU-FR наблюдалось согласие в оценках коэффициента размножения, полей энерговыделения и энергетического спектра нейтронов.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Разбиение на энергетические группы, представленное в табл. 4, в виде (4)...(6) = (4), (5), (6)

В качестве иллюстрации, на рис. 5, для двухмерной тестовой задачи с извлеченными из активной зоны РО СУЗ, приведены сопоставления с программой MCU-FR распределения ППН 15 групповой модели RC (с корректировкой граничных условий и без) для первого слоя отражателя.

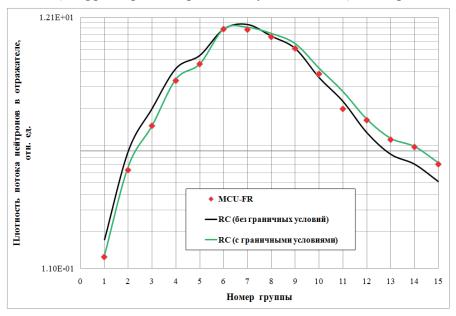


Рис. 5. Сравнение распределения плотности потока нейтронов в первом слое отражателя по энергетическим группам между 15 групповой моделью RC (с граничными условиями и без) и MCU-FR

Применение разрывных граничных условий в 15 групповой модели RC позволило уменьшить отклонение в оценке коэффициента размножения и эффективности PO CУЗ (см. табл. 5 и 6) при сопоставлении с результатами MCU-FR.

Таблица 5 Сравнение результатов расчетов  $K_{_{9\varphi\varphi}}$  между моделями RC и MCU-FR (RC (1) — без корректировки граничных условий, RC (2) — с корректировкой граничных условий)

	15 групповая модель RC			Отклоне	ение, %
Положение РО СУЗ	RC (1)	RC (2)	MCU-FR	$\frac{RC(1)}{MCU - FR}$	$\frac{RC(2)}{MCU - FR}$
Введен ЦКР	0.98286	1.02986	1.03056	-4.63	-0.07
Введены все РО СУЗ	0.86079	0.90359	0.91024	-5.43	-0.73
Извлечены все РО СУЗ	0.99949	1.04663	1.04631	-4.47	0.03

Таблица 6 Сопоставление эффективности РО СУЗ между моделями RC и MCU-FR (RC (1) – без граничных условий, RC (2) – с граничными условиями)

	15 групповая модель RC			Отклоне	ение, %
Положение РО СУЗ	RC (1)	RC (2)	MCU-FR	$\frac{RC(1)}{MCU - FR}$	$\frac{RC(2)}{MCU - FR}$
Введен ЦКР	1.69	1.56	1.46	15.90	6.52
Введены все РО СУЗ	16.12	15.12	14.29	12.84	5.86

На основе проведенных расчетных исследований (см. рис. 5 и табл. 5 и 6) показана необходимость и возможность повышения точности расчета основных НФХ реактора путем применения граничных условия в 15 групповой модели RC.

## Эффективная двухгрупповая модель

#### Обоснование выбора границ групп

Для выбора границ групп при использовании эффективной двухгрупповой модели были проведены трехмерные расчеты реактора с различными вариантами разбиения 26 группового энергетического спектра на две макрогруппы при подготовке констант по программе САПФИР\_РФ. Границы групп, по которым проводилось разбиение, соответствуют значениям по энергиям нейтронов, принятым в библиотеке БНАБ-78 [7]. В табл. 7 приведены результаты сравнения расчетов по программам RC и MCU-FR коэффициента размножения и потвэльного энерговыделения для эффективной двухгрупповой модели с извлеченными из активной зоны PO СУЗ при различном способе разбиения энергетического спектра нейтронов.

Таблица 7  $\begin{tabular}{l} \end{tabular} \begin{tabular}{l} \end{tabular} \begin{tabular}{l}$ 

_	Номера энергетических		Отклонение,	Отклонени	е энерговыдел	ıения, %
Программа	рограмма групп объединенных в макрогруппы	$K_{_{9\varphi\varphi}}$	%	Стандартное отклонение	Завышение	Занижение
	(1-6), (7-26)	1.03155	-1.41	1.8	6.90	-2.15
	(1-8), (9-26)	1.02766	-1.78	1.3	4.60	-2.15
	(1-9), (10-26)	1.03034	-1.53	1.1	4.60	-2.15
	(1-10), (11-26)	1.03385	-1.19	0.9	3.45	-2.15
RC	(1-12), (13-26)	1.04548	-0.08	0.9	2.38	-1.09
RC	(1-14), (15-26)	1.05555	0.88	1.2	3.57	-1.90
	(1-15), (16-26)	1.05903	1.22	1.3	3.57	-1.90
	(1-16), (17-26)	1.06176	1.48	1.4	3.57	-2.75
	(1-20), (21-26)	1.06816	2.09	1.9	5.75	-2.80
	(1-24), (25-26)	1.07021	2.28	2.0	6.90	-2.86
MCU-FR	_	1.04631	_	_	_	_

Результаты, представленные в табл. 7, показывают, что разбиение энергетического спектра нейтронов на границах (1–12), (13–26) дает наименьшее отклонение результатов расчетов RC от MCU-FR, как в оценке коэффициента размножения, так и в оценке потвэльного энерговыделения. При этом полученная оценка погрешности энерговыделения при использовании эффективного двухгруппового подхода при подготовке констант существенно меньше, чем при использовании многогрупповой модели с числом групп менее 14 и приближается по точности к многогрупповой (15 и более) модели RC (см. табл. 4).

## Результаты расчета эффективности РО СУЗ

В табл. 8 и 9 представлены сравнения результатов расчетов  $K_{_{9\varphi\varphi}}$  и эффективности РО СУЗ между эффективной двухгрупповой моделью RC и MCU-FR.

Положение РО СУЗ	RC (2 группы)	MCU-FR	Отклонение, %
Введен ЦКР	1.02917	1.03056	-0.13
Введены все РО СУЗ	0.90008	0.91024	-1.12
Извлечены все РО СУЗ	1.04548	1.04631	-0.08

Таблица 9 Сравнение эффективности РО СУЗ между эффективной двухгрупповой моделью RC и MCU-FR

Положение РО СУЗ	RC (2 группы)	MCU-FR	Отклонение, %
Введен ЦКР	1.52	1.46	3.76
Введены все РО СУЗ	15.45	14.29	8.15

Результаты расчетов, приведенные в табл. 7—9 показывают, что эффективная двухгрупповая модель малогабаритного газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов при выбранном групповом разбиении обеспечивает согласие с реперными расчетами MCU-FR, незначительно уступая по точности многогрупповой модели с числом групп более 14. При этом время решения задач с использованием двухгрупповой модели существенно сокращается. В табл. 10 приведено сопоставление времени прохождения задач при использовании многогрупповой модели (15 групп) и эффективной двухгрупповой модели, подготовленных на базе программы RC.

Таблица 10 Сопоставление времени прохождения задач между эффективной двухгрупповой моделью и многогрупповой моделью (15 групповой) RC

Haraman BO CV2	Время прохож	<i>RC</i> (15 <i>ep</i> )	
Положение РО СУЗ	RC (2 группы)	RC (15 групп)	$RC(2\varepsilon p)$
Введен ЦКР	92.45	1020.66	11.04
Введены все РО СУЗ	65.59	838.46	12.78
Извлечены все РО СУЗ	100.83	862.14	8.55

Из данных табл. 10 следует, что при переходе от 15 групповой модели к эффективной двухгрупповой модели среднее время прохождения задач сокращается примерно в 10 раз. Вследствие этого, в качестве базовой при разработке моделей малогабаритного газоохлаждаемого реактора для решения нестационарных задач [2, 3] принята эффективная двухгрупповая модель КП САПФИР\_РФ&RC.

#### Заключение

- 1. Рассмотрены два варианта расчетной модели, основанные на решении трехмерного уравнения диффузии нейтронов в многогрупповом и двухгрупповом (эффективном) приближении, отличающиеся способом (последовательностью) решения спектральной задачи.
- 2. Результаты верификации моделей в сравнении с реперными расчетами, выполненными методом Монте-Карло, показали, что в малогабаритном реакторе, как и ожидалось, на результатах расчета сказывается взаимное влияние спектра нейтронов в активной зоне и отражателе. Это потребовало коррекции граничных условий (введение разрывных граничных условий сшивки ППН) на границе активной зоны и отражателя в многогрупповой диффузионной модели. В двухгрупповой эффективной модели для учета взаимного влияния спектра нейтронов в активной зоне и радиальном отражателе потребовалось использовать детальную двухмерную модель фрагмента активной зоны и отражателя для расчета спектра нейтронов при подготовке двухгрупповых констант диффузионного уравнения. На основе верификационных расчетов выбрано и обосновано число энергетических групп в многогрупповой модели и граница между макрогруппами в двухгрупповой модели.
- 3. Результаты расчетных исследований показали, что эффективная двухгрупповая модель не уступает многогрупповой модели в точности расчета основных НФХ реактора: коэффициента размножения нейтронов, распределения энерговыделения, эффективности РО СУЗ, но существенно превосходит в скорости счета. Это является дополнительным обоснованием правильности выбора этого подхода в работе [1] и его дальнейшего использования при разработке нестационарных моделей для исследований НФХ активной зоны малогабаритного газоохлаждаемого реактора с быстрым спектром нейтронов [2, 3].
- 4. Отработку обоих подходов к подготовке расчетных моделей планируется продолжить в дальнейшем при обосновании применения КП САПФИР\_РФ&RC для исследовательских и инженерных расчетов НФХ малогабаритных реакторов с быстрым спектром нейтронов.

## Литература

- 1. 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.
- 2. 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.
- 3. *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.

- 4. *Каминский А.С.* Влияние схемных решений на безопасность и параметры малогабаритных высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов / А.С. Каминский, Т.А. Турбина, Э.Г. Гордеев // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. 2018. Вып. № 5. С. 18–23.
- 5. Энциклопедия нейтронных данных РОСФОНД (Российская библиотека файлов оцененных нейтронных данных). Полный пакет обоснований отбора оценок. Обнинск: АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», 2006. URL: http://www.ippe.ru/podr/abbn/libr/libr.php, свободный. (дата обращения 22.05.2022).
- 6. MCU-FR, 2016: свидетельство о регистрации программы N2016618242 // H.И. Алексеев [и др.]
- 7. 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.

УДК 620.179.152 DOI: 10.52069/2414-5726\_2022\_2\_28\_61

# Расчетное моделирование концентрации аммиака и газообразных продуктов в теплоносителе первого контура транспортных ЯЭУ

С.Н. Орлов, А.А. Змитродан, Е.Е. Щербаков

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

#### Аннотация

В статье рассмотрены математические зависимости, связывающие значения концентрации аммиака, водорода и азота в теплоносителе первого контура транспортных ядерных энергетических установок (ЯЭУ) – реакторных установок ледоколов и плавучих атомных теплоэлектростанций. Данные зависимости могут быть использованы для расчета содержания растворенных газов в теплоносителе при различных концентрациях аммиака, в том числе превышающих предельное значение, согласно установленным нормам водно-химического режима. Проанализирована эффективность применения опубликованных эмпирических и полуэмпирических зависимостей. Анализ проводился на основании сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными на исследовательской ЯЭУ транспортного назначения типа КЛТ-40С.

По результатам анализа показано, что при штатной эксплуатации (без поступления в контур дополнительных количеств водорода), наименьшую погрешность аппроксимации демонстрируют полуэмпирические зависимости, учитывающие изменения концентрации азота в теплоносителе и влияние уровня мощности работы ЯЭУ на соотношения концентраций аммиака и водорода. В условиях образования дополнительных количеств водорода за счет коррозии циркониевого сплава наименьшая погрешность аппроксимации наблюдается при использовании рассмотренного в статье эмпирического уравнения.

**Ключевые слова:** транспортные ядерные энергетические установки, водно-химический режим теплоносителя первого контура, аммиак, водород, азот, математическая зависимость, коррозия циркониевых сплавов.

# Numerical simulation of the ammonia and gaseous product concentrations in the primary coolant of nuclear marine reactors

S.N. Orlov, A.A. Zmitrodan, E.E. Shcherbakov

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

#### **Abstract**

The paper discusses mathematical relations between the concentrations of ammonia and hydrogen and nitrogen in the primary coolant of nuclear marine reactors in icebreakers and floating nuclear power plants. These relations can be used to calculate the dissolved gas content of the coolant for different ammonia concentrations including those above the limit value as specified in applicable water chemistry guidelines. The efficiency of using empirical and semi-empirical relations is assessed. The assessment is done by comparing calculation results against experimental data obtained from the KLT-40S research nuclear marine reactor plant.

The assessment results show that for normal operating conditions (without occurrence of additional hydrogen in the coolant), semi-empirical relations yield lower approximation errors; these relations include changes in the nitrogen concentrations in the coolant and

influence of the reactor operating power on the relationship between the ammonia and hydrogen concentrations. However, it is an empirical relation that yields a lower approximation error in the presence of additional amounts of hydrogen resulted from corrosion of zirconium alloy.

**Key words**: nuclear marine reactor plants, primary water chemistry, ammonia, hydrogen, nitrogen, mathematical relation, zirconium alloy corrosion.

#### Введение

Для теплоносителя первого контура транспортных ядерных энергетических установок (ЯЭУ), в том числе для плавучей атомной теплоэлектростанции «Академик Ломоносов», принят аммиачный водно-химический режим (ВХР), который характеризуется высокой устойчивостью и саморегулируемостью [1].

Согласно нормам качества аммиачного BXP общее содержание и концентрация отдельных газообразных продуктов (за исключением кислорода) в теплоносителе не контролируется [2]. В тоже время контроль общего содержания растворенных газов (в основном определяющегося азотом) в теплоносителе первого контура важен с точки зрения обеспечения надежности работы оборудования первого контура, в частности предотвращения кавитации циркуляционных насосов расхолаживания [3]. Содержание водорода в первом контуре влияет на обоснование взрывобезопасности ЯЭУ [4].

Содержание растворенных газов в теплоносителе при различных режимах работы установки может быть рассчитано исходя из их стационарных концентраций в теплоносителе и концентрации аммиака, контролируемого согласно нормам качества ВХР. Стационарное состояние устанавливается в результате протекания реакций радиационного разложения аммиака и обратных реакций, приводящих к синтезу аммиака.

Расчетные соотношения для определения концентраций растворенных в теплоносителе газов и аммиака рассмотрены в работах [1, 4–6]. Подобный расчет представляет особенный интерес для концентраций аммиака, превышающих максимальное допустимое согласно нормам ВХР значение. Ситуация превышения содержания аммиака в теплоносителе над предельным значением норм ВХР наблюдалась, к примеру, на реакторных установках лихтеровоза «Севморпуть» и ледокола «Советский Союз» в результате коррозии циркониевых сплавов оборудования первого контура [7].

В настоящее время при разработке новых норм качества теплоносителя первого контура ледокольных реакторных установок (РУ) из-за наблюдавшихся фактов превышения содержания аммиака в теплоносителе над предельным значением норм, рассматривается вопрос повышения данного значения. Для обоснования этого необходимо учитывать влияние на процессы, протекающие в контуре, не только рост концентрации самого аммиака, но и изменение концентрации растворенных газов в теплоносителе. Избыток растворенных в теплоносителе газов может привести к их десорбции на холодных участках контура и ухудшению работы ионообменных фильтров.

К настоящему моменту получены единичные экспериментальные данные по содержанию азота и водорода в теплоносителе первого контура транспортных ЯЭУ при концентрациях аммиака, превышающих допустимое значение. Расчет содержания растворенных газов в теплоносителе для всего рассматриваемого при разработке новых норм качества диапазона концентраций аммиака, как в условиях коррозии циркониевого сплава, так и без нее, возможен только за счет использования математических зависимостей.

Целью данной работы является выбор и адаптация на основании экспериментальных данных, полученных на исследовательской ЯЭУ транспортного назначения, математических

зависимостей для расчета концентраций растворенных газообразных соединений в теплоносителе первого контура транспортной ЯЭУ при нормальных и нештатных условиях эксплуатации, связанных с наличием в контуре дополнительных источников поступления водорода.

#### Методическая часть

Для расчёта концентраций аммиака, водорода и азота в ходе исследований применялись эмпирические и полуэмпирические аналитические зависимости, предложенные в работах [1, 4–6]. Следует отметить, что эти зависимости базируются на термодинамической константе равновесия реакции:

$$2NH_{3} \leftrightarrow N_{2} + 3H_{2}, \tag{1}$$

которая может быть описана уравнением:

$$K = [H_2]^3 \cdot [N_2]/[NH_3]^2$$
 (2)

с той или иной корректировкой степенных коэффициентов, обусловленной массообменом или другими химическими реакциями в контуре.

В работе [5] приведено эмпирические уравнение для зависимости стационарных концентраций водорода и аммиака при длительном облучении в первом контуре реакторных установок энергоблоков плавучих атомных теплоэлектростанций (ПАТЭС):

$$[H_2] = 1.29[NH_3] + 3.5 \cdot 10^{-4},$$
 (3)

где  $[NH_3]$  и  $[H_2]$  – концентрации аммиака и водорода в теплоносителе, соответственно, моль/кг.

В работе [1] приведена зависимость между равновесными концентрациями аммиака, водорода и азота в первом контуре реакторных установок ледоколов и энергоблоков ПАТЭС:

$$[NH_3] = 1.8 \cdot [H_2] \cdot [N_2]^{1/3},$$
 (4)

где  $[N_2]$  – концентрации азота в теплоносителе, моль/кг.

В работе [6] при изучении γ-радиолиза деаэрированных водных растворов аммиака показано, что стационарная концентрация аммиака, водорода и азота связаны полуэмпирическим соотношением:

$$K_9 = \frac{[NH_3]}{[H_2]\sqrt{[N_2]}},$$
(5)

где  ${\rm K}_{\rm 9}$  – коэффициент, характеризующий равновесие реакции радиолиза аммиака.

В работе [4] при моделировании водно-химического режима первого контура транспортных ЯЭУ использовано соотношение:

$$[NH_2] = K_1 \cdot [H_2]^n \cdot [N_2]^m, \tag{6}$$

где n, m – эмпирические коэффициенты,  $K_1$  – коэффициент, зависящий от мощности работы РУ.

### Экспериментальные результаты

Экспериментальные данные, используемые в данной статье для выбора соотношения, описывающего взаимосвязь концентраций аммиака и водорода, получены при эксплуатации исследовательской ЯЭУ типа КЛТ-40 С.

Концентрацию газообразных продуктов в теплоносителе определяли методом газовой хроматографии на приборе Кристалл-2000М после их выделения из водных проб. Выделение газов, растворенных в теплоносителе, проводили путём разделения жидкой и газовой фаз, образующихся в условиях, близких к равновесным, при снижении давления и температуры пробы. Концентрацию аммиака определяли методом фотометрии на фотоколориметре КФК-3-01-«ЗОМЗ».

Концентрация аммиака в теплоносителе в ходе эксплуатации ЯЭУ находилась в диапазоне от 18 до 60 мг/кг (в среднем 40 мг/кг), водородный показатель (при 25 °C) — от 9.8 до 10.4 ед. (в среднем 10.2 ед.).

Газосодержание в теплоносителе определялось азотом ( $\sim$ 94–95 % объемных в газовой фазе) и водородом ( $\sim$ 4–5 % объемных в газовой фазе), доля других газов составляла  $\sim$ 0.2 % объемных в газовой фазе.

На остановленном реакторе доля водорода в общем содержании растворенных в теплоносителе газов несколько возрастала – с 5 до 7 % объемных в газовой фазе. Данный рост был обусловлен снижением среднего значения концентрации азота в теплоносителе (с 67.2 ммоль/кг до 48.7 ммоль/кг) и общего газосодержания. Аналогичное снижение содержания азота в теплоносителе при расхолаживании реактора без снятия давления описано в работе [1] – с 1.8 нл/кг (80.4 ммоль/кг) до 0.8–1.0 нл/кг (35.7–44.6 ммоль/кг). При этом концентрация растворенного в теплоносителе водорода до и после останова остается на одном уровне (3.3 и 3.5 ммоль/кг, соответственно).

Для расчетов равновесных концентраций аммиака и газообразных продуктов в первом контуре использовали уравнения (3)–(6). Моделирование велось для трех разных уровней мощности работы реактора: N=0 %  $N_{HOM}$ , N=30 %  $N_{HOM}$  и N=60 %  $N_{HOM}$  от номинального уровня ( $N_{HOM}$ ).

В уравнениях (5)–(6) для рассматриваемых уровней мощности на основании экспериментальных данных рассчитывали среднее значение коэффициентов  $K_3$ ,  $K_1$  и степенных коэффициентов n и m, которое затем использовали при моделировании.

Относительное отклонение рассчитанных по соотношениям (3)–(6) значений концентрации водорода от экспериментальных данных рассчитывали по формуле [8]:

$$\bar{\mathbf{A}} = \frac{\sum_{i=1}^{k} (\|[\mathbf{H}_{2}]_{i} - [\mathbf{H}_{2}]_{x} | / [\mathbf{H}_{2}]_{i})}{k} \cdot 100\%, \tag{7}$$

где

- $-[\mathrm{H}_2]_i$  экспериментальное значение концентрации водорода в теплоносителе, моль/кг;
- $[H_2]_x$  расчетное значение концентрации водорода в теплоносителе, моль/кг;
- k количество экспериментальных значений концентрации водорода в теплоносителе.

Считается, что аппроксимирующая формула выбрана удачно, если средняя ошибка аппроксимации (среднее значение отклонения результатов расчета от экспериментальных значений) не превышает 15% [8].

В табл. 1 приведены значения эмпирических коэффициентов для уравнений (5)–(6), рассчитанных на основании экспериментальных результатов.

Таблица 1 Значения коэффициентов и степенных показателей для уравнений (5)–(6), определенные на основании экспериментальных данных

Мощность ЯЭУ,	Уравнение (5)		Уравнение (6)	
% N <sub>HOM</sub>	K <sub>9</sub>	K <sub>1</sub>	n	m
0	4.2	0.36		
30	3.0	0.26	0.64	0.34
60	2.2	0.2		

Из табл. 1 видно, что значения коэффициентов, характеризующих отношение содержаний аммиака и газообразных соединений в теплоносителе, последовательно снижаются с ростом мощности реактора как для уравнения (5), так и для уравнения (6).

Степенной коэффициент концентрации азота, рассчитанный на основании экспериментальных данных для уравнения (6), практически совпадает с аналогичным показателем для уравнения (4) (0.36 и 0.33, соответственно), в то время как степенной коэффициент концентрации водорода значительно различается (0.64 и 1.0, соответственно).

В табл. 2 приведены значения средней ошибки аппроксимации для уравнений (3)–(6) при рассматриваемых значениях мощности ЯЭУ.

 Таблица 2

 Значения средней ошибки аппроксимации при расчете концентрации водорода

Мощность ЯЭУ,	Средняя ошибка аппроксимации, %				
% N <sub>HOM</sub>	Уравнение (3)	Уравнение (4)	Уравнение (5)	Уравнение (6)	
0	24	26	19	16	
30	13	15	16	16	
60	30	29	19	16	

Из данных, представленных в табл. 2, видно, что при мощности реактора N=30%  $N_{HOM}$  все уравнения дают корректную оценку для концентрации водорода — средняя ошибка аппроксимации близка к 15 %. Однако при расчете концентрации водорода на остановленном реакторе и при мощности N=60%  $N_{HOM}$  использование уравнений (3) и (4) приводит к значительному отклонению результатов расчёта от экспериментальных данных. Уравнение (5) позволяет удовлетворительно рассчитывать концентрации водорода во всех рассматриваемых случаях, а лучшее совпадение расчетных результатов с экспериментальными наблюдается при применении уравнения (6).

Рассмотрим эффективность применения эмпирических соотношений (3)–(6) при появлении в контуре дополнительного источника поступления водорода – активной коррозии циркониевого сплава Э-110 в результате разрушения его защитной оксидной пленки.

На рис. 1 приведена зависимость изменения концентраций аммиака и водорода в теплоносителе от времени с момента начала активной коррозии циркониевого сплава.

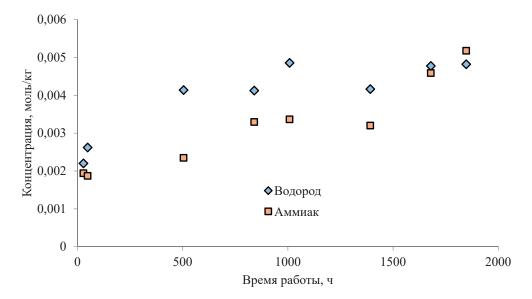


Рис. 1. Экспериментальные значения концентрации аммиака и водорода в теплоносителе транспортной ЯЭУ при активной коррозии циркониевого сплава

Из рис. 1 видно, что концентрация аммиака и водорода при наличии в контуре дополнительного источника последнего возрастают симбатно.

В табл. 3 приведены значения средней ошибки аппроксимации для расчетов концентрации водорода по уравнениям (3)–(6) в данных условиях.

 Таблица 3

 Значения средней ошибки аппроксимации при расчете концентрации аммиака в условиях коррозии сплава Э-110

Уравнение	Средняя ошибка аппроксимации, %
3	19
4	49
5	35
6	42

Как видно из данных, приведенных в табл. 3, единственное соотношение, позволяющее относительно эффективно рассчитывать концентрацию водорода при наличии дополнительного источника его поступления в контур, — это уравнение (3). Уравнения (5) и (6), позволявшие наиболее точно рассчитывать концентрации водорода при различных уровнях мощности реактора, в условиях появления дополнительных химических реакций в контуре, наоборот демонстрируют значительную ошибку аппроксимации.

# Обсуждение результатов

При использовании уравнений (5) и (6) для расчёта концентрации водорода достигается наименьшая ошибка аппроксимации. Это обусловлено видом данных уравнений.

Во-первых, оба уравнения, являясь полуэмпирическими, учитывают концентрации всех реагентов и продуктов реакции (1) аммиака, водорода и азота. В данной работе и в статье [1] показано, что концентрация азота, растворенного в теплоносителе, может значительно

изменяться при росте или снижении мощности реактора за счет массообмена с компенсаторами объема. В результате наличие учета концентрации азота позволяет избежать дополнительных ошибок расчета.

Во-вторых, в уравнениях (5) и (6) присутствуют коэффициенты для учета смещения равновесия в химической реакции синтеза и радиолиза аммиака (1) при изменениях мощности реактора, вызывающих (как указанно в работе [4]) изменение мощности дозы поглощенной в воде энергии реакторного излучения.

Наличие тенденции снижения рассчитанных на основании экспериментальных данных значений коэффициентов с ростом мощности реактора (табл.1) является доказательством изменения равновесия в реакции синтеза-радиолиза при изменении режима работы ЯЭУ. При увеличении мощности реактора равновесие в реакции (1) смещается в сторону разложения аммиака, при снижении — в сторону его образования. Полученные данные согласуются с представленной в докладе [4] зависимостью для концентрации аммиака в теплоносителе ЯЭУ типа КЛТ-40С от мощности реактора.

При коррозии циркониевого сплава концентрация водорода в первом контуре возрастает достаточно быстро – практически в 2 раза за 1 месяц работы реактора на мощности. Несмотря на то, что водород в контуре образуется за счет реакции коррозии, наличие в контуре равновесия (1) приводит к росту концентрации аммиака, практически симбатному с увеличением содержания водорода.

В таких условиях использование уравнений (5) и (6), в которых применяются коэффициенты, рассчитываемые на основании экспериментальных данных (отвечающих определенным условиям в контуре) приводит к значительной ошибке аппроксимации. В тоже время эмпирическое уравнение (3), полученное из опыта длительной эксплуатации однотипных транспортных ЯЭУ и учитывающее несколько источников поступления водорода (помимо разложения аммиака, также радиолиз воды и, возможно, коррозию конструкционных материалов [5]) в условиях активной коррозии циркониевого сплава, позволяет прогнозировать результаты близкие к экспериментальным данным.

#### Заключение

- 1. Полученные в работе результаты свидетельствуют, что все рассмотренные аппроксимирующие функции имеют определенные ограничения при расчете концентраций газов, растворенных в теплоносителе первого контура транспортных ЯЭУ.
- 2. При отсутствии в первом контуре реактора активных коррозионных процессов, приводящих к образованию водорода, концентрации растворенных газов достаточно корректно рассчитываются по формулам, учитывающим концентрацию азота в контуре и мощность реактора.
- 3. В случае поступления водорода в теплоноситель за счет коррозии циркониевого сплава данные соотношения требуют значительной корректировки эмпирических коэффициентов. Экспериментально показано, что в данных условиях для расчета соотношения концентраций водорода и аммиака целесообразно использовать эмпирическое уравнение (3).
- 4. Соотношения, применимость которых обоснована авторами в данной статье, планируется использовать в ходе дальнейшего расчета содержания водорода и азота в первом контуре транспортных ЯЭУ при концентрациях аммиака, превышающих максимальные допустимые согласно нормам ВХР значения, а также для обоснования термодинамической стабильности защитных оксидных пленок конструкционных материалов оборудования в этих условиях.

## Литература

- 1. *Касперович А.И*. Водно-химические процессы в реакторных установках атомных ледоколов и плавучих энергоблоков. / А.И. Касперович, Б.И. Колесов, Н.Г. Сандлер // Атомная энергия. 1996. Т. 51. С. 261—266.
- 2. Отраслевой стандарт 95 10002-95. Нормы качества воды первого и третьего контуров реакторной установки судов департамента морского транспорта Российской Федерации с водо-водяными реакторами типа КЛТ-40. М.: РНЦ «Курчатовский Институт», 1995. 12 с.
- 3. Филимонов А.Ф. Газовыделение и газоперенос в оборудовании первого контура реакторной установки с газовой системой компенсации давления / А.Ф. Филимонов, В.И. Полуничев, А.Е. Помысухина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. Том 126. С. 101–110.
- 4. *Коротаева* Д.Д. Расчетный анализ характеристик аммиачного водно-газового химического режима первого контура РК КЛТ-40С ПЭБ проекта 20870 / Д.Д. Коротаева, И.Н. Кулаков, А.Н. Лепехин // Сборник тезисов докладов IX научно-практической конференции молодых ученых и специалистов атомной отросли КОМАНДА.—2021.— С. 153—155.
- 5. Радиолиз аммиака в теплоносителе первого контура реакторных установок плавучих энергоблоков. / А.В. Буланов, Б. И. Колесов, М.Л. Лукашенко, А.М. Худяков, С.А. Кабакчи, О.П. Архипов // Атомная энергия. 2000. Том 88. С. 353—358.
- 6. *Бычков Н.В.* Механизм радиолиза аммиака в воде без кислорода. / Н.В. Бычков, В.А. Макаров // Сборник докладов 1-й Межотраслевой конференции по водно-химическим режимам теплоносителей АЭС. 1979. Т. 3. С. 121—131.
- 7. Оценка коррозионного состояния оборудования первого контура транспортных энергетических установок с использованием показателей водно-химического режима / С.В. Кабакчи, А.В. Лузаков, Д.С. Уртенов, Е.А. Катанова, И.А. Гасай, А.Е. Верховский // Теплоэнергетика. 2019. № 3. С. 42—48.
- 8. *Шихалев А.М.* Регрессионный анализ. Парная линейная регрессия. Казань: Изд-во КФУ, 2015.-46 с.

DOI: 10.52069/2414-5726 2022 2 28 69

# Исследование характеристик рекомбинаторов водорода типа РВК 500/1000 и обоснование их работоспособности в условиях проектных и запроектных аварий

A.A. Фиськов<sup>1</sup>, И.А. Рышкевич<sup>1</sup>, Т.Г. Варданидзе<sup>1</sup>, A.A. Дитц<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Атомэнергопроект», Санкт-Петербург <sup>1</sup>, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет г. Томск, Россия

#### Аннотация

В статье приведена оценка физико-химического воздействия паров и аэрозолей (включая продукты деления и конструкционные материалы), поступающих в контейнмент реактора в режимах проектных и запроектных аварий, на производительность рекомбинатора водорода. В ходе работы проведен сравнительный анализ производительности блоков рекомбинатора до и после воздействия паров и аэрозолей, определено время выхода рекомбинатора на номинальную производительность.

В результате проведенных экспериментов выявлено, что после воздействия паров и аэрозолей на блоки каталитического рекомбинатора не происходит значительного изменения их производительности. Фиксируемые изменения производительности, как в большую, так и в меньшую сторону, находятся в пределах 10 % и укладываются в диапазон суммарной погрешности определения производительности каталитического рекомбинатора водорода.

Результаты измерения времени выхода на номинальную производительность блока рекомбинатора показывают превышение времени выхода, указанного в исходных технических требованиях.

**Ключевые слова:** контейнмент, проектные аварии, запроектные аварии, рекомбинатор водорода, загрязнение каталитической поверхности, номинальная производительность.

# Investigation of the recombiners of hydrogen RVK 500/1000 characteristics and substantiation of their performance under the conditions of design and beyond design accidents

A.A.Fiskov<sup>1</sup>, I.A. Ryshkevich<sup>1</sup>, T.G. Vardanidze<sup>1</sup>, A.A. Ditz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC Atomenergoproekt ST. Petersburg BRANCH – ST. Petersburg design institute, Saint-Peterburg, Russia

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

#### **Abstract**

The article presents an assessment of various physical and chemical effects (aerosols and fission products entering the containment in design basis accidents and beyond design basis accidents) on the performance of a hydrogen recombiner. In the course of the work, a comparative analysis of the performance of the recombiner blocks before and after exposure was carried out, and the time to reach the nominal performance was determined.

As a result of the experiments, it was revealed that after the physical and chemical impact on the blocks of the catalytic recombiner, there is no significant change in their performance.

The recorded changes are within 10 % and differ both up and down and fit into the range of the total error in determining the performance of the catalytic hydrogen recombiner.

The results of measuring the time for the recombiner unit to reach its nominal capacity show an excess of the time specified in the technical requirements.

**Key words**: containment, design basis accidents, beyond design basis accidents, hydrogen recombiner, contamination of catalytic surface, time for hydrogen recombiner to reach nominal capacity.

#### Введение

Водородная безопасность является важным элементом обеспечения безопасности АЭС с водо-водяными реакторами. При возникновении проектной (далее ПА) или запроектной аварии (далее ЗПА) в атмосферу контейнмента реактора поступает значительное количество водорода. Образование взрывоопасной концентрации водорода в помещениях контейнмента может привести к взрыву, который угрожает целостности оборудования.

Для предотвращения образования горючих и взрывоопасных смесей в защитной оболочке предусматривается пассивная система контроля и удаления водорода. Одной из функций системы является поддержание объемной концентрации водорода на безопасном уровне при ПА и ЗПА. Система функционирует при инициирующих событиях, связанных с достижением в контейнменте концентрации водорода в два объемных процента (2 % об.).

Элементами системы удаления водорода из защитной оболочки являются пассивные автокаталитические рекомбинаторы водорода (далее ПКРВ), распределенные по помещениям контейнмента. Принцип работы рекомбинаторов водорода основан на каталитической реакции окисления водорода. Пассивный каталитический рекомбинатор водорода типа РВК-500 состоит из металлического корпуса и блоков с каталитическими элементами (рис. 1).

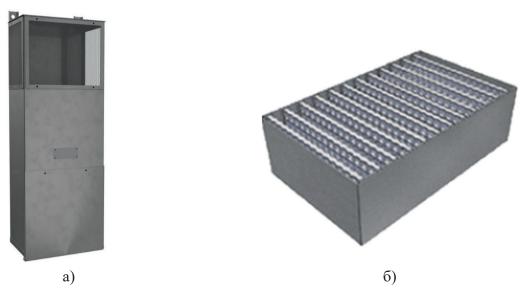


Рис. 1. Пассивный каталитический рекомбинатор водорода типа PBK-500: а – металлический короб; б – каталитический элемент.

В рекомбинаторе РВК-500 используются платиновые катализаторы типа ГК-5. Они представляют собой цилиндрические стержни диаметром 6 мм и высотой 60 мм, изготовленные из пористой керамики на основе гамма- $\mathrm{Al_2O_3}$ . Поровое пространство керамической основы заполнено мелкокристаллической платиной. Стержни покрыты снаружи тонким слоем политетрафторэтилена с порами размером порядка 0.1 мкм. Поры проницаемы для газовой фазы и непроницаемы для воды. Благодаря этому катализатор обладает гидрофобными свойствами:

при контакте с водой или при хранении во влажной атмосфере основная часть платины всегда остается сухой и готовой к работе в качестве каталитических центров [1].

Распространение и накопление водорода по помещениям контейнмента рассчитывается с использованием интегрального кода «Купол-М». Выход водорода характеризуется как плавным нарастанием, так и залповыми выходами до 2.5 кг/с. Поэтому время выхода на номинальную производительность ПКРВ является очень важной рабочей характеристикой катализатора.

При ПА и ЗПА в атмосферу контейнмента поступают радиоактивные пары и аэрозоли, включающие продукты деления и конструкционные материалы, которые могут оказывать негативное влияние на характеристики рекомбинаторов – отравление каталитических элементов.

Целью работы является оценка физико-химического воздействия (далее — воздействия) различных веществ (паров и аэрозолей, содержащих продукты деления и конструкционные материалы, поступающих в контейнмент реактора в режимах ПА и ЗПА) на производительность рекомбинатора водорода, а также определение времени выхода рекомбинатора водорода на номинальную производительность.

Экспериментальная база по оценке влияния возможных загрязнений на рабочие характеристики ПКРВ российского производства и зарубежных аналогов отсутствует. Для достижения поставленных целей было принято решение проводить испытания в три этапа:

- 1. Испытание на определение производительности и времени выхода на номинальную производительность каталитических элементов рекомбинаторов по водороду до воздействия аэрозолей, включающих имитаторы продуктов деления (далее ИПД);
- 2. Воздействие аэрозолей ИПД на поверхность каталитических элементов рекомбинаторов водорода при создании в испытательной камере стационарных параметров (температура, давление, влажность, концентрация аэрозоля), соответствующих условиям ПА и ЗПА;
- 3. Испытание на определение производительности каталитических элементов рекомбинаторов по водороду после воздействия аэрозолей ИПД.

# Методика проведения эксперимента по определению производительности рекомбинатора водорода и времени выхода на номинальную производительность

При определении производительности каталитических элементов рекомбинаторов производилась подача водородно-воздушной смеси на вход каталитического элемента и фиксировались параметры анализируемой газовоздушной среды при достижении стационарного режима. Испытания проводились при следующих значениях параметров анализируемой газовоздушной среды: температура  $20\div45~^{\circ}\mathrm{C}$ , давление  $100\div105~\mathrm{k}\Pi a$ , концентрация  $\mathrm{H_2}~2.0\pm0.1~\mathrm{o}6.~^{\circ}\mathrm{M}$ , влажность  $0\div100~^{\circ}\mathrm{M}$ .

Производительность каталитических элементов рекомбинаторов (количество прореагировавшего водорода в единицу времени) определялось по измеренным концентрациям водорода на входе и выходе из короба при фиксированном расходе водорода на входе в короб. Стационарным режим считается после того, как результаты измерения концентрации водорода перестают отличаться друг от друга более, чем на 3 % в течение 120 с.

Для определения времени выхода каталитических элементов рекомбинаторов водорода на номинальный режим производилась подача водородно-воздушной смеси на вход каталитического элемента  $2.0\pm0.1$  об. %, соответствующей концентрации инициирующего события, и фиксация времени начала стационарного режима.

# Методика проведения эксперимента по физико-химическому воздействию аэрозолей продуктов деления и конструкционных материалов

Анализируя сценарий, протекания тяжёлой аварии на АЭС с водо-водяными реакторами, было выделено четыре характерных стадии аварии, имеющих различные скорости конденсации, концентрации и составы аэрозолей. Массовый и компонентный состав радиоактивных паров и аэрозолей (имитаторов продуктов деления), а также паров и аэрозолей конструкционных материалов в экспериментах рассчитывали для аварии с разрывом трубопровода Ду 346 мм и Ду 25 мм с помощью кода СОКРАТ. На основании анализа сценариев тяжелых аварий и расчетных данных была составлена матрица экспериментов, представленная в табл. 1.

Режим	Стадия аварии				
	I	II	III	IV	
Пояснение к режиму Выход аэрозолей Г		Выход аэрозолей из расплава на дне корпуса реактора	Выход аэрозолей из расплава в УЛР	Осаждение аэрозолей после прекращения их выхода в контейнменте	
Длительность осаждения аэрозолей, с	2000	6000	7000	35000	
Концентрация аэрозолей, $10^{-3}$ , $\kappa \Gamma/M^3$	5.7	8.3	15.3	15.3	
	Реж	ким 1 (проектная авај	рия)		
Номер эксперимента	1	2	3	4	
Номера каталитических блоков рекомбинатора, задействованных в эксперименте		3, 4	5, 6	23, 24	
Давление в контэйнменте, МПа	0.40	0.24	0.17	0.20	
Температура в контейнменте, °С			110	110	
Плотность пара, кг/м <sup>3</sup>	0.614	0.438	0.314	0.825	
ипд	Cs <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	Fe; Cr; Ni; Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Zr; Mn	Fe; ZrO <sub>2</sub> ; MnO		
	Режи	им 2 (запроектная ава	ария)		
Номер эксперимента	5	6	7	8	
Номера каталитических блоков рекомбинатора, 7, 8 задействованных в эксперименте		9, 10	11, 12	21, 22	
Давление в контейнменте, МПа	авление в контейнменте,		0.17	0.20	
	190				
Температура в контейнменте, °С	207 (пиковое значение)	150	110	110	
Плотность пара, кг/м <sup>3</sup>	0.674	0.482	0.407	0.825	
ипд	Cs <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	Fe; Cr; Ni; Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Zr; Mn	Fe; ZrO <sub>2</sub> ; MnO		

#### Продолжение таблицы 1

D	Стадия аварии					
Режим	I	II III		IV		
Пояснение к режиму	Основной выход аэрозолей ПД	Выход аэрозолей из расплава на дне корпуса реактора	Выход аэрозолей из расплава в УЛР	Осаждение аэрозолей после прекращения их выхода в контейнменте		
Режим 1 (проектная авария)						
Номер эксперимента	9	10	11	12		
Номера каталитических блоков рекомбинатора, задействованных в эксперименте	13, 14	15, 16	17, 18	19, 20		
Давление в контейнменте, МПа	0.40	0.24	0.17	0.20		
Температура в контейнменте, °С	150	110	110	110		
Плотность пара, кг/м <sup>3</sup>	0.614	0.438	0.314	0.825		
ипд Н <sub>3</sub> ВО <sub>3</sub>		$H_3BO_3$	$H_3BO_3$	$H_3BO_3$		

Для экспериментов была разработана и смонтирована экспериментальная установка (рис. 2). Установка позволяет исследовать осаждение аэрозолей из парогазовой фазы на поверхность катализатора.

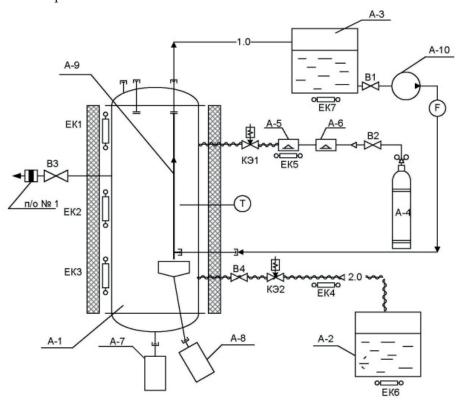


Рис. 2. Аппаратурно-технологическая схема установки для осаждения аэрозоля:

А-1 – ёмкость для осаждения аэрозоля; А-2 – парогенератор; А-3 – термостат; А-4 – баллон с азотом; А-5 – камера подготовки аэрозолей; А-6 – камера изготовления аэрозолей; А-7, А-8 – сборники конденсата с ёмкости и с теплообменника, соответственно; А-9 – теплообменник-конденсатор; А-10 – вакуумный насос.

Для подготовки аэрозоля с частицами заданного размера использовали камеру подогрева модельных порошков ИПД. Аэрозоли вводились в виде порошков с двухмодальным распределением частиц по размерам, соответствующим массовым медианным диаметрам 0.5 мкм (30 % массы) и 4 мкм (70 % массы). Диспергацию модельной смеси порошков внутри камеры и образование аэрозоля осуществляли с помощью ультразвукового генератора. Унос аэрозоля в камеру подготовки и далее в емкость осаждения производился с помощью сжатого азота, поступающего из узла питания.

В ёмкость для проведения экспериментов монтировались блоки рекомбинатора. Из баллона узла питания подавался азот до требуемого давления. В течение 30 мин производился нагрев ёмкости до заданной температуры. В предварительно нагретую ёмкость из узла питания установки паром через теплоизолированный паропровод подавался пар.

При достижении стационарных условий (температура и давление парогазовой среды) в ёмкость из узла подготовки аэрозоля подавалась подогретая модельная смесь порошков в потоке газа-носителя – азота.

В ёмкости, находящейся под давлением парогазовой смеси, на каталитических поверхностях происходила конденсация пара и осаждение аэрозоля.

Подробное описание методики и условий проведения экспериментов, а также технологической схемы представлено в [2].

Было проведено три серии экспериментов, в каждой серии по четыре эксперимента, воспроизводящих условия характерных стадий аварии. Для экспериментов использовано 24 предварительно пронумерованных каталитических блока. Параметры экспериментов (температура, давление, плотность пара, концентрация и время осаждения аэрозолей) и вводимые ИПД, а также номера каталитических блоков, подвергаемых воздействию, представлены в матрице экспериментов (табл. 1).

# Анализ воздействия паров и аэрозолей на каталитические элементы рекомбинаторов водорода типа РВК

Для определения элементного состава осевшего аэрозоля, готовили реплики с поверхности катализатора на углеродный проводящий скотч. Элементный состав осевших аэрозолей определяли при помощи микрозондовой энергодисперсионной приставки на растровом электронном микроскопе JEOL JSM 6000 Neo Scop (Япония).

Осаждение аэрозоля на поверхности каталитического элемента происходит неравномерно, локально, в виде единичных частиц или агломератов частиц переменного состава. Элементный состав осевшего аэрозоля (табл. 2) соответствует составу вводимых ИПД (табл. 1) и представлен в основном элементами Fe, Mn, Mo, Cs. В небольших количествах фиксируются вводимые и выделяющиеся на третьей стадии протекания аварии Zr, Cr. Ввиду малой концентрации аэрозоля  $Nd_2O_3$ , на исследованных участках поверхности его наличие не зафиксировано. При введении аэрозоля борной кислоты в ёмкость для осаждения аэрозолей на поверхности каталитических элементов практически не наблюдается её кристаллизация. После прекращения ввода аэрозолей в экспериментах, имитирующих 4-ю стадию аварии, наблюдается снижение осевших на поверхности каталитических элементов аэрозолей (рис. 3.1 и 3.2). Можно предположить, что основная масса аэрозоля смывается за счет конденсации пара во время проведения испытаний, что свидетельствует об отсутствии адгезии аэрозолей к поверхности катализатора. На основании вышеуказанного можно сделать вывод, что признаков химического взаимодействия между аэрозолем и поверхностью каталитических элементов не наблюдается.

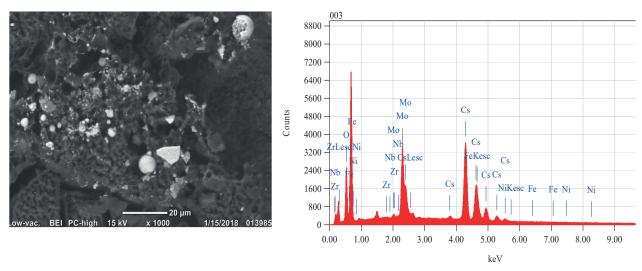


Рис. 3.1 Микрофотографии и данные рентгенофлуоресцентного спектрального анализа поверхности каталитического элемента после эксперимента № 3 (см. табл. 2).

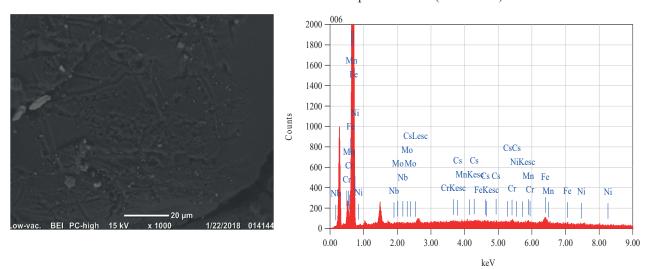


Рис. 3.2 Микрофотографии и данные рентгенофлуоресцентного спектрального анализа поверхности каталитического элемента после эксперимента  $\mathfrak{N}$  4 (см. табл. 2)

В табл. 2 приведены данные по элементному составу аэрозоля с поверхности каталитических элементов.

Таблица 2 Состав аэрозоля на поверхности каталитического элемента

Условия воздействия	Стадия аварии			
паров и аэрозолей	1	2	3	4
№ эксперимента (№ блока)	1 (1, 2)	2 (3, 4)	3 (5, 6)	4 (23, 24)
Режим 1 (ПА)	Сs, Mo, Al*, O*, F* – основные	Cs, Mo, Mn, Fe, Al*, O*, F* – основные	Сѕ и Мо, Мп, Fe, Al*, O*, F* – основные. Zr и Ni – следы	Мп, Fe, Al*, O*, F* – основные. Cr – следы
№ эксперимента (№ блока)	5 (7, 8)	6 (9, 10)	7 (11, 12)	8 (21, 22)
Режим 2 (3ПА)	Cs, Mo, Al*, O*, F* – основные	Cs, Mo, Mn, Fe, Al*, O*, F* – основные	Сѕ и Мо, Мп, Fe, Al*, O*, F* – основные. Zr и Ni – следы	Mn, Fe, Al*, O*, F* – основные. Ni, Cr – следы
№ эксперимента (№ блока)	9 (13, 14)	10 (15, 16)	11 (17, 18)	12 (19, 20)
Режим 1 (ПА)	Al*, O*, F* –	Al*, O*, F* –	Al*, O*, F* –	Al*, O*, F* –
(H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> )	основные	основные В – следы	основные В – следы	основные В – следы

<sup>\*</sup> – входит в состав каталитического элемента.

# Определение производительности каталитических элементов рекомбинаторов водорода типа РВК до и после воздействия паров и аэрозолей

Определение производительности и времени выхода на номинальную производительность каталитических элементов рекомбинаторов водорода типа РВК проводили по методике, описанной выше. На стенде размещалось 2 каталитических блока рекомбинатора водорода, на блоках измерялась производительность. После воздействия паров и аэрозолей, воспроизводящего условия, возникающие в контейнменте при аварии, снова определяли производительность каталитических элементов рекомбинаторов водорода.

Результаты расчета производительности представлены в табл. 3.

 Таблица 3

 Производительность каталитических элементов рекомбинаторов водорода типа РВК до и после воздействия паров и аэрозолей.

д в Производите		тельность	spa ob	Производительность	
Номера блоков	до воздействия, $\Pi \pm \Delta$ , $(\Gamma/c) \cdot 10^{-3}$	после воздействия, $\Pi \pm \Delta$ , $(\Gamma/c) \cdot 10^{-3}$	Номера блоков	до воздействия, $\Pi \pm \Delta$ , $(\Gamma/c) \cdot 10^{-3}$	после воздействия, $\Pi \pm \Delta$ , $(\Gamma/c) \cdot 10^{-3}$
1, 2	32±7	30±6	13, 14	28±6	28±6
3, 4	27±5	25±5	15, 16	32±6	32±8
5, 6	30±6	29±6	17, 18	30±6	29±6
7, 8	29±6	29±7	19, 20	31±6	31±6
9, 10	29±6	30±6	21, 22	30±6	30±7
11, 12	31±6	31±6	23, 24	29±6	32±8

Результаты сравнительного анализа производительности каталитических элементов рекомбинаторов водорода типа РВК до и после физико-химического воздействия представлены на рис. 4.

Анализ результатов экспериментов подтверждает, что после воздействия паров и аэрозолей в режимах проектной и запроектной аварий, в результате осаждения аэрозолей на каталитической поверхности рекомбинаторов водорода, происходит частичная блокировка поверхности. Вследствие этого производительность блоков в проектной аварии снижается на  $8-10\,\%$ . С течением времени аварии, вероятно часть оксидов, блокировавших поверхность катализатора восстанавливается водородом. В результате эта окислительно-восстановительная реакция приводит к дополнительному тепловыделению и увеличению температуры катализатора. Измерения показали, что начальная и конечная производительность блоков в разных экспериментах изменяется и составляет  $25-32~(\text{г/c})\cdot 10^{-3}$ , что в соответствии с [3] указывает на температуру катализаторов в интервале  $100-150\,^{\circ}\text{C}$ .

Начальная производительность катализаторов в каждом из экспериментов отражает степень блокировки части каталитической поверхности рекомбинатора водорода, используемого в данном эксперименте.

Изменение в производительности катализаторов после воздействия паров и аэрозолей происходит в две стадии: 1 — деблокировка каталитической поверхности, 2 — повышение производительности за счет разогрева и увеличения потока паровоздушной смеси в результате тепловыделения реакции окисления водорода. Снижение производительности — результат вторичной блокировки за счет воздействия высокой температуры на источник аэрозолей при запроектной аварии.

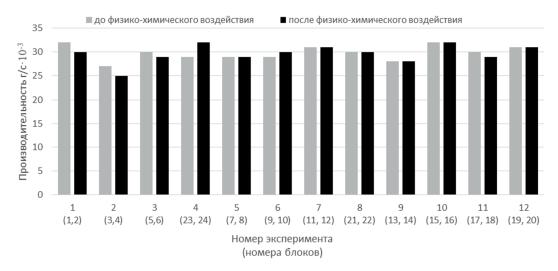


Рис. 4. Производительность каталитических элементов рекомбинаторов водорода типа РВК

Результат времени выхода каталитических элементов рекомбинаторов водорода на номинальную производительность представлен на рис. 5.

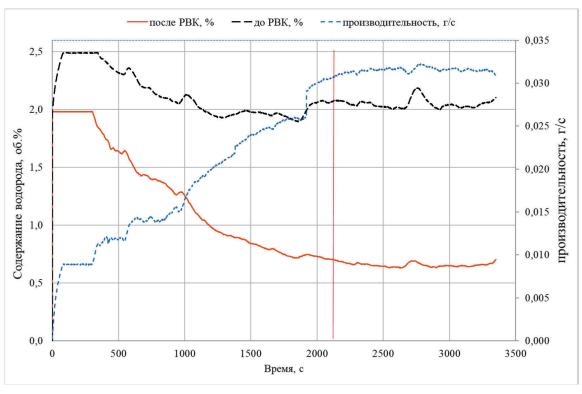


Рис. 5. График изменения концентрации водорода на входе и выходе из каталитического блока рекомбинатора водорода

В соответствии с рис. 5, время выхода каталитических элементов рекомбинаторов водорода типа РВК на номинальную производительность при концентрации водорода  $2.0\pm0.1$  об.% составляет  $\approx 2150$  с.

#### Заключение

После воздействия паров и аэрозолей на блоки каталитического рекомбинатора не происходит значительного изменения их производительности. Фиксируемые изменения находятся

в пределах 10 % и отличаются как в меньшую, так и в большую сторону и укладываются в диапазон суммарной погрешности.

При воздействии паров и аэрозолей, поступающих в контейнмент реактора, происходит блокировка части каталитической поверхности рекомбинатора водорода. Изменение производительности блока катализатора после воздействия при проектной аварии связано с определенной длительностью каждой стадии аварии и происходит в два этапа: 1 — деблокировка каталитической поверхности, 2 — повышение производительности из-за разогрева катализатора. При запроектной аварии возможно снижение производительности блока катализатора за счет возможного вторичного осаждения аэрозолей с примесями.

Согласно исходным техническим требованиям, предъявляемым к ПКРВ для исключения взрывоопасной концентрации водорода в помещениях контейнмента, время выхода рекомбинатора на номинальную производительность должно составлять не более 100 с. По результатам эксперимента установлено, что время выхода каталитических элементов рекомбинаторов водорода типа РВК на номинальную производительность при концентрации водорода 2.0±0.1 об. % составляет 2150 с, что на порядок превышает проектное время. Превышение времени выхода ПКРВ на номинальную производительность в условиях залпового выхода больших объемов водорода в помещения контейнмента может приводить к образованию взрывоопасной водородно-воздушной смеси и угрожать целостности контейнмента.

## Литература

- 1. *Келлер В.Д.* Пассивные каталитические рекомбинаторы водорода для атомных электростанций // Теплоэнергетика. -2007. -№ 3. C. 65–68.
- 2. Влияние осаждения борной кислоты и её солей на работоспособность пассивных систем безопасности при тяжелых авариях на АЭС / А.А. Фиськов, В.В. Безлепкин, С.Е. Семашко [и др.]. Атомная энергия. 2019. Т. 126, вып. 2. С. 81–87.
- 3. *Сорокин В.В.* Расчет времени пуска пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализующей системы безопасности АЭС с ВВЭР. Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 1. С. 67–75.

## 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 научно-техническом 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 <a href="www.niti.ru">www.niti.ru</a> в рубрике «Научно-технический сборник «Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок».

#### Информация для авторов

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 A4 (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) 6-05-46, 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 27.06.2022. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать цифровая. Формат  $60\times90/8$ . Усл.-печ. л.11,75. Заказ 44500. 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