

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Обнинский институт атомной энергетики  
Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»  
Ядерное общество России

# ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1993 г.

N1 2013 г.

### СОДЕРЖАНИЕ

#### АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

<i>П.Л. Кириллов</i> Водоохлаждаемый реактор ВВЭР СКД (предварительные разработки) .....	5
---	---

#### МАТЕРИАЛЫ И ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

<i>П.Н. Мартынов, К.Д. Иванов, О.В. Лаврова, С.-А.С. Ниязов, В.М. Шелеметьев, В.В. Ульянов, Р.П. Садовничий, А.С. Фомин</i> Влияние диффузионного выхода металлических компонентов сталей через оксидные покрытия на массоперенос в циркуляционных контурах с тяжелыми свинецсодержащими теплоносителями .....	15
<i>В.И. Павленко, Л.Л. Лебедев, В.В. Прозоров, В.А. Доильницын</i> Отработка режимов пассивации на стальной трубчатке парогенераторов АЭС .....	20
<i>А.С. Алой, Ю.А. Барбанель, А. В. Трофименко</i> Титаносиликатная стекломатрица для отверждения отходов, содержащих f-элементы .....	28

#### БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЯЭУ

<i>Титаренко Н.Н., Дворников П.А., Ковтун С.Н., Полионов В.П.</i> Использование генерации акустических колебаний в химической реакции и свойств пузырьковой среды в жидкости для выявления сквозных дефектов оболочек блоков с натрием .....	35
<i>В.И. Мельников, В.В. Иванов, Ю.А. Киселев, А.А. Киселев, К.М. Милясов</i> Исследование акустозондовых сигнализаторов уровня теплоносителя в интегральном стенде КВ-2 .....	43
<i>К.Н. Маловик, В.В. Никишин</i> Прогнозирование состояния теплоносителя ядерных реакторов .....	48

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

<i>В.А. Старков, Н.Ю. Марихин</i> Методика и программа расчета стационарного температурного поля в системе многозонных цилиндрических твэлов .....	54
<i>Н.М. Троянова, В.П. Гинкин</i> Сверхнеявная схема неполной факторизации для решения трехмерных разностных уравнений эллиптического типа .....	63

**А.В. Гулевич, О.Ф. Кухарчук, Н.И. Логинов, А.С. Михеев**

О преобразовании тепловой энергии ядерного реактора в энергию направленного потока электромагнитного излучения в ядерно-фотонном движителе ..... 71

## ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕПЛОГИДРАВЛИКА

**А.Ю. Легких, П.Н. Мартынов, Р.Ш. Асхадулин**

Расчет массообменных аппаратов для обеспечения заданного кислородного режима в тяжелом жидкокометаллическом теплоносителе ..... 80

**В.И. Белозеров, Е.В. Варсанов, В.В. Колесов**

Моделирование влияния недогрева теплоносителя в органах регулирования на измерение температуры на выходе из ТВС реактора ВВЭР-1000 ..... 92

**В.А. Грабежная, А.С. Михеев, Ю.Ю. Штейн, А.А. Семченков**

Расчетно-экспериментальное исследование работы модели парогенератора БРЕСТ-ОД-300 ..... 101

## ФИЗИКА И ТЕХНИКА РЕАКТОРОВ

**О.Ю. Кочнов, В.В. Колесов, Р.В. Фомин**

Оценка увеличения производства  $^{99}\text{Mo}$  при различных компоновках активной зоны на реакторе ВВР-ц ..... 110

## ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

**Т.А. Горшкова, Р.С. Чурюкин, О.А. Карагузова, Н.В. Амосова, Н.Н. Павлова,**

**Ю.М. Мартirosyan, О.П. Власова, И.М. Симакова**

Изучение зависимости флюктуирующей асимметрии у растений от величины радиоактивного загрязнения территории ..... 116

## ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ

**А.А. Юдов, Ю.А. Соколов, Ю.И. Чернухин**

Гетерогенный сцинтиляционный детектор гамма-излучения для обнаружения азотосодержащих взрывчатых веществ нейтронно-радиационным методом ..... 125

**Н.К. Вознесенский, Н.В. Богданов, С.Л. Дорохович, Ю.Г. Забарянский, Е.С. Матусевич,  
Ю.А. Кураченко, В.А. Левченко, Ю.С. Мардынский, Вознесенская Н.Н.**

Моделирование гипертермии при стабилизирующй вертебропластике ..... 133

## CONTENTS

### URGENT PROBLEMS OF NUCLEAR POWER ENGINEERING

<i>Kirillov P.L.</i> Water Cooled Reactor VVER SCP (preliminary elaboration) .....	5
---	---

### MATERIALS OF NUCLEAR POWER ENGINEERING

<i>P.N. Martynov, K.D. Ivanov, O.V. Lavrova, S.-A.S. Niasov, V.M. Shelemet'ev, V.V. Ulyanov, R.P. Sadovnichy, A.S. Fomin</i> Effect of the Diffusion of Metal Components out of Steel through the Oxide Coating on Mass Transfer in Flow Circuit with Heavy Lead-containing Coolants .....	15
<i>V.I. Pavlenko, L.L. Lebedev, V.V. Prozorov, V.A. Doilnitsyn</i> Mining Conditions Passivation on Steel Pipe Heaters Steam Generator NPP .....	20
<i>A.S. Aloy, Y.A. Barbanel, A.V. Trofimenko</i> The Titanosilicate Glass Matrix for Immobilization of the Wastes Containing f-elements .....	28

### SAFETY, RELIABILITY AND DIAGNOSTICS NPP

<i>N.N. Titarenko, P.A. Dvornikov, S.N. Kovtun, V.P. Polionov</i> Use of Generation of Acoustic Vibrations in Chemical Reaction and Properties of the Bubble Medium in Liquid to Reveal through Defects in Claddings of Slugs with Sodium .....	35
<i>V.I. Melnikov, V.V. Ivanov, Yu.A. Kiselev, A.A. Kiselev, K.M. Miriasov</i> The Investigation of the Acoustic Level Limit Switch of Coolant in the Integrated Stand of the KV-2 .....	43
<i>K.N. Malovik, V.V. Nikishin</i> Coolant Forecasting of Nuclear Reactors .....	48

### SIMULATIONS OF THE PROCESS PERFORMANCE IN NUCLEAR POWER FACILITIES

<i>V.A. Starkov, N.Yu. Marikhin</i> Technique and Software to Calculate Temperature Field in the System of Layered Cylindrical Fuel Elements .....	54
<i>N.M. Troyanova, V.P. Ginkin</i> The Overimplicit Scheme of Incomplete Factorization Method for Solving the Three-dimensional Difference Equations of Elliptic Type .....	63
<i>A.V. Gulevich, O.F. Kukharchuk, N.I. Loginov, A.S. Mikheev</i> On the Conversion of Thermal Energy of Nuclear Reactor into Directional Flow Energy of Electromagnetic Radiation in Nuclear-Photon Engine .....	71

### THERMAL PHYSICS AND HEATHYDRAULICS

<i>A.Yu. Legikh, P.N. Martynov, R.Sh. Ashkadyllin</i> Calculation of Mass Exchangers for Providing Specific Oxygen Regime in Heavy Liquid Metal Coolant .....	80
<i>Belozerov V.I., Varseev E.V., Kolesov V.V.</i> The Modeling of Subheated Coolant Influence on Temperature Measurement at the Exit of Fuel Rod Assambly in WWER-1000 reactor .....	92
<i>V.A. Grabezhnaya, A.S. Mikheev, Yu.Yu. Stein, A.A. Semchenkov</i> Numerical and Experimental Investigation of the Model Steam Generator Reactor Facility BREST-OD- 300 .....	101

**REACTOR PHYSICS AND TECHNOLOGY**

*O.Yu. Kochnov, V.V. Kolesov, R.V. Fomin*

Assessment of the Increasing in  $^{99}\text{Mo}$  Production for Different WWR-c Reactor Core Compositions 110

**ENVIRONMENTAL ASPECTS OF POWER ENGINEERING**

*T.A. Gorshkova, R.S. Churyukin, O.A. Karaguzova, N.V. Amosova, N.N. Pavlova,*

*Y.M. Martirosyan, O.P. Vlasova, I.M. Simakova*

Study of the Dependence of Fluctuating Asymmetry in Plants of the Size of Radioactive Contamination ..... 116

**APPLICATION OF NUCLEAR METHODS AND MEANS**

*A.A. Yudov, Yu.A. Sokolov, Yu.I. Chernukhin*

Nitrogenous Explosives Detection by Neutron-Radiation Method Using Gamma Radiation

Heterogeneous Scintillation Detector ..... 125

*N.K. Voznesensky, N.V. Bogdanov, S.L. Dorokhovich, Yu.G. Zabaryansky, Eu.S. Matusevich,*

*Yu.A. Kurachenko, V.A. Levchenko, Yu.S. Mardynsky, N.N. Voznesenskaya*

Modeling of Hyperthermia at Stabilizing Percutaneous Vertebroplasty ..... 133

# ВОДООХЛАЖДАЕМЫЙ РЕАКТОР ВВЭР СКД (ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАЗРАБОТКИ)

П.Л. Кириллов

ГНЦ РФ–Физико–энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Представлен краткий обзор состояния атомной энергетики на 01.01.2013. Проект водоохлаждаемого реактора на сверхкритическом давлении (ВВЭР СКД) опирается на накопленный опыт ВВЭР, PWR, BWR, RBMK (более 14000 реакторо-лет), многолетний мировой опыт эксплуатации тепловых электростанций, в которых используется пар сверхкритических и суперсверхкритических параметров. Освещаются преимущества такого реактора и научно–технические проблемы, требующие решения при его разработке. Накопленные за последние 10 лет знания позволяют уточнить концепцию и приступить к проектированию экспериментального реактора небольшой мощности.

**Ключевые слова:** реактор, сверхкритическое давление воды, поколение IV, преимущество методологии INPRO.

**Key words:** reactor, supercritical water, Generation IV, advantages, INPRO approach.

## ВВЕДЕНИЕ

На 01.01.2013 г. в мире действуют 435 ядерных реакторов, другие сооружаются, многие уже запланированы к сооружению на предстоящие 15 лет, а различные фирмы и организации подготовили долгосрочные предложения о постройке в будущем еще ряда блоков АЭС. Общий опыт эксплуатации ядерных реакторов составляет около 15000 реакторо-лет. В ближайшие годы часть работающих реакторов выработают свой ресурс и будут остановлены, но, тем не менее, следует ожидать, что через 20 лет количество работающих реакторов может достичь 800–850 (табл. 1) [1, 2].

Таблица 1

## Ядерные реакторы мира

	Количество	Суммарная мощность, ГВт
Действующие	435	374
Строящиеся	65	65
Запланированные к строительству	167	184
Предложенные к рассмотрению на 15 – 20 лет	317	360

Наибольшее количество реакторов (84%) расположено в 11–ти странах (табл. 2). 13 стран можно считать наиболее зависимыми от атомной энергетики,

## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

поскольку ее доля в производстве электроэнергии у них составляет более 30% (табл. 3).

### **Страны, имеющие наибольшее количество реакторов по данным на 01.01.2013**

Таблица 2

Страна	Количество	Общая электрическая мощность, ГВт эл.	Доля, %
США	104	102,2	19,2
Франция	58	63,1	77,7
Япония	50	44,4	18,1
Россия	33	24,2	17,6
Корея южная	23	20,8	34,6
Индия	20	4,4	3,7
Канада	19	13,5	15,3
Китай	16	12,9	1,8
Великобритания	16	10,0	17,8
Украина	15	13,2	47,2
Швеция	10	9,4	39,6
В мире	435	374,1	13,5

Источник: World Nuclear Power Reactors. <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html>

### **Страны, наиболее зависимые от производства атомной энергии**

Таблица 3

Страна	Доля, %	Количество реакторов
Франция	77,7	58
Бельгия	54	7
Словакия	54	4
Украина	47,2	15
Венгрия	43,2	4
Словения	41,7	1
Швейцария	40,8	5
Швеция	39,6	10
Корея южн.	34,6	23
Армения	33,2	1
Чехия	33,0	6
Болгария	32,6	2
Финляндия	31,6	4

Источник: World Nuclear Power Reactors. <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html>

Следует полагать, что закрытие этого источника энергии для них чревато потрясениями в экономике, и маловероятно, что они смогут отказаться от нее.

В 2012 г. потребление урана в мире составило 68 тыс. т и в ближайшие 10–15 лет может вырасти до 100 тыс. т в год. Основные потребители урана (в тыс. т): США (20), Франция (9,2), Китай (6,5), Россия (5,5), Япония (5), Корея южная (4,2), Индия (4).

Оценки показывают, что, если не будут найдены и развиты другие большие источники энергии типа месторождения газа в сланцах, неминуем переход к созда-

нию реакторов с воспроизведением ядерного топлива, т.е. с быстрым спектром нейтронов.

В Международной программе «Поколение IV» (Generation IV) обозначены пять типов быстрых ядерных реакторов (см. табл. 4, где их характеристики приведены в алфавитном порядке). Теплоносителями в этих реакторах предполагаются гелий, свинец, расплавы солей, натрий, вода, из которых промышленное использование в атомной энергетике нашли только вода (наработка более 14000 реакторо-лет) и натрий (наработка около 270 реакторо-лет)\*). Наибольшие успехи достигнуты в России (БН-600, БОР-60, БН-350). Разработка реакторов с охлаждением натрием ведется во Франции, Японии, Индии, Китае [7, 11, 12, 18]. Международное сообщество обратилось к созданию быстрых реакторов, и МАГАТЭ организовало две международные программы по SFR (Sodium-cooled Fast Reactors) и SCWR (Supercritical Water-cooled fast Reactors). Другие теплоносители пока не нашли место в ядерной энергетике или их опыт оказался неудачным. Так все демонстрационные и коммерческие реакторы в мире с охлаждением гелием закрыты (США и Германия) или дорабатывают свой ресурс (Великобритания). Опыт использования фторидных солей также не получил распространения, хотя экспериментальный реактор работал [8, 9, 16].

Проект реактора БРЕСТ-300 с охлаждением свинцом вызвал острую дискуссию среди специалистов. Опубликовано много работ, выполненных в обоснование этого проекта, и еще очень многое предстоит сделать [3–5].

Таблица 4

#### **Реакторы на быстрых нейтронах, охлаждаемые разными теплоносителями (Generation IV)**

Аббревиатура	Наименование	Теплоноситель	Температура, °C	Давление, МПа	Топливо	Мощность, МВт эл.
GFR	Gas-cooled fast reactors	Гелий	850	7 – 15 высокое	$\text{U}^{238}$	1200
LFR	Lead-cooled fast reactors	Свинец	480 – 800	~ 2 низкое	$\text{U}^{238}$	20 – 180 300 – 1200 600 – 1000
MSR	Molten salt fast reactors	Расплав: фторид соли	700 – 800	~ 2 низкое	$\text{UF}$	1000
SFR	Sodium-cooled fast reactors	Натрий	550	~ 2 низкое	$\text{U}^{238}$ и MOX	300 – 1500 1000 – 2000
SCWR	Supercritical water-cooled fast reactors	Вода	510 – 625	25 высокое	$\text{UO}_2$	300 – 700 1000 – 1500

Источник: WNA. <http://www.world-nuclear.org/info/inf77.html>

Проект водоохлаждаемого ядерного реактора на сверхкритических параметрах **ВВЭР СКД** (Generation IV) или SCWR по международной классификации описывается на

- накопленный опыт эксплуатации ВВЭР, PWR, BWR – более 14000 реакторо-лет;
- многолетний мировой опыт эксплуатации тепловых электростанций – более 400 блоков, 20000 блок-лет, в которых используется водяной пар сверхкритичес-

\* БОР-60 (1969-н/в), БН-350 (1972-99), БН-600 (1980- н/в), Phoenix (1973-2003), Super Phoenix (1985-98),

DFR (1959-77), PFR (1974-94), EBR-2 (1963-98), FFTF (1980-96), FBTR (1985- н/в), MONJU (1994-2009).

## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

ких параметров (СКП) (25 МПа, 540°C) и суперсверхкритических (35–37 МПа, 620–700°C).

Концепция одноконтурной ЯЭУ на СКД базируется на опыте тепловой энергетики СССР и России (котлы ЗИО, ТКЗ; турбины ЛМЗ, ХТЗ). Данные табл. 5 дают представление об энергоблоках с СКД в России и странах СНГ.

Таблица 5

### Распределение энергоблоков по мощности

Мощность блока, МВт эл.	300	500	800	1200	Всего
Количество блоков в СНГ	195	16	20	1	232
В том числе в России	107	7	14	1	129

Годовой рост количества блоков 300 МВт был стремительным: в 1963 г. – 1, в 1965 г. – 12, в 1970 г. – 69, в 1975 г. – 144.

Эта концепция опирается также на разработки ЯЭУ с ядерным перегревом пара, опыт эксплуатации пароперегревательных твэлов на БАЭС (540–560°C).

В истекшие 1964–1990 гг. и позже к этой задаче приступали Курчатовский институт, ОКБ «Гидропресс», ОКБМ, НИКИЭТ. Однако эти разработки не получили в то время должного развития. После первого международного семинара (2000 г.) в ГНЦ РФ-ФЭИ были начаты расчетные работы по физике и теплогидравлике. Результаты обсуждались на межведомственных семинарах и конференциях.

Сейчас разработки по данной тематике ведутся более чем в 15-ти странах (Япония, Корея, Канада, Европейское сообщество, Китай и др.) [13, 17, 19, 21]. Реализуется проект Международной программы основных направлений НИОКР в этой области, ход которого регулярно обсуждается на заседаниях рабочих групп МАГАТЭ. В 2011 г. Россия вступила в программу «Международный форум «Поколение IV» (GIF – the Generation IV International Forum). Еще ранее ОКБ «Гидропресс», ГНЦ РФ-ФЭИ и РНЦ КИ разработали в 2007 г. основы концепции коммерческого реактора для АЭС 1700 МВт эл. [20, 22].

### ДЕСЯТЬ ПРЕИМУЩЕСТВ КОНЦЕПЦИИ ВВЭР СКД

**Жесткий (быстрорезонансный) спектр нейtronов** позволяет достичь высокого коэффициента воспроизводства топлива (около 1), сократить расходы урана, обеспечить использование U<sup>238</sup>, выжигание радиоактивных отходов. В качестве топлива можно использовать освоенный диоксид урана, MOX-топливо или другие виды топлив, которые предполагается использовать в БН-800, 1200.

**Увеличение коэффициента полезного действия цикла** до 44–45 % вместо существующих на АЭС 33–34 % (на современных ТЭС КПД приближается к 50–53 %) не только приводит к экономии топлива, но и улучшает экологическую обстановку около АЭС (сокращаются выбросы тепла, испарение воды в окружающих водоемах).

**Уменьшение расхода теплоносителя** через активную зону, связанное с возможностью увеличения подогрева теплоносителя в активной зоне от 280 до 540°C, т.е. на 270°C по сравнению с подогревом в ВВЭР – 30–35°C, сокращает проходные сечения трубопроводов (в 2,5–3 раза), размеры запорно-регулирующей аппаратуры, мощности и размеры главных циркуляционных насосов, снижает затраты энергии на прокачку теплоносителя, уменьшает количество петель (до двух).

**Прямоточная схема АЭС** сокращает количество оборудования, позволяет отказаться от парогенераторов – оборудования второго контура, компенсаторов давления, насосов второго контура, сепараторов. Установки ВВЭР СКД выгодно отличаются от остальных ЯЭУ капитальными затратами и прогнозируется, что их стоимость на 20–30% будет ниже стоимости ВВЭР.

**Обеспечивается применение освоенного серийного оборудования** машинного зала, широко используемого в настоящее время в тепловой энергетике (турбины, подогреватели и т.п.).

**Упрощение систем безопасности** по сравнению с действующими ВВЭР. Исключаются (или значительно сокращаются) проблемы водородной безопасности при отказе от циркониевых сплавов и использовании оболочек твэлов из нержавеющих сталей или никелевых сплавов, снимается необходимость во многих компонентах этой системы.

**Значительно уменьшается объем защитной оболочки** при той же мощности АЭС вследствие исключения парогенераторов и другого оборудования, что снижает и затраты и сроки строительства.

**Указанные факторы** приводят к меньшей металлоемкости РУ по сравнению с существующими ВВЭР, сокращению объема и сроков строительных работ. Подтверждением является и анализ такого показателя как удельная металлоемкость РУ в т/МВт эл. У БН-реакторов этот показатель равен 17,7 для БН-350; 13,0 для БН-600 и 9,7 для БН-800. У реакторов ВВЭР-1000 этот показатель равен 3,25; у двухконтурного реактора ВВЭР СКД И – 3,1, для одноконтурного реактора ВВЭР СКД около 1,4–1,6. Упрощение конструкции и применение отработанных технологических решений позволяет также сократить сроки строительства.

**Сокращение эксплуатационных затрат.** Уменьшение количества оборудования, приборов РУ сокращает не только затраты на его проектирование, изготовление, монтаж, но и на ремонт, включая замену в случае необходимости.

**Выбор корпусного реактора** ВВЭР СКД связан с 50-летним опытом разработки, изготовления и эксплуатации реакторов ВВЭР в СССР, России, Украине и других странах.

Реализация этих преимуществ зависит от дальнейших систематических научных исследований и технических разработок

## **НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, ТРЕБУЮЩИЕ РЕШЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ВВЭР СКД**

Перечень проблем, требующихся для обоснования ВВЭР СКД и начала проектирования экспериментального реактора с тепловой мощностью 30 МВт, достаточно стандартен и очевиден, как и при разработке реактора любого типа.

**Основные задачи физики реактора** – это определение приемлемых значений коэффициента воспроизводства (КВ) топлива и выгорания; обеспечение отрицательных коэффициентов реактивности в разных режимах работы реактора и его самозащищенности.

**Проблемы материалов**, в первую очередь, касаются корпуса, топлива, оболочек твэлов. Конструкционные материалы корпуса (стали 12X18H12T, 08X18H12T) испытаны в потоке быстрых нейтронов при разработке и эксплуатации реакторов БР-10, БОР-60, БН-600, БН-800. Необходим анализ возможных изменений этих материалов в другом спектре нейтронов. Топливо – диоксид урана  $UO_2$  – широко используется в реакторах разного типа, и какие-либо проблемы в случае его применения в экспериментальном ВВЭР СКД-30 пока не просматриваются. Материалы оболочек твэлов предстоит выбрать на основании опыта эксплуатации оболочек твэлов БОР-60, БН-350, БН-600. Вероятно, это будут хромоникелевые сплавы (17Cr, 13Ni, 2Mo), для которых требуется провести оценку величины распухания при соответствующих интенсивностях облучения (сна) [10–12].

**Особенности теплогидравлических процессов** в таком реакторе – значительное изменение плотности и теплоемкости воды при сверхкритических параметрах

## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

( $T_k = 374,096^\circ\text{C}$ ,  $P_k = 22,064 \text{ МПа}$ ,  $r_k = 322 \text{ кг}/\text{м}^3$ ). При  $P < P_k$  и  $P > P_k$  характер зависимостей коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления хорошо исследован применительно к каналам разной формы.

При окологранических параметрах эти характеристики измерить трудно. В настоящее время неопределенность (погрешность) в расчетах коэффициентов теплоотдачи для каналов простой формы (круглая труба, плоская щель) составляет  $\pm (15-20)\%$ .

Для начального этапа разработок такая неопределенность (точность) достаточна, но необходимо проведение дополнительных экспериментов в каналах простой и сложных форм, в первую очередь, на пучках стержней с тесной упаковкой (например, с шагом 1,1–1,15). Возможность появления режима ухудшенного теплообмена можно ликвидировать закруткой потока, дистанционирующими решетками и т.п.

Плотности тепловыделения ( $\text{kVt}/\text{l}$ ) и характерные линейные нагрузки характеризуются следующими значениями.

Тепловыделение	ВВЭР	ВВЭР СКД
$q_i, \text{kVt/l}$	110	$\sim 110$
$(q)_\text{ср., Bt/cm}$	160 – 178	160
$(q)_\text{max, Bt/cm}$	448	$\sim 300$

Именно в этих условиях необходимы эксперименты по исследованию теплообмена в тесных пучках стержней с целью создания более совершенных методик расчетов и поиск приемлемых методов интенсификации теплообмена.

Предстоит также исследовать процессы перемешивания струй «холодной» ( $T < T_k$ ) и «горячей» воды ( $T > T_k$ ) с целью выявления неустойчивых режимов, которые в проведенных экспериментах пока не появлялись.

*Особенности водно-химического режима (ВХР) при СКД в котлах на ТЭС* хорошо отработаны. Специфика применения воды окологранических параметров в ядерных реакторах связана с воздействием радиационного излучения и возникающего радиолиза воды, что имеет место в реакторах типа ВВЭР, BWR, РБМК.

Предстоит оценить и экспериментально исследовать это явление в другом, более жестком, спектре нейтронов, включая массоперенос продуктов коррозии и радионуклидов. Исследования коррозии материалов, намеченных к применению в ВВЭР СКД, должны быть выполнены как в статических условиях, так и в потоках воды в поле реакторного излучения, т.е. непосредственно в реакторных петлях.

*Проблемы создания систем безопасности* реактора ВВЭР СКД аналогичны тем, что решаются при разработке ВВЭР (активные и пассивные системы). Особенностью экспериментального реактора ВВЭР СКД-30 и в дальнейших проектах с СКД будет создание организации естественной циркуляции в контуре реактора с помощью специальных устройств или отдельных каналов для отвода тепла.

Проверка научно-технических решений по конструкции ВВЭР СКД должна быть проведена на моделях, а отдельные конструкции узлов испытаны в натуральную величину. Предстоит разработка и верификация программных средств, включая коды улучшенной оценки, для связанных расчетов нейтронно-физических и тепло-гидравлических характеристик ВВЭР СКД, которые будут учитывать сложный характер изменения свойств теплоносителя в пределах рабочих температур ( $T_{\text{вх}} = 350^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{вых}} = 550^\circ\text{C}$ ).

Опыт создания реакторов на быстрых нейтронах в России показывает, что следует начинать с разработки экспериментального реактора небольшой мощности

(~ 30 МВт), например, ВВЭР СКД-30. Именно на такой установке можно проверить основные технические решения, отработать необходимые режимы и найти решения возникающих проблем. Как показывает опыт, игнорирование предварительного (перед демонстрационным) создания экспериментальных реакторов малой мощности (таких как БН-10, БОР-60, EBR-2 и т.п.) приводит к многолетним затратам без получения существенных результатов для создания коммерческого блока [7, 10, 14, 18].

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗРАБОТОК ВВЭР СКД

Анализ выполнен в МАГАТЭ на основании методологии ИНПРО<sup>\*</sup>)

Процедура оценки ИНПРО включает в себя возможность сравнения различных типов ЯЭУ (или различных конструкций её узлов) с целью определения оптимальной системы или выявления её сильных и слабых сторон с точки зрения конкурентоспособности и установления конкретных целей для разработчиков.

На настоящем этапе применение данной методологии в полном объеме затруднительно, так как ее разработка пока еще не завершена и отсутствуют многие данные по разрабатываемым установкам. Вместе с тем, отдельные количественные и качественные оценки уже можно сделать.

*Суждение о возможностях ЯЭУ.* В концепции достаточно детально рассмотрены возможности развития АЭС с ВВЭР СКД: повышение КПД по сравнению с ВВЭР, PWR и BWR; применение отработанных технологий и, как следствие, сокращение сроков создания и строительства; применение различных видов топлива, что может быть особенно важно в переходный период к использованию MOX-топлива, так как позволяет примерно в два раза сократить потребление природного урана. Кроме того, применение быстрого ВВЭР СКД привлекательно с позиций обеспечения КВ = 1. Это позволяет «смягчить» требование по высокому темпу ввода БН-реакторов.

*Суждение о зрелости ЯЭУ.* Недостаточность сведений приводит, согласно методологии ИНПРО, к риску. Вместе с тем, проведение таких исследований, как реакторные испытания твэлов в условиях СКД позволит сделать конкретные выводы по перспективности данного направления. Степень неопределенности следует отнести к умеренной на основании имеющихся исследований и опыта эксплуатации котлотурбинных установок ТЭС и одноконтурных реакторных установок: БАЭС – блоки №1 и 2, РБМК, ВК-50 и BWR. Перспективными этапами работ могут быть реакторные и стендовые испытания для обоснования выбора конструкций твэла и расчетных методик и создание экспериментальной установки.

Для сравнительной оценки с другими проектами данных пока недостаточно.

*Доступность стоимости энергии для потребителя.* Этот принцип будет выполнен, так как прогнозы по применению атомной энергетики являются оптимистическими. Этот показатель будет близок к показателю для реакторов PWR, BWR и ВВЭР.

*Допустимость по объему инвестиций.* Установки ВВЭР СКД выгодно отличаются от остальных ЯЭУ капитальными затратами (примерно в 1,5–2 раза в сравнении с БН–реакторами), и прогнозируется, что их стоимость на 20–30 % будет ниже стоимости ВВЭР.

<sup>\*</sup> Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам был создан по инициативе Президента РФ В.В. Путина в сентябре 2000 г.

Методология оценки инновационных ядерных реакторов и топливных циклов изложена в Техническом отчете МАГАТЭ IAEA-TECDOC-1434. [6, 10, 15].

## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

---

*Риск инвестиций.* Критериями по данному требованию являются сроки лицензирования, строительства и устойчивость политической обстановки. Они будут получены в дальнейшем для конкретной страны и фирмы. Можно прогнозировать, что какие-либо особенности для данной установки вряд ли возникнут. По конструкции первого контура, исполнению защитной оболочки (30) и размещению турбины (вне 30) одноконтурная установка подобна установкам с ВВЭР, которые во многих странах уже сооружаются и лицензированы (ВВЭР, PWR, BWR).

### Требования по надежности и безопасности

– Проектный срок эксплуатации – 60 лет; высокий КИУМ; хорошая управляемость в диапазоне уровней мощности 100 – 50 – 100 %; топливный цикл до 24-х месяцев. Пока данные для оценки выполнимости этих требований отсутствуют.

– Запасы для снижения чувствительности к нарушениям, когда требуется подключение систем безопасности, пока отсутствуют. Они будут получены после выполнения технического проекта.

– Частота повреждений активной зоны ниже  $10^{-5}$  на реакторо-год, а суммарная частота крупного выброса в результате повреждения активной зоны реактора ниже  $10^{-6}$  на реакторо-год. В проектах аналогов – усовершенствованных BWR эти требования выполняются. Оценка применительно к ВВЭР СКД будет получена в дальнейших разработках.

– Автоматизация процессов (снижение вероятности совершения оператором ошибки) и конструктивные средства для управления тяжелыми авариями должны быть выполнены на стадии проекта. Кроме того, следует рассмотреть требования по более низким целевым значениям выбросов применительно к Европе, странам Азии, США.

– «*Инновационная конструкция должна включать в себя эшелонированную защиту как часть фундаментального подхода к безопасности и обеспечивать такие уровни эшелонированной защиты, которые будут более независимы, чем в существующих установках.*» Этот базовый принцип будет выполнен. Перспективно применение керметного топлива, матрица которого может сыграть роль дополнительного защитного барьера, «не зависимого» от других.

Так же, как и для других проектов, будут приняты меры по организации и формированию групп составляющих, обеспечивающих защищенность от распространения – внутренне присущие свойства и внешние меры.

**Итак, рассматриваемый проект наиболее привлекателен с позиций базового принципа для инфраструктуры – адаптации АЭС без чрезмерных инвестиций [13, 21, 22].**

Привлекательность проекта обусловлена применением наиболее распространенного теплоносителя – воды; использованием опыта эксплуатации котлотурбинных установок ТЭС (турбин, теплообменного оборудования), меньшими экономическими затратами, чем для других инновационных концепций. Реакторы ВВЭР СКД, согласно методологии ИНПРО, являются привлекательными. В полной мере методологию ИНПРО на данном этапе применить не удается, так как пока еще недостаточно сведений для полного анализа, но сравнительный анализ по ряду критериев SCWR, SFR, LFR уже вполне возможен несмотря на разные уровни знаний их характеристик и предстоящих исследований технических проблем.

Анализ зарубежных исследований по ВВЭР СКД свидетельствует об их системности, согласованности и, что особенно важно, заблаговременной подготовке кадров. Зарубежные институты – Мак Мастер университет, Гамильтон (Канада), Международный Центр теоретической физики в Мирамаре, Триест (Италия) – проводят совместно с МАГАТЭ специальные курсы по конструкции и технологии SCWR.

Цель курсов – подготовка преподавателей для будущих специалистов по этой тематике в атомной энергетике.

Для уже работающих специалистов по данному направлению ядерной техники проводятся международные симпозиумы, на которых обсуждаются практические вопросы по концепции SCWR и достижения отдельных коллективов в областях реакторной физики; материалов, химии воды и коррозии; теплогидравлики; безопасности; тепловых схем АЭС, проблемных вопросов и методов их решения.

Отсутствие в РФ в течение длительного времени утвержденной программы по ВВЭР СКД создает опасность потери приоритета России. Сохранение такого состояния в течение еще двух–трех лет может привести к тому, что Россия безнадежно отстанет в освоении технологии SCWR.

Накопленные за последние 10 лет знания позволяют уточнить разработанную ранее концепцию, наметить план первоочередных исследований, составить техническое задание и приступить к проектированию экспериментального реактора небольшой мощности –30 МВт тепл. – ВВЭР СКД–30.

### **Литература**

1. WNA Reactor Database 01.01.2013.
2. The Future of the Nuclear Fuel Cycle. Massachusetts Institute of Technology. 2011.
3. Алексеев П.Н., Асмолов В.Г., Гагаринский А.Ю. идр. О стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 г. // Атомная энергия. 2011. Т. 111. Вып. 4. – С. 183–196. См. также книгу с тем же названием – М.: Изд–во НИЦ «Курчатовский институт», 2012.
4. Драгунов Ю.Г., Мелихов В.В., Смирнов В.С., Чернецов Н.Г. Технические решения и этапы разработки РУ БРЕСТ–ОД–300. // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 1. С. 58–64.
5. Адамов Е.О., Джалаян А.В., Лопаткин Д.В. идр. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России до 2100 г. // Атомная энергия. 2012. Т. 112. Вып. 6. С. 319–331.
6. Введение в использование методологии ИНПРО для оценки ядерно–энергетических систем. – Изд–во МАГАТЭ. № NP–T–1.12. – Вена. 2011.
- Эл. текст на русск. яз. [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1478R\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1478R_web.pdf). См. также IAEA–TECDOC–1434.
7. Takeda T., Shimazu Y. Review of Safety Improvement on Sodium–cooled Fast Reactors after Fukushima Accident. – Natural Science. V. 4. Special ISSUE. 2012. Pp. 921–935.
8. Mac Pherson H. The Molten Salt Reactor Adventure. – Nucl. Sci. Eng. 1985. V.90. No 4. Pp. 374–380.
9. Proc. International Conference GLOBAL–2011. Toward and Over the Fukushima Daiichi Accident. – Japan. Makuhari. 2011.
10. Beaty R.L., Gowin P.J., Phillips J.R., Ocenic E.L. The International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO). Paper on European Nuclear Conference (ENC 2012). – Manchester. UK. 9–12 December. 2012.
11. Le Coz P. et al. Sodium–cooled Fast Reactor the ASTRID Plant Project. – Proc. ICAPP 2011. Nice. France. 2–5 May. 2011.
12. Beils S. et al. Safety Approach and R&D Program for Future French Sodium–cooled Reactors. – Jour. Nucl. Sci. and Techn. 2011. V.48. No 4.
13. Schulenberg T. Supercritical Water–cooled Reactor (SCWR). – Report on the Working Group IAEA on SCWR Programme. – Mississauga. Toronto. Canada. 19–23 September. 2011.
14. Bychkov A. Fast Reactors and Closed Fuel Cycle: Safety Technologies and Sustainability. – Proc. of IAEA – IAEA Int. Workshop on Prevention and Mitigation of Severe Accidents in Sodium–cooled Fast Reactors. Japan. Tsuruga. 11–13 June. 2012. (Cit. by [7]).
15. ИНПРО: Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам. <http://www.atomic-energy.ru/articles/2012/08/22/35443>
16. Ingersoll D.T. Status of Physics and Safety Analyses for the Liquid–salt–cooled, Very High – Temperature Reactor (LS – VHTR). – ORNL/TM – 2005/218 (Dec. 2005). (Cit. by [7]).

## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

---

17. Corradini M. Supercritical Flow and Heat Transfer in Advanced Reactor. – Nucl. Tech. 2013. V. 181. No 1. Pp. 2–10.
18. Aoto K. Uto N., Sakamoto Y. et al. Design Study and R&D Progress on Japan Sodium-cooled Fast Reactor. – Jour. Nucl. Sci. and Techn. 2011. V.48. Pp. 463–471.
19. Duffey R.B., Pioro I., Zhou X. et al. Supercritical Water-cooled Nuclear Reactors Current and Future Concepts. – Proc. ICONE-16, paper 48869. USA. Orlando. 11–15 May. 2008.
20. Драгунов Ю.Г., Рыжков С.Б., Никитенко М.П. и др. Водоохлаждаемые реакторы со сверхкритическими параметрами (ВВЭР СКД) – перспективные реакторы 4-го поколения. – Доклад на VIII Конференции по реакторному материаловедению. – НИИАР. Димитровград. 2007.
21. Starfinger J., Shulenberg T., Marsault P. et al. European Research Activities within the Project: "High Performance Light Water Reactor Phase 2". – Proc. ICAPP-07, paper 7146. Nice. France. 13–18 May. 2007. См. также работу этих авторов «High Performance Light Water Reactor—design and Analyses». – KIT Scientific Publishing. 2012.
22. Ryzhov S.B., Mohov V.A., Nikitenko M.P. et al. Concept of a Single-circuit RP with Vessel Type SCWR. – Report on 8-th Int. Symposium (ISSCWR+5). Paper P076. – Vancouver. Canada. 13–16 March. 2011.

Поступила в редакцию 17.01.2013

# ВЛИЯНИЕ ДИФФУЗИОННОГО ВЫХОДА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ СТАЛЕЙ ЧЕРЕЗ ОКСИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА МАССОПЕРЕНОС В ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ КОНТУРАХ С ТЯЖЕЛЫМИ СВИНЕЦСОДЕРЖАЩИМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

**П.Н. Мартынов, К.Д. Иванов, О.В. Лаврова, С.-А.С. Нязов,  
В.М. Шелеметьев, В.В. Ульянов, Р.П. Садовничий, А.С. Фомин**  
ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



На основании анализа имеющихся экспериментальных данных вынесены количественные оценки интенсивности поступления металлических примесей непосредственно в теплоноситель. Показано, что в неизотермических условиях циркуляционного контура их доля может составлять 50% и выше от общей интенсивности окисления матрицы стали, что необходимо учитывать при разработке систем технологии теплоносителя.

**Ключевые слова:** диффузия, металлические компоненты, оксидные покрытия, массоперенос, жидкокометаллические теплоносители.

**Key words:** diffusion, metal components, oxide coating, mass transfer, liquid metal.

Обоснование производительности, ресурса и габаритов устройств технологии теплоносителя включает в себя численные оценки результатов взаимодействия теплоносителя с конструкционными материалами первого контура. Это взаимодействие определяет, с одной стороны, локальное и интегральное потребление кислорода, важное для обоснования устройств введения кислорода в теплоноситель, а с другой стороны, поступление металлических примесей в теплоноситель.

Известно, что чрезмерное накопление металлических примесей, которые при нормальных условиях эксплуатации находятся, в основном, в окисленном состоянии, может привести к образованию на теплопередающих поверхностях различных отложений, приводящих к ухудшению их функциональных характеристик. Кроме того, по этой же причине возможно образование в трактах циркуляции теплоносителя блокад проходных сечений с затруднениями и даже полным прекращением расхода. Выход сформированных в теплоносителе твердых частиц на основе оксидов компонентов конструкционных сталей на границу раздела теплоносителя с защитным газом и далее непосредственно в газовую систему РУ может приводить к загрязнению газовой системы, ухудшению радиационной обстановки и нарушениям работоспособности соответствующего оборудования.

© П.Н. Мартынов, К.Д. Иванов, О.В. Лаврова, С.-А.С. Нязов, В.М. Шелеметьев, В.В. Ульянов, Р.П. Садовничий, А.С. Фомин, 2013

Оценка масштаба поступления металлических компонентов конструкционных сталей важна для обоснования устройств фильтрации теплоносителя и защитного газа, а также для оценки радиационных свойств теплоносителя.

До недавнего времени такая оценка осуществлялась исходя из экспериментальных данных по выходу металлических компонентов стали в теплоноситель, полученных при экспозиции образцов в статических установках [1]. В целом, эти данные позволили выявить временную зависимость интенсивности выхода металлических компонентов, показавшую затухающий характер процесса с интенсивным выходом в начальный момент (50% относительно общего количества окислившихся металлических примесей и более) и ее снижением в течение примерно 500–800 часов до уровня ~ 1–2%. Именно эти значения и использовались в дальнейшем для соответствующих численных оценок при длительной экспозиции сталей в тяжелых теплоносителях.

Однако такое развитие процесса окисления, по-видимому, характерно для практически изотермических условий, которые были реализованы в упомянутых экспериментах. Для неизотермических условий, наиболее интересных для практики, ситуация может отличаться коренным образом. Постараемся показать это путем соответствующих численных оценок.

Оценку доли потерь металла в теплоноситель можно выполнить на основании сравнения данных по толщине сформированной оксидной пленки и удельной потери массы образца. Допуская, что материалом оксидной пленки является магнетит, плотности кислорода и железа в котором известны, нетрудно рассчитать массу кислорода и железа в пленке заданной толщины. Учитывая, что измеренный привес образца складывается из массы присоединившегося кислорода и массы потерянного железа, нетрудно вывести расчетную формулу для относительных потерь железа в теплоноситель:

$$\alpha = \frac{(\Delta m_{\text{изм.}} - \Delta m_0^{\text{пл.}})}{\Delta m_{\text{Fe}}^{\text{пл.}} + (\Delta m_{\text{изм.}} - \Delta m_0^{\text{пл.}})}, \quad (1)$$

где соответствующие индексы в изменении масс указывают на результаты измерений привесов или потерь массы и расчетов по толщине пленки.

Для оценки относительных потерь металла данным методом, воспользуемся экспериментальным материалом [2] по окислению различных сталей в свинцевисмуте на достаточно длительной временной базе.

Ниже представлены результаты выполненных нами по формуле (1) оценок относительных потерь металлических компонентов сталей.

Для образцов стали D-9 (легированная аустенитная сталь, содержащая 13,6% Cr и 13,6% Ni) в виде труб при экспонировании в теплоносителе с концентрацией кислорода  $(3-5) \cdot 10^{-6}$  % масс. в течение 1–3 тысяч часов при температурах 460 и 550°C рассчитанные значения относительных потерь составили от 15 до 24%.

Для образцов стали 316 (легированная аустенитная сталь с содержанием ~16–18% Cr и ~10–18% Ni), экспонировавшихся в тех же условиях, полученные значения а составили от 27 до 39%.

Для образцов стали Т-91 (легированная феррито-марテンситная сталь, содержащая ~ 8% Cr) при экспонировании в теплоносителе с концентрацией кислорода  $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6}$  % масс.  $\alpha \sim 21\%$  ( $t = 460^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 1500\text{ч}$ ) и  $\alpha \sim 5\%$  ( $t = 400^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 3000\text{ч}$ ).

Следует отметить, что в ряде случаев оценки, проведенные по рассматриваемой методике, дали отрицательные значения  $\alpha$ . Это можно объяснить наличием на образцах остатков теплоносителя, приводящих к завышенным значениям при определении привесов. По этой же причине представленные выше результаты следует рассматривать как минимальные оценки.

Оценку выхода металлических компонентов в теплоноситель можно выполнить также из данных о содержании металлических компонентов в оксидной пленке и о соответствующих потерях толщины стали.

Для этих условий на основе баланса компонентов стали выражение для потерь металлических компонентов, записанное через коэффициент пропорциональности к общему потоку металла из матрицы, имеет следующий вид:

$$\beta = 1 - \frac{\rho_{\text{пл}}}{\rho_{\text{ст}}} \cdot \frac{\delta}{\Delta}, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{пл}}$  – плотность металлических компонентов в оксидной пленке;  $\rho_{\text{ст}}$  – плотность металлических компонентов в стали;  $\delta$  – толщина оксидной пленки;  $\Delta$  – потеря толщины стали.

При наличии экспериментальных данных о толщине оксидной пленки и одновременно о глубине проникновения оксидного слоя в матрицу стали соотношение (2) позволяет непосредственно оценивать среднюю интенсивность выхода металлических компонентов в теплоноситель за рассматриваемый период времени.

В таблице 1 приведены некоторые данные по результатам экспозиции различных сталей в свинцовом теплоносителе при температурах 610 и 650°C продолжительностью от 3200 до 10600 часов в виде толщин сформированных оксидных пленок и измеренных изменений толщин образцов сталей. Выполненные нами соответствующие оценки численных значений  $\beta$  для этих условий также приведены в табл. 1.

Как следует из приведенных в табл. 1 данных, расчетные значения потерь металлических компонентов в теплоноситель в зависимости от условий и времени экспозиции сталей варьируются от 17 до 49%. Эти оценки также следует рассматривать как минимальные, поскольку в расчетной формуле плотность металла в оксидной фазе принималась равной теоретической для магнетита, которая составляет 3,8 г/см<sup>3</sup>. Однако в реаль-

Таблица 1  
**Результаты расчетов относительных потерь компонентов стали в теплоноситель по формуле (2)**

Марка стали	Толщина пленки, $\delta$ , мкм	Потеря толщины стали $\Delta$ , мкм	$\beta$
ЭП-823	74	52	0,31
	130	98	0,34
	74	52	0,30
	130	107	0,40
	139	117	0,45
	158	135	0,43
ЭИ-852	84	52	0,21
	158	98	0,21
	102	80	0,37
	112	98	0,44
С имплантацией Cr	112	107	0,49
С имплантацией La	112	107	0,49
ЭИ-732	84	52	0,21
	102	61	0,23
	93	60	0,24
	112	98	0,24
015Х16Н15М3Т (ЭК 16ЗИД)	56	33	0,17
	65	52	0,39
ЭП-900	102	80	0,34
	158	126	0,38
ЭП-38	121	107	0,45

ности, как следует из многочисленных данных металлографических исследований, плотность оксида за счет соответствующих пустот в его структуре может быть существенно ниже.

В качестве примера можно привести результаты металлографических исследований стали ЭИ-852 (рис. 1-3), для которых получены численные оценки соответственно  $\beta = 0,37$  и  $\beta = 0,44$ .

Учет пористости сформировавшихся пленок (по данным представленных рисунков), которая в первом случае оказалась заполненной свинцом, позволил откорректировать данные табл. 1 в части стали ЭИ 852. Численные значения потерь как в первом, так и во втором случаях возросли до уровня порядка 60%.

По-видимому, данная величина более правильно отражает реальные потери. Об этом свидетельствуют и следующие дополнительные соображения.

На рисунке 3 представлено распределение элементов по толщине оксидной пленки. Анализ этих данных показывает, что на внешней границе пленки отсутствует в виде отдельной фазы магнетитовый подслой.

Сам факт отсутствия магнетитового подслоя в оксидной пленке, который образуется на внешней границе оксидного слоя и теплоносителя, свидетельствует, что потери составляют не менее 51% (см. формулу (2) при  $\delta = \Delta$ ). Кроме того, наличие разуплотнения поверхностного слоя матрицы (рис. 2), примыкающего к внутренней зоне окисления, а также наличие в этой зоне ярко выраженного пористого слоя показывают, что реальные потери должны быть заметно выше 51%.

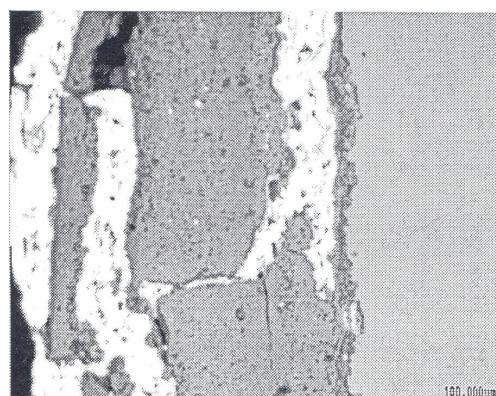


Рис. 1. Оксидная пленка на стали ЭИ852 после испытаний при  $610^{\circ}\text{C}$  в течение 7400 ч

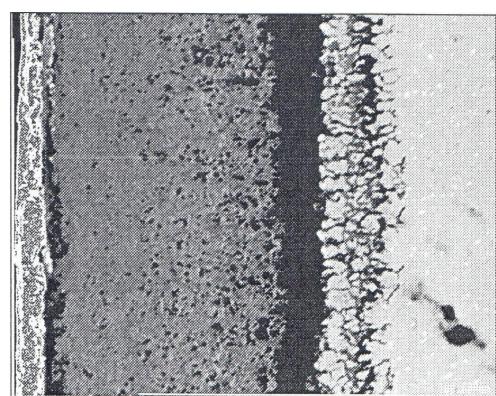


Рис. 2. Оксидная пленка на стали ЭИ852 после испытаний при  $650^{\circ}\text{C}$  в течение 8500 ч

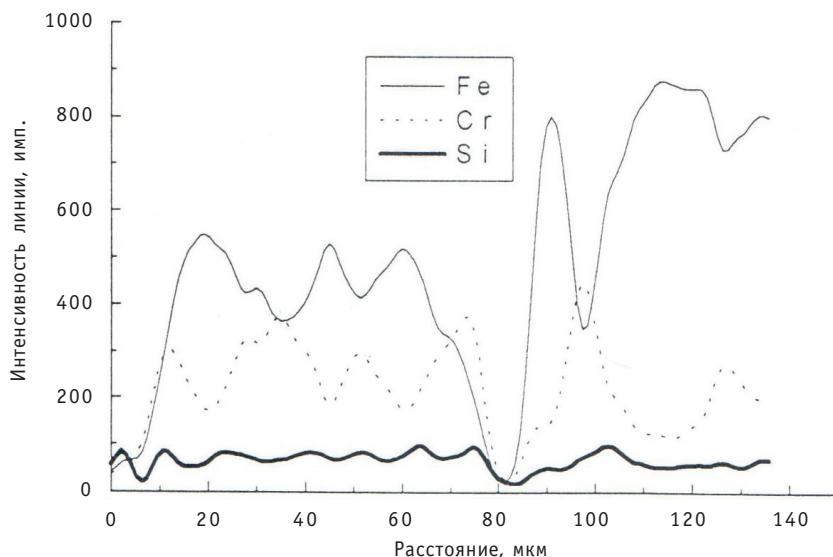


Рис. 3. Распределение химических элементов в окисной пленке на стали ЭИ-852 после испытаний при 650°C в течение 8500 ч

Таким образом, приведенные примеры показывают, что даже на достаточно большой временной базе относительные потери металла в теплоноситель в неизотермических условиях могут существенно (на порядок и более) превышать 1–2 %, что необходимо учитывать при разработке систем технологии теплоносителя.

**Настоящие исследования проводятся при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации (ГК № 16.516.11.6083).**

### **Литература**

1. Иванов К.Д., Лаврова О.В., Салаев С.В. Использование разработанной методики оценки диффузионного выхода металлических компонентов из сталей для изучения коррозионной стойкости этих сталей в тяжелых теплоносителях: Тез. докл./«Теплогидравлические аспекты безопасности ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах»-2005. – С. 117.
2. OECD/NEA Nuclear Science Committee Working Party on Scientific Issues of the Fuel Cycle Working Group on Lead-bismuth Eutectic «Handbook on Lead-bismuth Eutectic». – 2007. – P. 238-270.

Поступила в редакцию 25.09.2012

# ОТРАБОТКА РЕЖИМОВ ПАССИВАЦИИ НА СТАЛЬНОЙ ТРУБЧАТКЕ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС

**В.И. Павленко\*, Л.Л. Лебедев\*, В.В. Прозоров\*\*,**

**В.А. Доильницын\*\*\***

\* Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
г. Белгород

\*\* Сосновоборский проектно-изыскательский институт «Всероссийский проекти-  
тельный и научно-исследовательский институт комплексной энергетической техноло-  
гии», г. Сосновый Бор

\*\*\* Санкт-Петербургский государственный технологический институт (ТУ), г.  
Санкт-Петербург



Проведены электрохимические исследования на образцах трубчатки па-  
рогенераторов, изготовленных из стали 08Х18Н10Т, не бывших в эко-  
номике, после промывок растворами кислот и комплексонов с различ-  
ными добавками с последующей пассивацией или без пассивации. Уста-  
новлено, что наилучшая пассивация отмечена при обработке образцов в  
растворах, содержащих азотно-кислый алюминий, стационарный потен-  
циал при этом (по сравнению с рассмотренными способами) смещается  
в более положительную область, что говорит о высоком экранировании  
активных участков на поверхности металла.

**Ключевые слова:** пассивация, АЭС, трубчатка парогенератора, коррозия металла.

**Key words:** passivation, nuclear power plants, the steam generator pipe heaters, metal corrosion.

При эксплуатации энергоустановки происходит загрязнение поверхностей оборудования первого контура, в том числе трубчатки парогенераторов, радионуклидами. При проведении ремонта парогенераторов необходимо чтобы радиационная доза, получаемая за это время персоналом, была минимальной. Для этого проводят дезактивацию парогенераторов. В процессе дезактивации вместе с рыхлыми отложениями в раствор переходят и плотные оксидные пленки, защищающие металл от коррозии. И хотя нержавеющие стали способны к самопассивации и скорость коррозии со временем снижается, тем не менее, с учетом огромной поверхности трубчатки ( $2000 \text{ м}^2$  на один парогенератор ПГВ-440, а число их на один реактор – шесть), дополнительная пассивация могла бы быть эффективной. Снижение коррозии конструкционных сталей привело бы к улучшению теплофизических свойств теплопередающих поверхностей вследствие снижения отложений и улучшения радиационной обстановки за счет меньшей активации продуктов коррозии, перешедших из металла в теплоноситель и активирующихся впоследствии в нейтронном потоке ядерного реактора.

---

© В.И. Павленко, Л.Л. Лебедев, В.В. Прозоров, В.А. Доильницын, 2013

Отработка режимов пассивации проводилась на образцах трубчатки парогенераторов АЭС с реактором ВВЭР-440, изготовленных из стали 08Х18Н10Т, предоставленных Центром материаловедения и ресурса (ЦМиР) концерна «Росэнергоатом», и на образцах, предоставленных Ново-Воронежской АЭС совместно с Научно-исследовательским технологическим институтом им.А.П. Александрова.

Процесс пассивации осуществлялся следующим образом. Образцы, подвергшиеся дезактивации, помещали в стеклянные стаканчики и заливали пассивирующим раствором. При этом соотношение объем раствора/площадь поверхности образца составляло 10/1 см<sup>3</sup>/см<sup>2</sup>. Стаканчики помещали в водяную баню, в которой поддерживали необходимую температуру с точностью ±5°С. Растворы периодически перемешивали. По окончании пассивации образцы извлекали из раствора, тщательно промывали дистиллированной водой и высушивали на воздухе.

Оценка коррозионной активности образцов и степени их защиты от коррозии проводилась электрохимическими методами. В частности, проводили измерение равновесного электрохимического потенциала (РЭХП) образцов по отношению к хлорсеребряному электроду с последующим пересчетом потенциала по отношению к нормальному водородному электроду, а также снимали потенциодинамические кривые образцов. Определение РЭХП проводили с использованием высокоомного милливольтметра типа В-27 и потенциостата типа П-5848. Число независимых экспериментов для каждой группы образцов – три. Погрешность экспериментов не превышала 5%.

В первой серии экспериментов по определению РЭХП при отработке оптимальной методики измерения потенциала применяли образцы, представлявшие собой разрезанные пополам фрагменты парогенераторных трубок (полуцилиндры) длиной около 50 мм и величиной рабочей поверхности около 50 см<sup>2</sup>. В основных сериях экспериментов для определения РЭХП использовали образцы, представлявшие собой продольные сегменты трубок с площадью рабочей поверхности от 0,6 до 5 см<sup>2</sup>. Образцы помещали в боратный буферный раствор, имевший концентрацию по борной кислоте 0,1 моль/л и нейтрализованный концентрированным раствором едкого калия до величины pH=7,2. Нерабочую внешнюю поверхность образцов (поверхность трубы со стороны второго контура), а также подводящие к образцам медные и стальные провода изолировали от раствора с помощью покрытий из фторопластового лака.

Потенциал образца, как правило, устанавливался не мгновенно, а по истечении определенного времени. Для большей части образцов стабилизация потенциала достигалась после выдержки в растворе в течение 0,5–1,0 часа. Для некоторых образцов стабилизация потенциала наблюдалась через 24 часа и даже через большие промежутки времени. При этом можно отметить общую тенденцию: длительная выдержка образцов в боратном буферном растворе способствовала росту потенциала и смещению РЭХП в область более положительных потенциалов.

При снятии потенциодинамических кривых образцы помещали в боратный раствор приведенного выше состава. Скорость развертки составляла 50 мВ/мин. Для повышения точности измерения тока в измерительную схему вводили микроамперметр постоянного тока типа М57.

В таблице 1 приведены результаты экспериментов по изучению влияния способа обработки образцов стали 08Х18Н10Т на величину стационарного равновесного потенциала. Образцы вырезались из трубок, не бывших в эксплуатации.

Из приведенных данных видно, что обработка стали раствором соляной кислоты резко понижает стационарный потенциал с постепенным повышением в течение 20–25 минут до стационарного значения +135 мВ относительно нормального

Таблица 1

**Влияние способа обработки поверхности образцов, выполненных из хромоникелевой стали X18H10T, на коррозионные, сорбционные характеристики и на величину стационарного равновесного потенциала**

№ п/п	Способ обработки поверхности образца	Величина стационарного равновесного потенциала, мВ (отн. н.в.э.)*
1	Механическая зачистка образца наждачной бумагой № 2, 3, промывка дистиллятом	+ (130–140)
2	Механическая зачистка образца наждачной бумагой № 2, 3, промывка дистиллятом с последующей обработкой образца концентрированной (разбавление дистиллятом 1:1) соляной кислотой в течение 10 минут при 20–25°C с окончательной промывкой образца дистиллятом	+80 с постепенным повышением в течение 20–25 минут до стационарного значения +135
3	Механическая зачистка образца наждачной бумагой № 2, 3, промывка дистиллятом. Обработка образца в течение трех часов при температуре 90–100°C в 3%-ном растворе щавелевой кислоты. Промывка образца дистиллятом после кислотной обработки	+ (150–160)
4	Механическая зачистка образца наждачной бумагой № 2, 3, тщательная промывка дистиллятом. Обработка образца в течение трех часов при температуре 90–100°C в 3%-ном растворе щавелевой кислоты, содержащем 0,1 % пероксида водорода. Промывка образца дистиллятом после кислотно-пероксидной обработки	+ (170–172)
5	Механическая зачистка образца наждачной бумагой № 2, 3, промывка дистиллятом. Обработка образца в течение трех часов при температуре 90–100°C в 3%-ном растворе щавелевой кислоты. Пассивация в $10^{-3}$ моль/л растворе азотной кислоты в течение четырех часов при температуре 90–100°C. Тщательная промывка запассивированного образца дистиллятом	+ (160–165)
6	Механическая зачистка образца наждачной бумагой № 2, 3, тщательная промывка дистиллятом. Обработка образца в течение трех часов при температуре 90–100°C в 3%-ном растворе щавелевой кислоты. Пассивация в $10^{-3}$ моль/л растворе азотной кислоты с добавкой нитрата алюминия (20мг/л в пересчете на алюминий) в течение четырех часов при температуре 90–100°C. Промывка запассивированного образца дистиллятом	+ (188–190)

Примечание

- Образцы имели форму полуцилиндров высотой около 50мм с площадью поверхности 21–25см<sup>2</sup>.
- При обработке образцов растворами поддерживали соотношение  $V_{\text{р-ра}}/S_{\text{образца}} = 10/1$  мл/см<sup>2</sup>.
- Равновесный стационарный потенциал определяли, помещая образец в боратный буферный раствор.

водородного электрода. Это говорит о том, что нержавеющие стали в отличие от сталей перлитного класса способны к самопассивации и при комнатных температурах. Обработка сталей раствором щавелевой кислоты незначительно пассивирует металл. В то же время добавка в раствор пероксида водорода существенно смещает потенциал исследуемых образцов в положительную область.

Немного неожиданными явились более низкие, чем ожидались, результаты, полученные при обработке образцов в слабокислом разбавленном растворе азотной кислоты, так как стали перлитного класса в этих условиях пассивируются хорошо [1].

Наилучшая пассивация отмечена при обработке образцов в растворах, содержащих азотно-кислый алюминий, стационарный потенциал, при этом, по сравнению с рассмотренными способами, смещается в более положительную область, что говорит о высоком экранировании активных участков на поверхности металла. Этот результат не явился неожиданным, так как ранее было установлено [2], что при пассивации ионы алюминия значительно повышают антикоррозионные характеристики всех видов сталей, в том числе нержавеющих.

Одной из особенностей пассивации сталей в растворах, содержащих ионы алюминия, является то, что ионы алюминия, в первую очередь, сорбируются на самых активных участках поверхности (местах коррозионных язв, питтингов, трещин) и являются центром роста на них пассивных оксидных пленок, обладающих повышенными защитными свойствами. В других пассивирующих растворах рост пассивных пленок на активных участках затруднен, а образующиеся покрытия получаются с низкими защитными свойствами. Это отмечено также в других работах, например, в [3].

В таблице 2 представлены способы пассивации, ранее используемые при пассивации конденсатно-питательного тракта АЭС с РБМК ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ;  $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ ;  $\text{HNO}_2$ ), а также предлагаемый нами способ, содержащий ионы алюминия, и предлагаемый ВНИИАЭС способ обработки гидразином с активирующей добавкой (гидрохинон-толуол). Как и предыдущем случае (табл. 1), наилучшие результаты получены при обработке образцов растворами азотно-кислого алюминия с азотной кислотой.

Значительно худшие результаты получены при пассивации дезактивируемых образцов другими растворами. Ождалось, что из них наилучшим пассивирующим эффектом должен обладать раствор азотистой кислоты, широко используемый в настоящее время при пассивации конденсатно-питательного тракта АЭС с РБМК [4]. Однако при пассивации нержавеющей стали его эффективность оказалась относительно низкой.

Неплохие результаты получены при обработке образцов восстановительным раствором гидразина с активирующей добавкой. Тем не менее, все эти способы показали несравненно худшие результаты, чем обработка раствором азотно-кислого алюминия с азотной кислотой.

Были проведены исследования по изучению электрохимических характеристик радиоактивно загрязненных образцов, выдержанных в модельном борсодержащем теплоносителе при температуре около 300°C в течение 60-ти часов (выдерживали в автоклавах).

Из данных, приведенных в табл. 3, можно заметить, что ухудшения электрохимических характеристик не наблюдается.

Образцы, обработанные алюминийсодержащим раствором, приобретают более положительный электрохимический потенциал. Это указывает на то, что в процессе эксплуатации оборудования, обработанного по указанной технологии, на стальных поверхностях будет образовываться очень плотная оксидная пленка, скрывающая активные участки поверхности.

Таблица 2

**Условия проведения дезактивационной обработки и пассивации образцов, вырезанных из радиоактивно-загрязненных парогенераторных трубок. Величина равновесного электрохимического потенциала образцов дезактивации**

Способ дезактивации	Способ пассивации	Равновесный ЭХП, мВ (относительно НВЭ)
<b>1 стадия:</b> 10 г/л KOH+1г/л KMnO <sub>4</sub> 90–95°C; 2 часа <b>2 стадия:</b> 30 г/л H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> +1г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 90–95°C; 2 часа	Пассивация не проводилась	240–250
То же	1 г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 80–90°C; 2 часа	290–300
То же	60–65 мг/л HNO <sub>3</sub> (pH=3) + 30 мг/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 90–95°C; 4 часа	340–345
То же	Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (10 мг/л по Al) + HNO <sub>3</sub> до pH=3 (около 60 мг/л) 90–95°C; 4 часа	430–435
То же	HNO <sub>2</sub> до pH=2,9–3,1 90–98°C; 4 часа	340–345
То же	30 мг/л N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> + 0,2 мг/л активирующей добавки 60–80°C; 4 часа	285–295
<b>1 стадия:</b> 30 г/л KOH+5г/л KMnO <sub>4</sub> 85–95°C; 1 час <b>2 стадия:</b> 30 г/л H <sub>3</sub> Citr+1г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 85–95°C; 1 час <b>3 стадия:</b> 5г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 80–90°C; 1 час	Пассивация не проводилась	240–250
То же	60–65 мг/л HNO <sub>3</sub> (pH=3) + 30 мг/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 90–95°C; 4 часа	270
То же	HNO <sub>2</sub> до pH=3,0–3,1 90–98°C; 4 часа	265
То же	Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (10 мг/л по Al) + HNO <sub>3</sub> до pH=3 (около 60 мг/л) 90–95°C; 4 часа	360–365
То же	30 мг/л N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> + 0,2 мг/л активирующей добавки 60–80°C; 4 часа	290–300
<b>1 стадия:</b> 10 г/л HNO <sub>3</sub> 90–95°C; 3 часа <b>2 стадия:</b> ввод 1г/л KMnO <sub>4</sub> 90–95°C; 3 часа <b>3 стадия:</b> ввод 30 г/л ОЭДФ 90–95°C; 3 часа <b>4 стадия:</b> ввод 1г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 3 раза через 1,5 ч 90–95°C; 3 часа	Пассивация не проводилась	После двух стадий 190–195 После трех стадий 250–260
То же	Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (10 мг/л по Al) + HNO <sub>3</sub> до pH=3 (около 60 мг/л) 90–95°C; 4 часа	350–360
то же	HNO <sub>2</sub> до pH=2,9–3,1 90–98°C; 4 часа	300–310

Таблица 3

**Изменение равновесного электрохимического потенциала образцов радиоактивно загрязненной трубчатки парогенератора в процессе 60-ти часовой автоклавной выдержки в модельном борсодержащем теплоносителе**

Способ дезактивации	Способ пассивации	Значение РЭХП (относительно НВЭ) до проведения автоклавных испытаний, мВ	Значение РЭХП относительно НВЭ) после проведения автоклавных испытаний, мВ
1 стадия: 10 г/л KOH+1г/л KMnO <sub>4</sub> 90–95°C; 2 часа 2 стадия: 30 г/л H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> +1г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 90–95°C; 2 часа	60–65 мг/л HNO <sub>3</sub> (pH=3) + 30 мг/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 90–95°C; 4 часа	340	335
То же	Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (10 мг/л по Al) + HNO <sub>3</sub> до pH=3 (50–60 мг/л) 90–95°C; 4 часа	430	440
1 стадия: 30 г/л KOH+5г/л KMnO <sub>4</sub> 85–95°C; 1 час 2 стадия: 30 г/л H <sub>3</sub> Citr+1г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 85–95°C; 1 час 3 стадия: 5г/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 80–90°C; 1 час	60–65 мг/л HNO <sub>3</sub> (pH=3) + 30 мг/л H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 90–95°C; 4 часа	270	275
То же	Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (10 мг/л по Al) + HNO <sub>3</sub> до pH=3 (50–60 мг/л) 90–95°C; 4 часа	360	370

## Примечание

1. Испытания проводили в статических условиях без перемешивания водной фазы.

2. Состав водной фазы (модельного теплоносителя):

- борная кислота – 3,0 г/л;
- гидроксид калия – до достижения pH<sub>25</sub> = 7,2;
- аммиак – для изменения величины pH<sub>25</sub> от 7,2 до 9,2.

3. Температура: 290–305 °C.

Визуально образцы, выдержаные в модельном теплоносителе при 300°C, покрываются тонкой темно-синей оксидной пленкой.

Электрохимические характеристики образцов, запассивированных в растворе, не содержащем ионы алюминия, после выдержки в автоклаве остаются на том же более низком уровне.

В таблице 4 приведены потенциодинамические характеристики образцов, обработанных различными способами. Видно, что наилучшими характеристиками обладают образцы обработанные раствором, содержащим ионы алюминия. Так в области потенциалов 0,1–0,5 В анодные токи практически отсутствуют, что указывает на полное экранирование анодных участков поверхности металла ионами (соединениями) алюминия.

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что дополнительная пассивация способствует переходу стали в более пассивное состояние. Наилучшая пассивация достигается в растворах, содержащих ионы алюминия. Все остальные способы пассивации сопоставимы.

Таблица 4

**Зависимость анодной плотности тока  $i$  (мА/см<sup>2</sup>) от потенциала  $E_{\text{НВЭ}}$  (В) для непассивированных и пассивированных образцов из стали X18H10T**

Потенциал, В	Плотность тока для рабочего электрода (образца), мА/см <sup>2</sup>			
	№1	№2	№3	№4
+0,1	0,008	0,004	0	0
+0,2	0,012	0,004	0	0
+0,3	0,012	0,004	0	0
+0,4	0,012	0,004	0,004	0
+0,5	0,012	0,004	0,004	0,002
+0,6	0,012	0,004	0,004	0,002
+0,7	0,012	0,005	0,004	0,005
+0,8	0,012	0,007	0,004	0,005
+0,9	0,020	0,007	0,004	0,012
+1,0	0,020	0,007	0,008	0,013
+1,1	0,020	0,009	0,012	0,020
+1,2	0,024	0,011	0,016	0,070
+1,3	0,034	0,017	0,028	0,279
+1,4	0,082	0,027	0,049	–
+1,5	0,148	0,060	0,096	–
+1,6	0,400	0,240	–	–
+1,7	0,870	0,350	–	–
+1,8	–	0,800	–	–
+1,9	–	–	–	–

## Примечание

1. Электролит – 0,1 моль/л  $\text{H}_3\text{BO}_3 + \text{KOH}$  до достижения  $\text{pH} = 7,2$ .

2. Характеристика рабочих электродов (образцов):

№ 1 – механическая зачистка образца наждачной бумагой № 2, 3, тщательная промывка дистиллятом, проправливание в течение 10–15 секунд концентрированной соляной кислотой, многократная промывка дистиллятом; ( $E_{\text{стак}} = 0,06\text{--}0,07$  В);

№ 2 – чешский образец, тщательно промытый дистиллятом;

№ 3 – механическая зачистка образца наждачной бумагой № 2, 3, тщательная промывка дистиллятом, обработка в течение 3 часов при температуре 90–100°C в 3%-ном растворе щавелевой кислоты, содержащем  $\text{H}_2\text{O}_2$  (0,1%), тщательная промывка дистиллятом после щавелево-кислотной пероксидной обработки; ( $E_{\text{стак}} = 0,165\text{--}0,170$  В);

№4 – механическая зачистка образца наждачной бумагой № 2, 3, тщательная промывка дистиллятом, обработка в течение трех часов при температуре 90–100°C в 3%-ном растворе щавелевой кислоты, содержащем  $\text{H}_2\text{O}_2$  (0,1%), тщательная промывка дистиллятом после щавелево-кислотной пероксидной обработки. Пассивация в  $10^{-3}$  моль/л растворе азотной кислоты, содержащей нитрат алюминия (10 мг/л в пересчете на алюминий) в течение четырех часов при температуре 90–100°C. Тщательная промывка запассивированного образца дистиллятом ( $E_{\text{стак}} = 0,210\text{--}0,215$  В).

Краткосрочные автоклавные испытания в боросодержащем теплоносителе при 300°C показали, что сталь по-прежнему находится в пассивном состоянии. Сорбированные на поверхности стали ионы алюминия способствуют переводу стали в более пассивное состояние, особенно после ее обработки кислотой.

**Литература**

1. Прозоров, В.В. Оксидирование перлитных сталей в нитратных растворах / В.В. Прозоров // Защита металлов. – 1989. – Т. 23. – № 2. – С. 289–292.
2. Прозоров, В.В. Особенности пассивации перлитных сталей в растворах, содержащих ионы алюминия / В.В. Прозоров, М.А. Сергиенко, В.И. Гусаров и др. // Защита металлов. – 2003. – Т. 39. – № 5. – С. 552–554.
3. Павленко В.И. Цементно-магнетитовые композиты для консервации радиоактивных отходов АЭС: Монография. – Белгород: БГТУ, 2002. – 154 с.
4. РДЭО 0236-00. Регламент предремонтной пассивации внутренних поверхностей оборудования и трубопроводов КПТАЭС РБМК.

Поступила в редакцию 08.10.2012

# ТИТАНОСИЛИКАТНАЯ СТЕКЛОМАТРИЦА ДЛЯ ОТВЕРЖДЕНИЯ ОТХОДОВ, СОДЕРЖАЩИХ f-ЭЛЕМЕНТЫ

**А.С. Алои, Ю.А. Барбанель, А.В. Трофименко**

*ФГУП НПО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», Санкт-Петербург, Россия,*

**P**

В тройной системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2$  были определены составы титаносиликатных стекол, которые обеспечивают не только стеклоподобную структуру, но и образование в стекле ассоциативных групп минерально-подобных соединений – фресноита ( $\text{Ba}_2\text{TiSi}_2\text{O}_8$ ) и перовскита ( $\text{SrTiO}_3$ ). Эти минералы прочно удерживают в себе f-элементы.

Для изучения возможности включения f-элементов оксиды европия и урана были добавлены в стекла в количестве 3 масс.%. Преобразования, которые произошли во время синтеза стекол и их кристаллизации, были изучены методами рентгеновской дифракции (РД) и дифференциального термического анализа (ДТА). Распределение Eu и U по объему расплавов в стационарных условиях были исследованы с помощью лазерного флуоресцентного метода. Показано, что Eu распределен равномерно по объему стекла, в то время как U имеет тенденцию к седиментации в нижней части тигля за счет гравитации. Степень окисления для Eu была (+3), а U находился в состоянии (+6).

Так как в сетке стекла были реализованы структурные минералоподобные группировки фрестонита и перовскита, химическая устойчивость стекол была очень высокая; так скорость выщелачивания Eu составляла  $3 \cdot 10^{-6}$  г/м<sup>2</sup>·сут, а U –  $4 \cdot 10^{-6}$  г/м<sup>2</sup>·сут.

**Ключевые слова:** титаносиликатные стекла, иммобилизация ВАО, фресноит, перовскит.

**Keywords:** titanosilicate glass, immobilization of HLW, perovskite, fresnoite.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время начальное обогащение урана возросло в шесть раз по сравнению с тем, что использовали в военных программах, а выгорание в отработанном ядерном топливе (ОЯТ) – на два порядка. Соответственно возросло содержание продуктов деления (ПД), а малых актинидов – на три порядка (табл. 1) [1]. В итоге на 1 т тяжелых металлов (ТМ) в ОЯТ АЭС типа ВВЭР с выгоранием ~40 ГВт·сут/(т U) содержится примерно по 10 кг/т  $^{235}\text{U}$  и суммы изотопов Ри, а также ~0,7 кг/т Nr, 0,5 кг/т трансплутониевых элементов (ТПЭ) и 44 кг/т продуктов деления. Следует отметить наличие ~16 кг/т РЗЭ, наиболее близких по химическим свойствам к ТПЭ, и в 50 раз большее мольное содержание Zr, Mo и Ba, которые склонны к образованию осадков при водной переработке.

© А.С. Алои, Ю.А. Барбанель, А.В. Трофименко, 2013

Таблица 1

**Содержание актинидов и высоковалентных продуктов деления (выдержка ОЯТ 5 лет) при различном выгорании ОЯТ**

Элемент (изотоп)	Выгорание ОЯТ (ГВт·сут/т ТМ)					
	0,5	40	70	0,5	40	70
	Содержание г/т ТМ			Моль на 4,2 кмоль (1 т) ТМ		
$^{232}\text{U}$	–	0,0015	0,004	–	–	–
$^{235}\text{U}/^{236}\text{U}$	6550/270	12500/5000	6200/7700	27,5/1,15	55,6/21,3	26,4/32,6
Np	0,5	700	1320	0,002	2,9	5,5
Pu	500	9900	12900	2,1	41	53,5
Am	0,5	480	1080	0,002	2,0	4,5
Sr	18	1440	1920	0,20	16	21,5
Zr	66	5240	7200	0,71	58	79
Mo	53	4260	6400	0,56	45	67
Tс	16	1090	1350	0,16	11	13,5
I	5	300	405	0,035	2,3	3,4
Cs	68	5120	6950	0,50	40	52,5
Ba	31	2460	3490	0,22	18	24
РЗЭ+Y	220	~16000	~23000	1,3	104	158
$\Sigma\text{ПД}$	550	~44000	~78000	4,6	363	650

При остекловывании такого типа отходов наблюдается тенденция к получению более тугоплавких композиций на основе высококремнеземистых и алюмосиликатных матриц, обладающих комплексом свойств, аналогичных минералоподобным материалам.

Выбор в качестве матрицы титаносиликатных стекол для иммобилизации высокоактивных отходов (ВАО), содержащих f-элементы, обусловлен следующими обстоятельствами:

- введение оксида титана в силикатные стекла в определенных соотношениях позволяет реализовать такой структурный каркас матрицы, что даже в случае расстекловывания или разрушении в процессе кристаллизации образующиеся фазы по типу природных минералов фресноита ( $\text{Ba}_2\text{TiSi}_2\text{O}_8$ ) и перовскита ( $\text{SrTiO}_3$ ) будут надежно удерживать f-элементы;
- использование модифицирующих структуру катионов ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ba}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) позволяет создавать серию кристаллических титаносиликатов с большим интервалом концентрации  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  и расширяет область стеклообразования в титаносиликатных системах [2].

Стабильные стекла в этих системах не подверженные ликвации и кристаллизации образуются при соотношении  $\text{Me}_2\text{O}(\text{MeO})/\text{TiO}_2 > 1$ . Так при соблюдении данного соотношения зона стабильного стеклообразования захватывает и низкокремнеземистую область, ниже 50 мол.%  $\text{SiO}_2$ . При концентрации оксида титана от 12 до 15 мол.% снижается склонность стекол к ликвации и кристаллизации [3].

При разработке составов стекол учитывалось, что в титаносиликатных системах область стеклообразования возрастает в ряду Li-Na-K для щелочных металлов и в ряду Ca-Sr-Ba для щелочноземельных элементов [4, 5].

**СОСТАВЫ И УСЛОВИЯ СИНТЕЗА ТИТАНОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ**

С учетом перечисленных выше закономерностей были синтезированы стекла, составы которых представлены в табл. 2. Синтез проводили в воздушной атмосфере. Температура синтеза и время выдержки для всех образцов были одинаковыми и составляли 1250°C, 3 часа.

Указанные в таблице составы стекол имеют одинаковые мольные концентрации компонентов, что позволяет сопоставлять их физико-химические свойства. Мольная концентрация оксида бария и стронция в образцах 1, 4 и 2, 5 равна суммарной мольной концентрации оксидов бария и стронция в образцах 3 и 6 при их соотношении  $BaO/SrO = 1$ . Известно, что оксиды РЗЭ и урана трудно растворяются в силикатных расплавах и в стекла входят в ограниченных количествах [6], поэтому концентрация оксидов урана и европия в синтезируемых стеклах соста- вила 3,0 мас.%.

Таблица 2

**Составы синтезируемых стекол (масс.).%**

№ образца Оксид	1	2	3	4	5	6	Концентрация, мол. %
Na <sub>2</sub> O	20,0	21,7	20,8	20,0	21,7	20,8	26,4
BaO	24,0	–	12,5	24,0	–	12,5	12,8
SrO	–	17,7	8,5	–	17,7	8,5	
TiO <sub>2</sub>	12,5	13,6	13,0	12,5	13,6	13,0	12,8
SiO <sub>2</sub>	40,5	43,9	42,1	40,5	43,9	42,1	47,3
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,0	3,1	3,1	–	–	–	0,7
UO <sub>2</sub>	–	–	–	3,0	3,1	3,1	0,7

**ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ШИХТЕ  
ПРИ СИНТЕЗЕ ТИТАНСОДЕРЖАЩИХ СТЕКОЛ**

Для понимания процессов, приводящих к формированию структуры расплава, а затем и стекла, предполагается исследование фазовых превращений, происходящих на различных стадиях термообработки.

С этой целью проведено изучение состава фаз, образующихся в шихте при различных температурах вплоть до расплава. Шихта выбранных для исследования образцов 1–6 (табл. 1), проходила термообработку через каждые 100°C в интервале температур 600–1100°C с длительностью выдержки шесть часов. Фазовый состав шихты на различных стадиях термообработки определялся методом РФА. Составы кристаллических соединений, образующихся в шихте, представлены в табл. 3.

Экспериментальные данные показывают сложный многоступенчатый характер образования соответствующих кристаллических соединений в результате взаимодействия компонентов. На разных стадиях термообработки в шихте присутствуют силикаты, титанаты, титаносиликаты щелочно-земельных элементов. При температурах, близких к образованию расплава, в основном, существуют наиболее термодинамически устойчивые соединения по типу природных минералов (фресноита и перовскита), которые, переходя в расплав, образуют устойчивые структурные группировки, подобные им по составу и строению.

Европий и уран ( $Eu_2O_3$  и  $U_3O_8$ ) остаются в шихте в виде оксидов ( $Eu_2O_3$  и  $U_3O_8$ ) вплоть до 900°C.

Таблица 3

**Фазовые превращения в шихте при синтезе титанодержащих стекол**

№ образца <i>T</i> , °C	1, 4	2, 5	3, 6
	Фазовый состав		
600	TiO <sub>2</sub> , NaNO <sub>3</sub> , BaCO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , Ba <sub>2</sub> TiSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	TiO <sub>2</sub> , NaNO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , SrSiO <sub>3</sub> , SrTiO <sub>3</sub> , Sr <sub>3</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	TiO <sub>2</sub> , NaNO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , SrSiO <sub>3</sub> , SrTiO <sub>3</sub> , Ba <sub>2</sub> TiSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub>
700	NaNO <sub>3</sub> , BaCO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , Ba <sub>2</sub> TiSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	TiO <sub>2</sub> , NaNO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , SrSiO <sub>3</sub> , SrTiO <sub>3</sub> , Sr <sub>3</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	TiO <sub>2</sub> , NaNO <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , SrSiO <sub>3</sub> , SrTiO <sub>3</sub> , Ba <sub>2</sub> TiSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub>
800	BaCO <sub>3</sub> , BaTiO <sub>3</sub> Ba <sub>2</sub> TiSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	SiO <sub>2</sub> , SrSiO <sub>3</sub> , SrTiO <sub>3</sub> , Sr <sub>3</sub> Ti <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SrSiO <sub>3</sub> , SrTiO <sub>3</sub> , Ba <sub>2</sub> TiSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub> , Na <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
900	BaTiO <sub>3</sub> Ba <sub>2</sub> TiSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	SrSiO <sub>3</sub> , SrTiO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> , Na <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SrTiO <sub>3</sub> , Ba <sub>2</sub> TiSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub>
1000	Ba <sub>2</sub> TiSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	SrSiO <sub>3</sub> , SrTiO <sub>3</sub>	SrTiO <sub>3</sub> , Ba <sub>2</sub> TiSi <sub>2</sub> O <sub>8</sub>
1100	Аморфная фаза	Аморфная фаза	Аморфная фаза

**СКЛОННОСТЬ СТЕКОЛ К КРИСТАЛЛИЗАЦИИ**

Кристаллизационная способность стекол изучалась с помощью метода дифференциально-термического анализа (ДТА). ДТА проводился на дериватографе МОМ-1 с температурой нагрева до 1000°C, скорость нагрева 5–10 град/мин, погрешность измерения температуры ±5°C.

Основные характеристические температуры (размягчения, кристаллизации, ликвидуса) представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Данные ДТА**

№ образца	<i>T<sub>g</sub></i> , °C	Температура кристаллизации, °C	Температура ликвидуса, °C
1	580	760	Не определена
2	590	730	910
3	560	770	900
4	560	740	Не определена
5	600	800	910
6	560	790	Не определена

Тот факт, что экзотермические эффекты образования кристаллических фаз наблюдаются на кривых ДТА в интервале температур 730–860°C, свидетельствует об устойчивости европий- и уранодержащих стекол к расстекловыванию.

Принудительную кристаллизацию образцов стекол № 1–6 проводили при температурах, соответствующих максимумам экзотермических эффектов на кривых ДТА с длительностью выдержки 3 ч.

По данным РФА соединение со структурой фресноита является основной кристаллической фазой в закристаллизованных стеклах № 1 и 4. Для стекол № 2 и 5 отмечается присутствие перовскита и силиката стронция. Кристаллизация стекол № 3 и 6 приводит к образованию фресноита и перовскита одновременно.

Аналогичные соединения отмечались и в продуктах термообработки шихты соответствующих составов при температурах, близких к образованию расплава (табл. 3), что свидетельствует об обратимости процесса стеклообразования.

Анализируя фазовые превращения, происходящие при формировании расплавов и кристаллизации стекол, можно предположить, что структура исследуемых титаносиликатных стекол формируется на основе фрагментов соединений аналогов природных минералов – фресноита и перовскита.

Так как f-элементы изоморфно входят в структуру природных минералов [2], то следует ожидать, что в стеклах подобного типа они будут прочно фиксироваться.

### ОДНОРОДНОСТЬ ЕВРОПИЙ- И УРАНСОДЕРЖАЩИХ СТЕКОЛ

Методом рентгенофазового анализа (РФА) было определено, что стекла всех составов не содержат кристаллических фаз.

Исследование образцов стекол с европием и ураном, отобранных из разных частей расплава, производилось по спектрам люминесценции на лазерно-люминесцентном спектрометре, собранном на базе монохроматора ДФС-24 с обратной линейной дисперсией 0,45 нм/мм. Возбуждение производилось импульсным азотным лазером ИЛГИ-503. Регистрацию спектров осуществляли при помощи спектрометра с детектором типа-ФЭУ-79, работающим в режиме счета одноэлектронных импульсов.

Сравнение спектров люминесценции образцов 1–3 (рис. 1) показало, что величина относительной интенсивности люминесценции европия ( $\lambda_{\text{Eu}^{3+}} = 611,8 \text{ нм}$ ) одинакова для образцов, отобранных из разных частей расплава (верх, низ, середина). Этот факт указывает на то, что европий распределен в данных стеклах равномерно по объему.

Из полученных спектров люминесценции следует, что во всех изученных образцах европий сохраняет валентное состояние 3+.

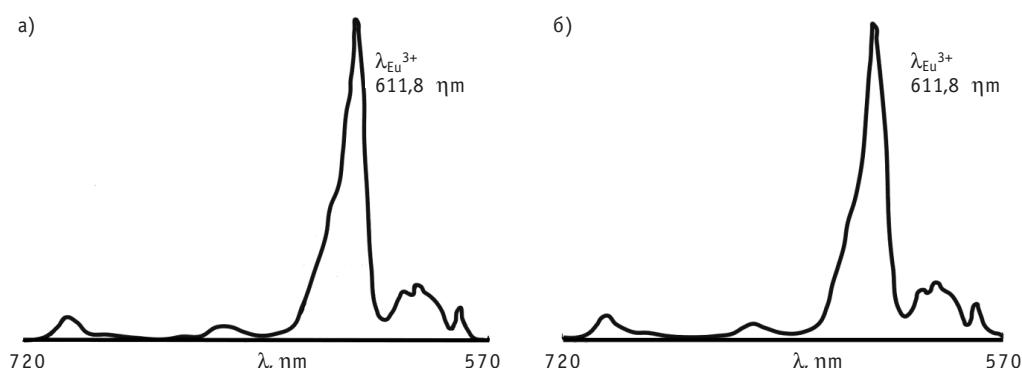


Рис. 1. Спектры люминесценции европия в щелочном титаносиликатном стекле. Содержание  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  3 мас.%  $T = 293 \text{ K}$ : а) – верх слитка; б) – низ слитка

В спектрах стекол № 4–6 (рис. 2), содержащих уран, величина относительной интенсивности люминесценции ( $\lambda_{\text{UO}_2^{2+}} = 530 \text{ нм}$ ) постепенно возрастает от верхних к нижним частям расплава, что говорит об обогащении их ураном.

Склонность урана к седиментации, как и оксида плутония [7], может привести к нежелательным последствиям при остекловывании ВАО. Поэтому следует обратить особое внимание на выбор температурно-временных условий варки, предельной концентрации урана, при которой этот элемент распределяется равномерно по объему стекломассы, а также на необходимость перемешивания расплава.

Проведенные исследования показали, что люминесцирующими центрами в изученных образцах стекол являются исключительно ионы шестивалентного урана –  $\text{UO}_2^{2+}$ .

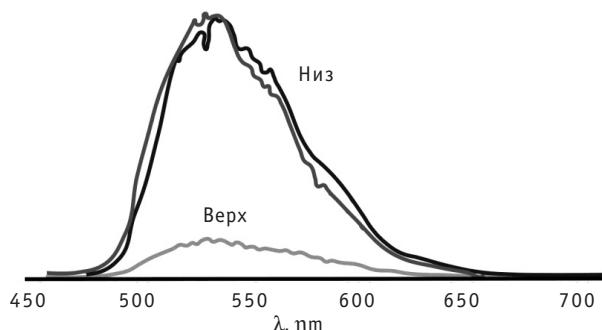


Рис. 2. Спектры люминесценции урансодержащих стекол

В спектрах люминесценции всех исследуемых составов не наблюдается сужения полос или появления тонкой структуры, следовательно, в изучаемых стеклах кристаллические образования отсутствуют.

### ХИМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕКОЛ

Изучение химической устойчивости образцов титаносиликатных стекол проводили по методике МСС-1 [8]. Условия выщелачивания: выщелачивающая среда – дистиллированная вода;  $S/V = 10 \text{ м}^{-1}$ ; температура –  $25^\circ\text{C}$ ; длительность – 28 дней.

Выщелачивали анализировались на уран и европий лазерно-люминесцентным методом с временным разрешением. Относительное среднеквадратическое отклонение для урана составило 6%, а для европия – 3%. Чувствительность метода –  $10^{-10} \text{ г/л}$ .

Значения равновесных скоростей выщелачивания составляют  $(1,4-3,8) \cdot 10^{-10} \text{ г/см}^2 \cdot \text{сут}$  для европия и  $(1,1-4,0) \cdot 10^{-10} \text{ г/см}^2 \cdot \text{сут}$  для урана (табл. 5).

Полученные данные позволяют сделать вывод о высокой устойчивости европий- и урансодержащих титаносиликатных стекол.

Таблица 5

#### Скорости выщелачивания европия и урана из титаносиликатных стекол

№ образца	1	2	3	4	5	6
	Eu			U		
Скорость выщелачивания г/см <sup>2</sup> ·сут ·10 <sup>10</sup>	3,8	3,6	1,4	1,1	4,0	2,5

### ВЫВОДЫ

1. Разработаны составы титаносиликатных стекол с содержанием оксидов урана или европия 3 масс.%, в структуре которых образуются ассоциативные группировки по типу природных минералов – фресноита и перовскита, прочнодерживающих f-элементы. Значения равновесных скоростей выщелачивания составляют  $(1,4-3,8) \cdot 10^{-10} \text{ г/см}^2 \cdot \text{сут}$  для европия и  $(1,1-4,0) \cdot 10^{-10} \text{ г/см}^2 \cdot \text{сут}$  для урана.

2. Оценка однородности распределения европия и урана в объеме расплава на стадии варки стекла при отсутствии принудительного перемешивания показала, что европий равномерно распределяется по объему, в то время как для урана наблюдается обогащение нижних слоев расплава.

3. Показано, что в стеклах европий находится в состоянии  $\text{Eu}^{3+}$ , а уран –  $\text{U}^{6+}$ .

4. Синтезированные стекла обладают достаточно высокой устойчивостью к расстекловыванию, т.к. наблюдаемые на кривых ДТА экзотермические эффекты кристаллизации расположены в области высоких температур  $700-800^\circ\text{C}$ .

### **Литература**

1. Федоров Ю.С., Зильберман Б.Я., Алой А.С. и др. Проблемы модернизации экстракционной переработки отработавшего ядерного топлива//Российский химический журнал. – 2010. – Т. LIV. – № 3. – С. 12-23.
2. Lutze Ed. By W. and Ewing R.C. Radioactive Waste Forms for the Future//Elsevier Science Publishers B.V. – 1988. – Р. 427–493.
3. Ходаковская Р.Я. Химия титаносодержащих стекол и ситаллов. – М.: Химия, 1978. – 285 с.
4. Павлушкин Н.М., Ходаковская Р.Я. Стеклообразное состояние. – Л.: Наука, 1971. – 310 с.
5. Варшал Б.Г., Илюхин В.В., Блов Н.В. Кристаллохимические аспекты ликвационных явлений в трехкомпонентных титаносиликатных системах//Физика и химия стекла. – 1975. – Т. 1. – № 2. – С. 117-121.
6. Аппен А.А. Химия стекла. – М.: Химия, 1974. – 352 с.
7. Кушников В.В., Матюнин Ю.И., Крылова Н.В.//Атомная энергия. – 1991. – 70. – 4. – С. 239-243.
8. Standard Test Method for Static Leaching of Monolithic Waste Forms for Disposal of Radioactive Waste, ASTM C1220-92, American Society for Testing and Materials, 1916 Race St., Philadelphia, PA, 19103 (MCC-1).

Поступила в редакцию 29.10.2012

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ И СВОЙСТВ ПУЗЫРЬКОВОЙ СРЕДЫ В ЖИДКОСТИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СКВОЗНЫХ ДЕФЕКТОВ ОБОЛОЧЕК БЛОЧКОВ С НАТРИЕМ

**Н.Н. Титаренко, П.А. Дворников, С.Н. Ковтун, В.П. Полионов**  
ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Рассмотрена возможность использования метода акустической эмиссии для контроля микродефектов в оборудовании. В частности, впервые экспериментально показано, что в процессе взаимодействия натрия с водой параметры акустической эмиссии определяются величиной области взаимодействия реагирующих компонентов реакции. Высказано предположение, что основным источником акустической эмиссии в реакции взаимодействия натрия с водой является генерация акустических колебаний в результате фазовых превращений гидроксида натрия. Полученные данные позволили разработать высокоеффективную систему контроля сквозных дефектов оболочек блочков с натрием.

**Ключевые слова:** Акустическая эмиссия, химическая реакция, пузырьковая среда, контроль дефектов.

**Key words:** acoustic emission, chemical reaction, bubble medium, to control defects.

## ВВЕДЕНИЕ

Одно из важнейших направлений обеспечения безопасности жизнедеятельности – это предотвращение глобальных катастроф, вызванных авариями на потенциально опасных объектах атомной, нефтегазовой и химической отраслей. Контроль технологических процессов и ранняя диагностика возникновения аварийных ситуаций позволяют принять своевременные меры и способствуют минимизации или предотвращению опасных последствий таких аварий.

Существует множество методов обнаружения утечек из работающего технического оборудования, включающих в себя несколько групп, среди которых особое место занимает акустический метод контроля (акустическая эмиссия (АЭ)), реализуемый путем регистрации акустических волн, возбуждаемых при протекании веществ через неплотности и дефекты материала оболочек оборудования [1, 2].

Важнейшим преимуществом акустических методов является их универсальность. Измерения проводятся в режиме реального времени без прямого контакта

и с минимальным вторжением в исследуемый процесс. Различают два метода акустического контроля процессов:

- активный, при котором измеряются параметры прохождения зондирующих среду сигналов (обычно ультразвуковых);
- пассивный, при котором измеряются сигналы акустической эмиссии, генерируемые самим процессом.

Колебания пузырьков в жидкости и их схлопывание приводят к генерации акустических волн, распространяющихся в среде в широком диапазоне частот.

Газо- и парожидкостные системы широко используются в различных областях энергетики, в металлургии, химической, биологической и других областях техники. Газовые пузырьки могут играть важную роль в различных технологических процессах, в частности, в атомных реакторах и мощных тепловых установках. В последние годы расширяется круг исследований процессов, происходящих с газовыми пузырьками в акустических полях.

Движение пузырьков и капель в подвижной жидкости или газе является основным элементом моделирования двухфазных потоков и определения скорости дрейфа. Теоретическому и экспериментальному изучению этих вопросов, а также процессам распространения и эволюции волн в газожидкостных средах посвящено значительное число работ. Среди них ограничимся лишь указанием известных монографических изданий [3–8], включающих в себя обширный библиографический обзор.

Известно, что резонансная частота для случая объемных (монопольных) колебаний, малых по сравнению с радиусом пузырька, определяется формулой Минаерта [8]

$$f_0 = \frac{1}{\pi D} \sqrt{\frac{3\gamma p_0}{\rho_f} \left( 1 + \frac{4\sigma_f}{p_0 D} \right) - \frac{4\sigma_f}{\rho_f D}}.$$

где  $p_0$  – гидростатическое давление в жидкости,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $\gamma = c_p/c_v$  – отношение удельных теплоемкостей газа;  $\sigma_f$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости,  $\text{Н}/\text{м}$ ;  $\rho_f$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $D$  – эквивалентный диаметр пузырька, м.

Активные акустические методы контроля состояния двухфазных потоков основаны на том факте, что пузырьки газа в жидкости изменяют акустические свойства всей среды. К основным этим свойствам относятся

- изменение затухания акустических волн в смешанном потоке жидкости и пузырьков газа;
- изменение скорости прохождения акустических волн в объеме парожидкостной среды;
- возникновение резонансного отклика при внесении коротких импульсных возмущений по давлению в поток за счет осцилляций объемов пузырьков газа на собственных частотах.

В частности, из анализа теоретических моделей следует, что декремент затухания акустической волны пропорционален объемной концентрации газа и убывает с ростом размеров пузырьков. Скорость акустической волны существенно зависит от концентрации газа в жидкости.

Задача создания «активной» системы индикации утечек, основанной на перечисленных выше эффектах, сводится к разработке методов и технических средств реализации измерений декремента затухания или скорости распространения акустических волн в объеме жидкости и обнаружения изменений этих характеристик.

В последние два десятилетия обсуждается возможность использования в различных прикладных приложениях явления генерации акустических колебаний, возникающих в ходе химических реакций и физико-химических процессов в гомогенных жидких средах [9–21].

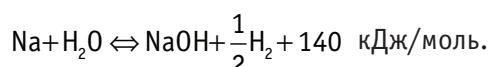
Многие химические реакции, в особенности связанные с фазовым переходом, являются акустически активными. Индивидуальный спектр акустических сигналов определяется природой участвующих в реакции продуктов. Прикладная значимость этого явления весьма существенна – возникает возможность мониторинга промышленных процессов и химических систем, который трудно осуществить иным способом.

В работе [19] экспериментально исследована акустическая эмиссия при фазовых переходах в водной среде, в частности, при плавлении льда. Показано, что частота, длительность и другие параметры индуцируемых акустических импульсов зависят от природы вещества и внешних условий. Зафиксировано явление акустической эмиссии в талой воде (гомогенной жидкости). Это позволяет использовать акустическую эмиссию как метод контроля ряда технологических процессов с участием метастабильных состояний вещества, для которых он может оказаться единственным пригодным.

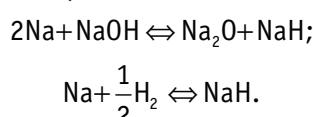
В работе [21] изучено применение метода акустической эмиссии для контроля процесса сольватации, в частности, рассмотрена динамика изменения параметров сигналов акустической эмиссии в процессе растворения кристаллов хлорида натрия. Приводится сравнение полученных акусто-эмиссионных данных и известных рентгеновских фазоконтрастных исследований. Показано, что различные стадии растворения надежно регистрируются предлагаемым методом в частотном диапазоне до 400 кГц, а параметры метода достаточно информативно отражают кинетику процесса растворения.

Целью данной работы является экспериментальное обоснование возможности использования генерации акустических колебаний в химических реакциях и физико-химических процессах и акустических свойств пузырьковой среды в жидкости для выявления сквозных дефектов оболочек контролируемых объектов.

Рассматривается реакция взаимодействия натрия с водой. Химическое взаимодействие натрия ( $T_{пл} = 371,0$  К,  $T_{кип} = 1157,7$  К) и воды протекает в два этапа [22, 23]. На первом этапе реакция протекает с большой скоростью с образованием гидроксида натрия, выделением газообразного водорода и тепла:



На втором этапе происходит химическое взаимодействие продуктов первого этапа реакции с избыточным натрием:



## УСТАНОВКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ОБОЛОЧЕК БЛОЧКОВ С НАТРИЕМ

Была разработана и изготовлена установка для регистрации сигналов датчиков АЭ в жидкой среде. Экспериментальная установка (см. рис. 1) состоит из реакционной камеры, жидкости (воды) и канала регистрации появления пузырьков в воде. Реакционная камера состоит из корпуса 1 (часть дна корпуса образована поверхностью исследуемого блока 2 со сварным швом 3). Блок с натрием 2 закреплен в дне корпуса 1 с помощью фигурной прокладки 4, выполненной из мягкой резины. Реакционная камера залита водой 5 при повышенной температуре до уровня, выше расположения сварного шва 4. Для нагрева и поддержания заданной температуры воды реакционная камера оснащена нагревателем 6 и дат-

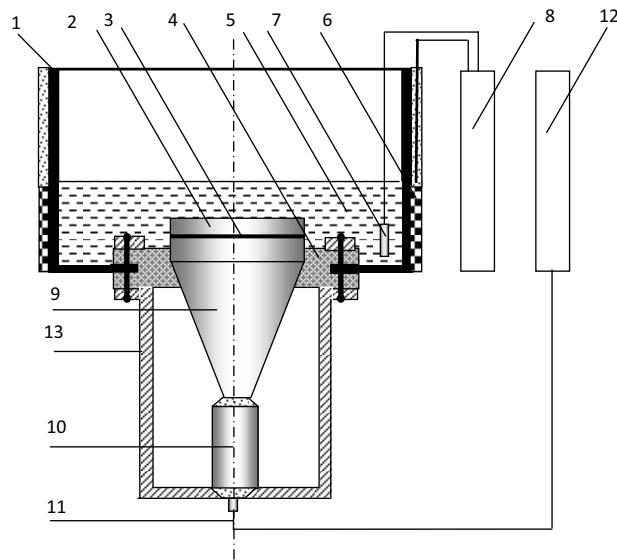


Рис. 1. Установка для контроля герметичности оболочек блоков с натрием

чиком температуры воды 7, которые подключены к измерителю-регулятору температуры 8.

Канал регистрации появления пузырьков в воде состоит из концентратора акустической энергии 9, выполненного в виде усеченного конуса, основание которого имеет акустический контакт с нижней плоскостью исследуемого блока, верхняя часть конуса сопряжена с чувствительной частью акустического датчика 10, который через линию связи 11 подключен ко входу измерительного комплекса 12. Концентратор и акустический датчик удерживаются в нужном положении фигурной прокладкой и скобой.

Работа установки осуществляется следующим образом. Непосредственно перед проверкой на герметичность партии блоков проводят их подготовку к измерениям. Для этого их нагревают вне установки до температуры выше температуры плавления натрия ( $97,8^{\circ}\text{C}$ ), при этом натрий в блоках переходит в жидкое состояние, вязкость его резко падает, а давление на оболочку возрастает. Это обстоятельство создает благоприятные условия заполнения жидким натрием дефектов сварки, если таковые имеются в оболочке блока.

На следующем этапе разогретый блок переносят в реакционную камеру и устанавливают на основание конуса акустического концентратора таким образом, чтобы контролируемый сварной шов был полностью покрыт водой. После этого запускается измерительный комплекс.

При наличии в оболочке блока микродефекта вода и натрий вступают в реакцию с выделением водорода, наблюдаемого в виде пузырьков в воде. В процессе химической реакции происходит интенсивная генерация акустических колебаний в широком диапазоне частот. Образование пузырьков, отрыв их от блока, движение в воде и схлопывание на линии раздела вода-воздух также являются источниками акустического шума, который передается оболочке блока.

Находящийся в акустическом контакте с оболочкой блока концентратор интегрирует сигналы со всей нижней поверхности блока и передает на чувствительную часть акустического датчика, который преобразовывает их в электрические сигналы и по кабельной линии связи передает в измерительный комплекс. Таким

образом, акустический датчик одновременно воспринимает все акустические колебания, приходящие на его поверхность. Это позволило повысить чувствительность всей установки. Частотный диапазон экспериментальной установки составляет от 100 до 600 кГц.

Разработанный акусто-эмиссионный комплекс представляет собой многоканальную систему регистрации АЭ, обрабатывает сигналы акустического датчика (линейный выход), формирует их, определяет их среднеквадратическую величину (логарифмический выход) за время измерений, сравнивает зарегистрированный сигнал с фоновым сигналом, полученным в измерениях с герметичным блоком, и по результатам сравнения выдает заключение. Сравнение проводится с использованием методов статистического анализа, позволяющего обнаружить негерметичность блока с наперед заданной достоверностью.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунках 2–5 приведены некоторые результаты работы, полученные на установке для контроля герметичности блоков с натрием. Из рисунков видно, что

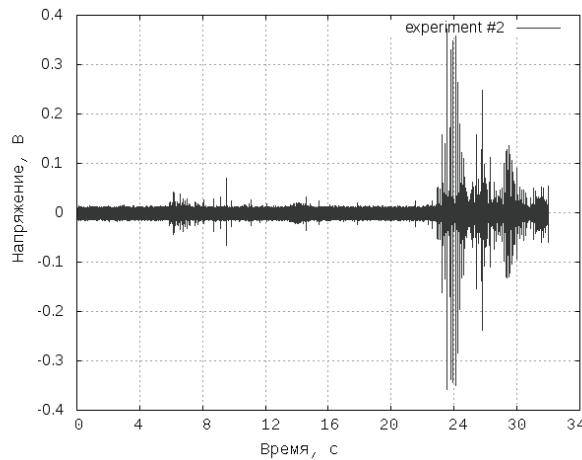


Рис. 2. Амплитуда сигнала АЭ (линейный выход) при схлопывании пузырька водорода диаметром ~3 мм на поверхности воды

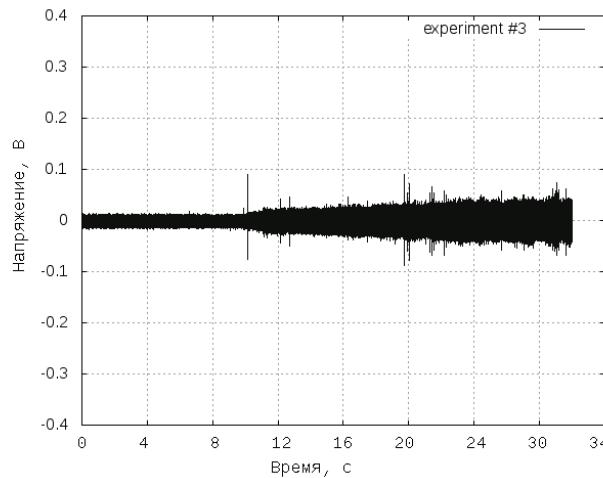


Рис. 3. Амплитуда сигнала АЭ (линейный выход) при схлопывании пузырька водорода диаметром ~1 мм на поверхности воды

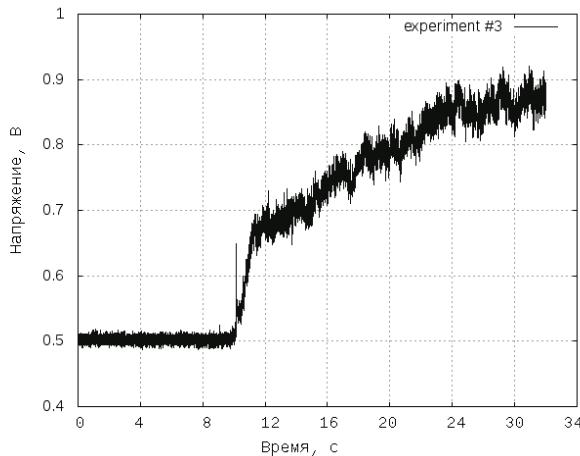


Рис. 4. Амплитуда сигнала АЭ (логарифмический выход) при схлопывании пузырька водорода диаметром ~1 мм на поверхности воды

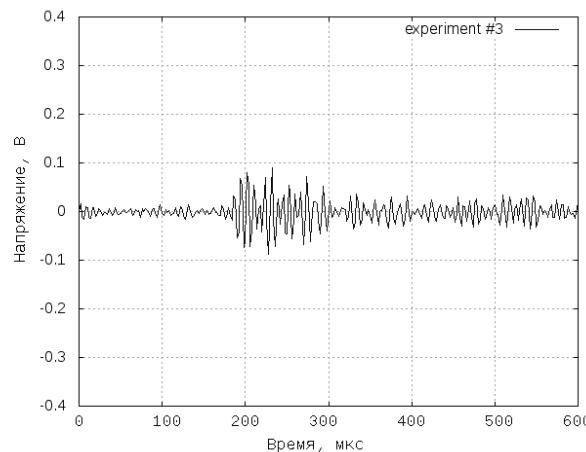


Рис. 5. Фрагмент реализации показаний линейного выхода акустического канала при схлопывании пузырька водорода диаметром ~1 мм на поверхности воды

благодаря особенностям конструкции установки, а именно, отсутствия в ней посторонних источников акустического шума, и выбранного теплового режима ее работы фоновая составляющая сигнала акустического канала мала. Кроме того, заметное различие частотных характеристик фонового и полезного сигналов позволяет надежно выделить последний, что понижает порог чувствительности обнаружения негерметичности блоков с натрием.

Длительность акустического сигнала в момент генерации пузырька примерно в 3,5 раза меньше длительности акустического сигнала в момент его схлопывания. Анализ спектра сигналов показывает, что он простирается преимущественно в диапазоне частот от 100 до 600 кГц.

Эксперименты, проведенные на макете установки, позволили получить оценку времени измерения, необходимого для надежного контроля герметичности оболочки блока, оно оказалась не более 5 с.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании пассивного акустического метода разработана установка для контроля микронеплотностей оболочек блоков с металлическим натрием. Уста-

новка позволила наблюдать динамику изменения параметров АЭ, сопровождающую реакцию взаимодействия натрия с водой.

В результате экспериментальных исследований показано, что при взаимодействии натрия с водой основным источником акустических сигналов является генерация акустических колебаний при фазовых превращениях гидроксида натрия. Образование пузырьков водорода, отрыв их от микронеплотности и схлопывание на линии раздела вода-воздух также являются дополнительными источниками акустических сигналов.

Замечено, что процесс взаимодействия натрия и воды при истечении одного реагента в другой в свободном объеме сопровождается пульсацией давления в зоне реакции. Это, в свою очередь, также может приводить к генерации акустических колебаний в жидкости.

Общая акустическая активность наблюдаемого процесса является информативным параметром и для задач дефектоскопии его вполне достаточно. Однако для целей выяснения механизма и кинетики физико-химических процессов следует проводить серию специальных исследований, которые позволили бы не только выделить сигналы нужной реакции, но и определить основные характеристики самих сигналов.

**Статья подготовлена при выполнении Государственного контракта от 05.08.2011 №16.526.11.6006 в рамках федеральной целевой программы.**

### **Литература**

1. Иванов В.И., Белов В.М. Акустоэмиссионный контроль сварки и сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
2. Дробот Ю.Б., Грешников В.А., Бачегов В.Н. Акустическое контактное течеискание. – М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.
3. Fowler T. J. Chemical industry applications of acoustic emission, Materials Evaluation, 1992, 875-882
4. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. – М.: Энергоатомиздат. 1990. 248 с.
5. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 2. – М.: Наука. 1987. – 359 с.
6. Leighton T.J. The acoustic Bubble. – London: Academic Press Limited, 1994. – 613 p
7. Leighton T.G., Ramble D.G. and Phelps A.D. The detection of tethered and rising bubbles using multiple acoustic techniques//J. Acoust. Soc. Am. 1997. – 101 (5). – P. 2626-2635
8. Ainslie M.A., Leighton T.G. Near resonant bubble acoustic cross-section corrections, including examples from oceanography, volcanology, and biomedical ultrasound//J. Acoust. Soc. Am. – 2009. – 126 (5). – P. 2163-2175.
9. Boyd J.W.R., Varley J. The uses of passive measurement of acoustic emissions from chemical engineering processes//Chemical Engineering Science. – 2001. – 56. – P. 1749–1767.
10. Betteridge D., Joshlin M.T. & Lilley T. Acoustic emissions from chemical reactions//Analytical Chemistry. – 1981. – 53. – P. 1064-1073.
11. Sawada T., Gohshi Y., Chikako A. & Furuya K. Acoustic emission from phase transition of some chemicals. Analytical Chemistry, 57, (1985). 1743-7145.
12. Belchamber R.M., Betteridge D., Collins M.P., Lilley T., Marczewski C.Z. & Wade A.P. Quantitative study of acoustic emission from a model chemical process//Analytical Chemistry. – 1986. – 58. – P. 1873-1877.
13. Wentzell P.D. & Wade A.P. Chemical acoustic emission analysis in the frequency domain//Analytical Chemistry. – 1989. – 61. – P. 2638-2642
14. Crowther T.G., Wade A.P., Wentzell P.D. & Gopal R. Characterization of acoustic emission from an electrolysis cell//Analytica Chimica Acta. – 1991. – 254. – P. 223-234.

## БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЯЭУ

---

15. Cao Z., Wang B.-F., Wang K.-M., Lin H.-G. & Yu R.-Q. Chemical acoustic emissions from gas evolution processes recorded by a piezoelectric transducer//Sensors and Actuators B. – 1998. – 50. – P. 27-37.
16. Manasseh R., LaFontaine R.F., Davy J., Shepherd I., Zhu Y.-G. Passive acoustic bubble sizing in sparged systems//Experiments in Fluids. – 2001. – 30. – P. 672-682.
17. Смирнов А.Н. Генерация акустических колебаний в химических реакциях и физико-химических процессах// Российский химический журнал. – 2001. – Т. 45. – С. 29-34
18. Al-Masry W.A., Ali E.M., Aqeel Y.M. Determination of bubble characteristics in bubble columns using statistical analysis of acoustic sound measurements//Chemical Engineering Research and Design. – 2005. – 83. – P. 1196-1207.
19. Кузнецов Д.М., Смирнов А.Н. Акустическая эмиссия при фазовых превращениях в водной среде//Российский химический журнал. – 2008. – Т.ЛII. – №1. – С. 114-121.
20. Manasseh R., Ooi A. Frequencies of acoustically interacting bubbles. Bubble Science, Engineering and Technology 1, (2009)58–74.
21. Кузнецов Д.М., Буйло С.И., Козаченко П.Н., Дубовков В.В. Акустико-эмиссионные исследования растворения кристаллов хорида натрия//Фундаментальные исследования. – 2012. – № 9. – С. 388-392.
22. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федынский О.С. Жидкometаллические теплоносители. 3-е изд. – М.: Атомиздат, 1976. – 328 с.
23. Поплавский В.М., Козлов Ф.А. Безопасность парогенераторов натрий-вода. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 144 с.

Поступила в редакцию 17.12.2012

# ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТОЗОНДОВЫХ СИГНАЛИЗАТОРОВ УРОВНЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ИНТЕГРАЛЬНОМ СТЕНДЕ КВ-2

**В.И. Мельников\*, В.В. Иванов\*, Ю.А. Киселев\*\*, А.А. Киселев\*\*,  
К.М. Милясов\*\***

\* Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
г.Н.Новгород

\*\* Опытное конструкторское бюро машиностроения Африкантов, г.Н.Новгород



Приведены результаты трехлетней эксплуатации акустозондовых 24-х точечных сигнализаторов уровня на стенде КВ-2. Отмечено, что сигнализаторы в целом работали удовлетворительно. В переходных режимах позволяли вести наблюдения за термогидравлическими процессами в реакторе, связанными с образованием паровой фазы, в том числе «вспучивание» уровня теплоносителя, паровые образования, конденсация.

**Ключевые слова:** акустозондовые сигнализаторы, термогидравлические процессы, паровая фаза, конденсация, интегральный стенд КВ-2.

**Key words:** acoustic probes, thermo hydraulic processes, vapor phase, steam condensation, integrated stand KV-2.

Одним из основных технологических параметров, определяющим нормальную и безопасную эксплуатацию реакторной установки, является уровень теплоносителя. В частности, разгерметизация первого контура может привести к осушению активной зоны, нарушению процесса отвода тепла и последующему плавлению топлива. Поэтому уровнемеры относятся к наиболее важным компонентам системы обеспечения безопасности.

Применяются приборы контроля уровня, основанные на различных физических принципах, в частности, гидростатические, основанные на определении веса столба жидкости, которые хорошо зарекомендовали себя при измерении однофазного теплоносителя. Однако измерение уровня значительно усложняется при кипении теплоносителя, которое возникает, например, при переходных процессах и в аварийных ситуациях.

Другой проблемой в реакторной уровнеметрии является метрология прибора, что обусловлено спецификой условий его применения. Для исключения метрологической аттестации прибора применяют конструктивное исполнение датчика в виде многоточечного сигнализатора жидкой (газовой) фазы теплоносителя по высоте контролируемой емкости. В результате получают уровнемер дискретного

действия с фиксированным шагом контроля уровня, не требующего метрологического сертификата.

Наиболее приемлемыми для решения задачи контроля уровня водяного теплоносителя в реакторных установках, по нашему мнению, являются акустические уровнемеры, основанные на использовании металлических волноводов [1]. Их применение позволяет проводить измерения практически безынерционно и создавать датчики со значительным ресурсом в экстремальных условиях ядерной установки. Техника и теория волноводных датчиков, использующих различные типы нормальных волн, описана в [1].

В работах [2, 3] представлена многоточечная акустозондовая система на основе ультразвуковых волноводных зондов продольных волн, позволяющая контролировать распределение объемной концентрации газовой фазы по высоте с любым заданным шагом в реальном масштабе времени. Общее количество жидкой фазы теплоносителя в объеме, а также величины уровней (весового, объемного, гидродинамического и т. д.) находятся при помощи простых вычислений.

Акустозондовые сигнализаторы уровня (СУ), изготовленные ОКБМ, успешно прошли межведомственные испытания [3]. Датчики сигнализаторов позволяют определять фазовый состав теплоносителя в 24-х точках по вертикали с шагом 100 мм.

В 2008 г. два СУ были смонтированы и введены в эксплуатацию в интегральном реакторе стенда КВ-2[4] НИТИ (г. Сосновый Бор). Стенд успешно эксплуатировался и был остановлен в мае 2012 г. К настоящему времени накоплен более чем трехлетний опыт эксплуатации акустозондовых сигнализаторов.

Датчики СУ установлены над активной зоной реактора в подъемном участке (рис. 1). Блоки вторичных приборов вынесены в соседнее помещение и оснащены вертикально расположенными светодиодными индикаторами (рис. 2). Кроме того, предусмотрена передача информации в пультовое помещение стенда (рис.3). Выходные сигналы сигнализаторов были введены в систему АСУ и аварийной защиты реактора.

Характеризуя опыт эксплуатации сигнализаторов на стенде, отметим его главные результаты.

СУ работали удовлетворительно в течение всего цикла эксплуатации в полном соответствии с техническим заданием на прибор.

В стационарных режимах приборы работали устойчиво. Ложные срабатывания АЗ стенда, не наблюдались.

В переходных режимах сигнализаторы позволяли вести наблюдения за теплогидравлическими процессами в реакторе, связанными с образованием паровой фазы, в том числе «вспучивание» уровня теплоносителя, движение паровых образований, конденсацию и стекание жидкой фазы.

Эти эффекты можно было наблюдать благодаря светодиодной индикации, которая позволяла определять наличие газовой или жидкой фазы в теплоносителе в точках контроля, распределен-

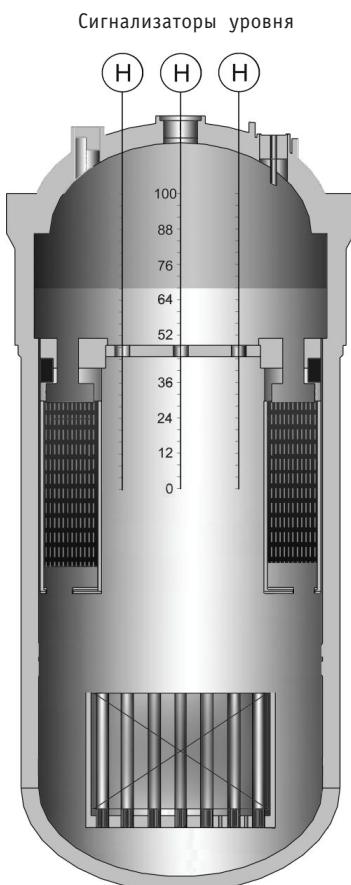


Рис.1. Схема установки датчиков сигнализаторов в стенде

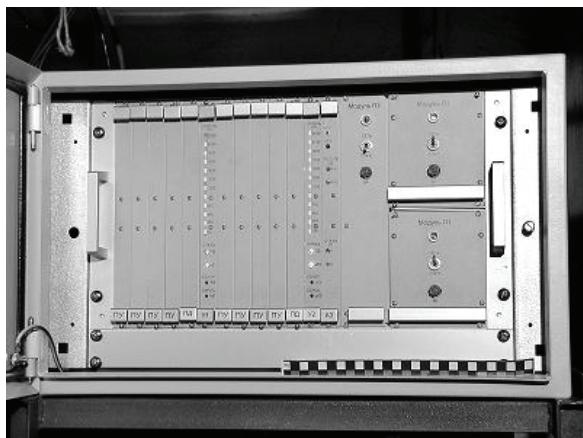


Рис. 2. Вторичный прибор сигнализатора уровня на стенде (на лицевой панели в виде вертикальной линейки размещены светодиодные индикаторы, регистрирующие фазовый состав теплоносителя в точках контроля)



Рис.3. Отработка процесса измерений во время экспериментальных работ на стенде

ных по высоте подъемного участка стенда с шагом 100 мм, в реальном масштабе времени.

Общая картина этих наблюдений следующая. При увеличении мощности реактора светодиодная индикация сигнализатора фиксирует кратковременное вскипание теплоносителя в ТВС активной зоны и появление пара в подъемном участке стенда. Последовательное переключение свечения линейки светодиодов (снизу вверх) свидетельствует о появлении и всплытии как мелких, так и крупных паровых образований, проникающих внутрь чехловой трубы датчика. Характерный вертикальный размер пузырей, зафиксированный приборами, был в диапазоне от нескольких до сотен миллиметров. При этом интегральная оценка количества теплоносителя показывала «вспучивание» уровня теплоносителя.

По истечении нескольких десятков секунд вследствие повышения давления в системе процесс кипения постепенно замедлялся и активное парообразование прекращалось.

Движение пузырей пара через чувствительные элементы датчика не сказывалось на интегральных показаниях приборов благодаря примененному для вычисления уровня рекурсивному алгоритму усреднения данных и алгоритму вычисле-

ния уровня по нахождению границы раздела сред между верхними точками контроля, находящимися в паровой фазе, и точками контроля, остающимися в воде.

При сбросе мощности реактора и в процессе расхолаживания светодиодная индикация последовательным переключением свечения линейки светодиодов сверху вниз показывала движение конденсата на поверхности чехловых труб датчиков, обусловленного интенсивной конденсацией пара на поверхности внутриреакторных элементов под крышкой реакторного блока.

Согласно показаниям светодиодных индикаторов сигнализаторов происходил значительный сток конденсата по чехловым трубам датчиков с расходом не менее 0,1кг/с. По мере расхолаживания, в течение нескольких часов интенсивность образования конденсата постепенно снижалась.

Вышеописанные физические эффекты на переходных режимах приводили к повышенным колебаниям выходных сигналов сигнализаторов (в пределах 5–7%), подаваемых в АСУ стенда и в СУЗ реактора (колебания выходных сигналов обусловлены задержкой жидкой фазы теплоносителя на кончиках волноводов, формирующих контролируемый объем). Для их устранения был разработан рекурсивный алгоритм усреднения показаний прибора во времени с учетом информации, выдаваемой соседними точками контроля.

Электронные блоки СУ продублированы и оснащены системой самоконтроля и обнаружения возможного выхода из строя контрольных точек датчика, что исключает изменение показаний приборов в случае отказа любой из точек контроля или даже одного из электронных блоков в целом.

В процессе трехлетней эксплуатации сигнализаторов уровня отказов в электронных блоках не было обнаружено. Однако был зафиксирован обрыв цепей питания двух пьезоэлементов в составе датчиков (всего в работе находилось 96 пьезоэлементов). Отказавшие точки контроля были скорректированы, и их показания не повлияли на работу приборов.

### **ВЫВОДЫ**

Сигнализаторы уровня работали удовлетворительно в соответствии с техническим заданием на прибор в течение трех лет.

В стационарных режимах выходные сигналы были стабильны и соответствовали показаниям других средств контроля стенда. Замечаний к сигналам, подаваемым в систему АСУ и АЗ стенда, не было.

В переходных режимах сигнализаторы позволяли вести наблюдения за теплогидравлическими процессами в реакторе, связанными с образованием паровой фазы, в том числе «вспучивание» уровня теплоносителя, движение паровых образований, конденсация.

На переходных режимах наблюдались повышенные колебания выходных сигналов сигнализаторов (в пределах 5–7%), подаваемых в АСУ и АЗ стенда

Применение рекурсивного алгоритма усреднения данных измерений в соседних точках контроля во времени позволило эффективно подавлять колебания выходного сигнала, вызванного кипением теплоносителя и стеканием капель в процессе конденсации.

### **Литература**

1. Мельников В.И., Дробков В.П., Контелев В.В. Акустические методы диагностики газожидкостных потоков. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 351с.
2. Мельников В.И., Дунцев А.В., Вьюгин А.Б. Исследование акустозондовой системы определения уровня кипящего водяного теплоносителя // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. – №4. – С.100-106.

3. Мельников В.И. и др. Исследование акустозондового сигнализатора уровня кипящего водяного теплоносителя// Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – № 1. – С. 25-32.

4. Митенков Ф.М. Перспективы развития корабельной ядерной энергетики// Вестник Российской академии наук. – 1996. – Т. 66. – № 11. – С. 1002-1004.

Поступила в редакцию 25.12.2012

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

**К.Н. Маловик, В.В. Никишин**

*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности*



Рассматривается аналитическое прогнозирование предельного состояния теплоносителя. Показаны экспериментальные данные физического моделирования измерения объёмного паросодержания с помощью усовершенствованной системы технического зрения. Предлагается применение теории динамических рядов для прогнозирования состояния теплоносителя ядерного реактора.

**Ключевые слова:** теплоноситель, паросодержание, ядерный реактор, система технического зрения, прогнозирование.

**Key words:** coolant, steam content, nuclear reactor, machine vision, dynamic trends.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальность оценивания и прогнозирования ресурса ядерных реакторов (ЯР) подтверждается окончанием сроков эксплуатации значительного числа оборудования атомных электростанций. Имеются сведения [1] о создании новых конструкций ядерных реакторов, срок службы которых планируется от 60-ти лет и выше. В статье предлагается подход для прогнозирования состояния теплоносителя ядерных реакторов, который может быть использован на этапах проектирования и разработки новых реакторов, а также исследования деградационных и ресурсных отказов.

Цель исследования – усовершенствование метода прогнозирования состояния теплоносителя ЯР.

Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть физическое моделирование измерения параметров теплоносителя и исследовать полученные экспериментальные данные.

## ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Объектом исследования является теплоноситель ЯР.

Метод измерения паросодержания оптический, с помощью компьютерного зрения для последующей специальной обработки изображений.

Известно [1, 2], что в ЯР типа ВВЭР кипение не допускается, но не исключается полностью. Ведутся изыскания по созданию ЯР, срок эксплуатации которых может достигать 60 и более лет. Для повышения характеристик надёжности и безопасности АЭС необходимы исследования по определению коренных причин деградационных и ресурсных отказов оборудования трубопроводов. Для решения этих задач применяется оптический метод, положенный в основу работы усовершенствованной системы технического зрения (СТЗ) [3–5, 7–10], который позволяет оценивать объёмное паросодержание теплоносителя с высокой достоверностью.

© К.Н. Маловик, В.В. Никишин, 2013

Под объёмным паросодержанием рассматривается отношение объёма паровой фазы к сумме объёмов паровой и жидкой фаз [6]:

$$\Psi = \frac{S_G}{S_L + S_G}, \quad (1)$$

где  $S_G$  и  $S_L$  площади поперечного сечения газовой среды и жидкой фазы в канале соответственно.

Так как метод измерения оптический, то он основывается на анализе цифровых изображений (кадров), полученных видеокамерой [8–12]. Кадр представляет собой матрицу, состоящую из элементов или пикселей (рис. 1 а), каждый из которых характеризуется набором параметров. Основными параметрами являются координаты и яркость. Количество пикселей определяется разрешающей способностью чувствительного элемента видеокамеры прибора с зарядовой связью.

На получаемых кадрах изображение паровых пузырей состоит из ярких (относительно остального фона) пикселей (рис. 1 б). Логично предположить, что просуммировав количество ярких пикселей, можно измерить площадь, которую они занимают на кадре. Вся площадь кадра соответствует проекции той части экспериментального канала, которую захватывает видеокамера.

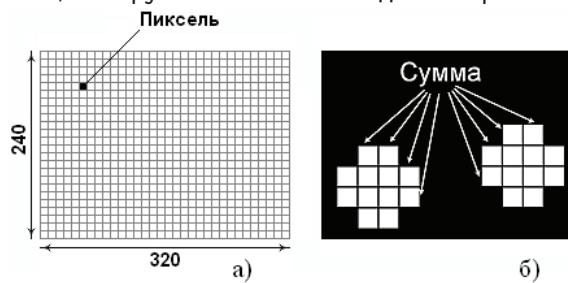


Рис. 1. Принцип измерения паросодержания с помощью СТЗ

Таким образом, измерение объёмного паросодержания рассчитывается косвенно по площади проекции паровых пузырей.

Если соотнести это значение ко всей площади кадра, то получается значение паросодержания в захватываемой видеокамерой части экспериментального канала (1).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

На рисунке 2 представлены полученные результаты измерений по каналам температуры и вычисленное с помощью специализированного программного обеспечения, входящего в состав СТЗ [5], значение объёмного паросодержания.

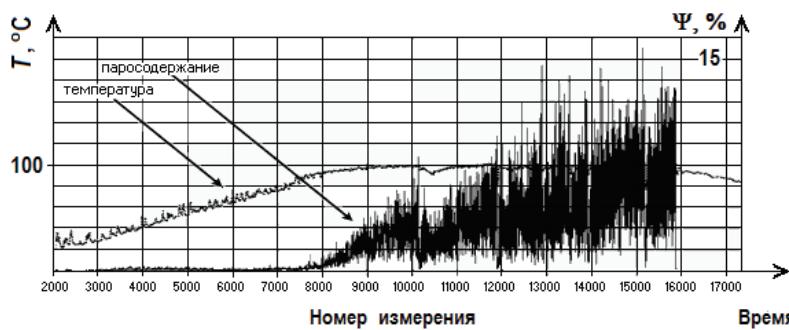


Рис. 2. Экспериментальные данные физического моделирования процесса измерения паросодержания с помощью СТЗ

Ось абсцисс соответствует номеру измерения, при котором опрос сенсоров температуры и видеокамеры СТЗ обеспечивает получение 30-ти изображений в секунду.

### ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Как видно из рис. 2, оцениваемое объёмное паросодержание характеризуется скачками или пульсациями, поэтому необходима фильтрация полученных значений. Фильтрация значений медианным фильтром со скользящим окном размером 30 измерений позволяет эти пульсации сгладить.

На рисунке 3 представлены отфильтрованные значения объёмного паросодержания, показанные на рис. 2.

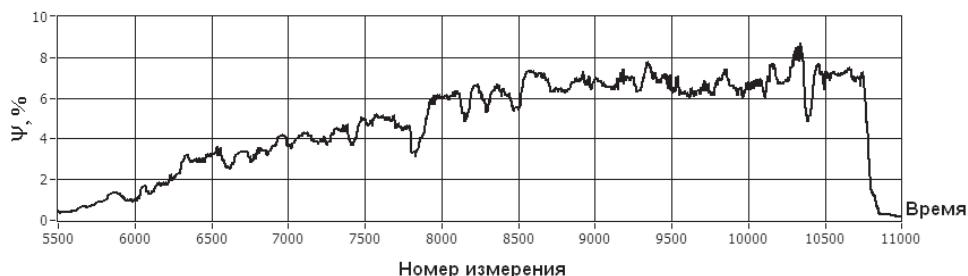


Рис. 3. Фильтрация медианным фильтром

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Для решения задачи прогнозирования состояния теплоносителя по уровню объёмного паросодержания, измеряемого оптическим методом, рассмотрим полученные экспериментальные данные как ряд динамики [13].

Ряд динамики это значения статистических показателей, которые представлены в определенной хронологической последовательности. Существуют два варианта динамических рядов: интервальный и моментный.

Изменение величины объёмного паросодержания является динамическим моментным рядом, отражающим значения показателей на определенный момент времени (дату времени).

Для количественного оценивания динамических рядов используют базисные и цепные показатели.

Базисные показатели характеризуют итоговый результат всех изменений в уровнях ряда от периода базисного уровня до данного ( $i$ -го) периода.

Цепные показатели характеризуют интенсивность изменения уровня от одного периода к другому в пределах того промежутка времени, который исследуется.

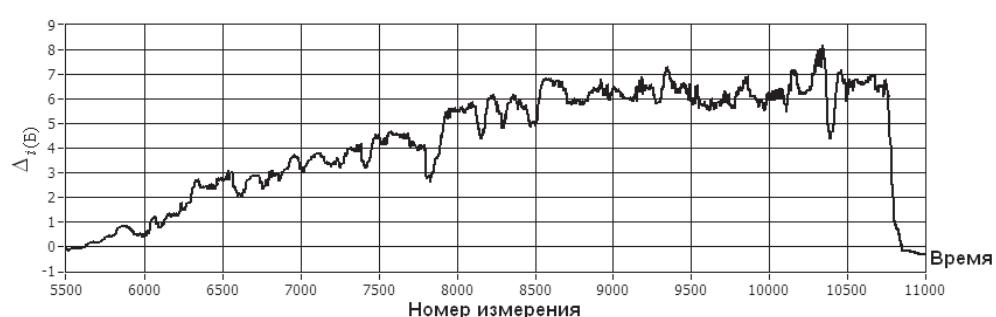


Рис. 4. График изменения абсолютного базисного прироста объёмного паросодержания

Абсолютный прирост выражает абсолютную скорость изменения ряда динамики и определяется как разность между данным уровнем и уровнем, принятым за базу сравнения:

$$\Delta_{i(B)} = \Psi_i - \Psi_0, \quad (2)$$

где  $\Psi_i$  и  $\Psi_0$  уровни объёмного паросодержания сравниваемого и базисного периодов соответственно.

Как видно из рис. 4, график абсолютного базисного прироста практически полностью повторяет характер изменения объёмного паросодержания. Это связано с тем, что величина  $\Psi_0$  принимается равной нулю как базовая в формуле (2).

Рассмотрим характер изменения абсолютного цепного прироста.

Абсолютный прирост  $\Delta_{i(C)}$  с переменной базой (цепной), который называют скоростью роста, рассчитывается по соседним парам измеренных величин:

$$\Delta_{i(C)} = \Psi_i - \Psi_{i-1}. \quad (3)$$

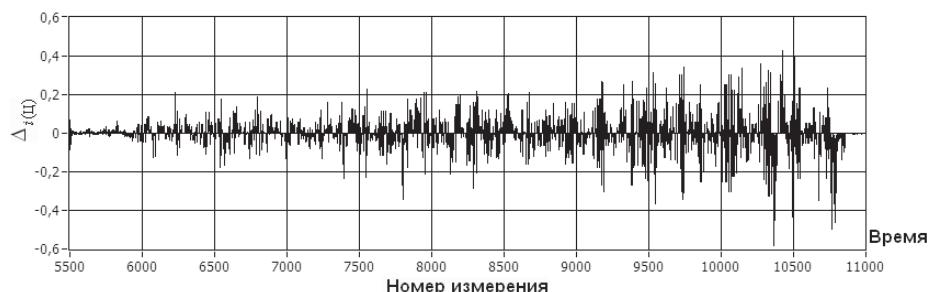


Рис. 5. График изменения абсолютного цепного прироста объёмного паросодержания

Физический смысл абсолютного цепного прироста мгновенная скорость изменения объёмного паросодержания. Из рисунка 5 видно что объёмное паросодержание изменяет свою величину не только количественно, но и качественно скорость имеет как положительные, так и отрицательные значения, что говорит о скачкообразном процессе. Можно также видеть, что мгновенная скорость роста объёмного паросодержания на протяжении всего эксперимента не превышает 0,6%.

Таким образом, абсолютный цепной прирост удобно использовать для оценивания текущей нестабильности состояния теплоносителя.

Абсолютный базисный прирост можно использовать для прогнозирования предельного состояния теплоносителя, которое устанавливается экспертом.

На рисунке 6 показаны исходные данные измеренного объёмного паросодержания с помощью СТЗ. Для прогнозирования состояния теплоносителя используется способ, показанный в [14].

Для иллюстрации возможности применения предлагаемого подхода показан условный предел объёмного паросодержания  $\Psi_{\text{пред}} = 5\%$ , т.е. ставится задача определения времени, необходимого теплоносителю для достижения уровня объёмного паросодержания в 5%. На этапе исследований и экспериментов уровень предельного состояния устанавливается экспертом исходя из основной задачи (недопущение кипения, состояние кипения с некоторым уровнем паросодержания и т.д.).

Покажем прямую, проведённую из начального момента времени. На рисунке 6 выбраны две точки, для которых находится абсолютный прирост. Угол наклона прямой можно рассчитать, используя величину абсолютного базисного прироста.

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\Delta_{i(Б)}}{\Delta t}, \quad (4)$$

где  $\Delta t$  – интервал, соответствующий разности между временем, в котором берётся абсолютный базисный прирост, и временем, в котором зафиксировано базисное значение.

Как видно из рисунка, процесс роста объёмного паросодержания хорошо интерполируется прямой, поэтому для двух разных точек угол наклона может быть принят одинаковым. В связи с этим практически неважно, в какой точке определяется абсолютный прирост.

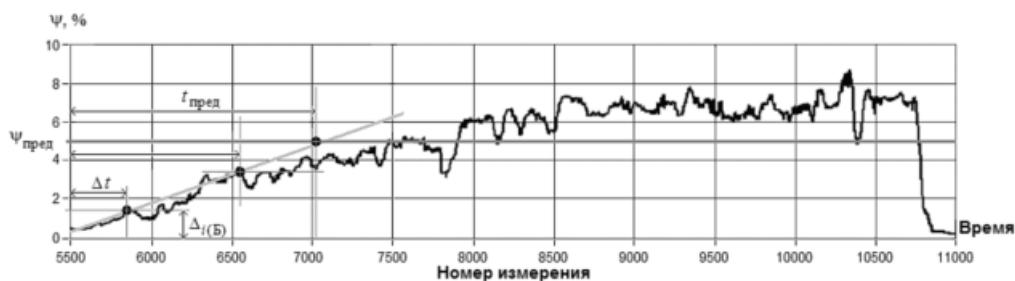


Рис. 6. Прогнозирование состояния теплоносителя

Если продлить прямую до пересечения с установленным ранее предельным уровнем объёмного паросодержания, то можно получить ориентировочное время, которое необходимо теплоносителю для перехода в это состояния с момента начала роста паросодержания [14].

Используя такой подход, можно получить несколько прямых, имеющих некоторый диапазон углов наклона, а соответственно, и некоторый диапазон прогнозируемых моментов времени. Тогда могут быть два предельных случая – так называемые *пессимистический* и *оптимистический* прогнозы [15], показанные на рис. 7.

Пессимистический прогноз соответствует быстрому переходу теплоносителя в предельное состояния, оптимистический – медленному.

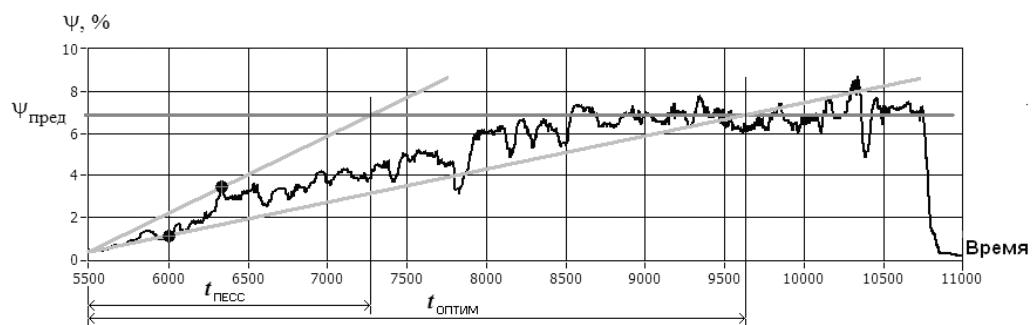


Рис. 7. Оптимистический и пессимистический прогнозы

## ВЫВОД

Предлагается усовершенствованный на базе теории динамических рядов подход для прогнозирования состояния теплоносителя при проектировании ядерных реакторов новых поколений. Этот подход также может быть использован для исследования деградационных и ресурсных отказов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций /В.А. Острейковский. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928 с.
2. АЭС с ВВЭР: Режимы, характеристики, эффективность /Р.З. Аминов, В.А. Хрусталёв, А.С. Духовенский, А.И. Осадчий. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 264 с.
3. Розвиток систем технічного зору для дослідження параметрів теплоносія ядерних реакторів /К.Н. Маловік, В.В. Нікішин // Науково-производственный журнал України «Метрологія та прилади». – Харків: – № 2, 2010. – С. 25 – 27.
4. Усовершенствование программного обеспечения для системы технического зрения экспериментального теплофизического стенда /К.Н. Маловик, В.В. Никишин // Сборник научных трудов СНУЯЭиП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2010. Вып. 3(35). – С. 204 208.
5. Моделирование процессов измерения паросодержания теплоносителя ядерных реакторов /В.В. Никишин // Сборник научных трудов СНУЯЭиП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2012. Вып. 2(42). – С. 205 – 210.
6. Баттерворс Д., Хьюонт Г. Теплопередача в двухфазном потоке. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
7. Попов И.А. Оптическая измерительно-информационная система для исследования кипения и конденсации пузырей в пароводяном потоке /И.А. Попов и др. // Труды Международной конференции «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР». – Обнинск: ФЭИ. – 1995. – Т. 1. – С. 98 – 106.
8. Попов И.А. Новые методы измерения теплогидравлических параметров в ядерной энергетике /И.А. Попов, Е.Н. Сычёв // Сб. науч. тр. – Севастополь: СНИЯЭиП, 2003. Вып 8. – С. 77 – 85.
9. Оптическая измерительная система технического зрения для измерения истинных характеристик двухфазного потока /И.А. Попов, В.А. Ловягин, Д.М. Сайда, К.Б. Матузаев // Труды II Российской конференции по тепломассообмену. – Обнинск, 1998. – С. 78 – 81.
10. Попов И.А. Основные направления и результаты разработки оптических методов для исследования теплофизических процессов в энергонапряжённых моделях ТВС /И.А. Попов, Ю.М. Быковский, Д.М. Сайда // Тр. Междунар. конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР» – Т.1. – Обнинск: ФЭИ, 1995. – С. 32 – 46.
11. Матузаев К.Б. Оценка точности определения истинных характеристик фазовых структур потока теплоносителя с помощью оптического измерительного канала /К.Б. Матузаев // Сборник научных трудов СИЯЭиП. – Севастополь: СИЯЭиП, 2001. Вып. 5. – С. 35 – 40.
12. Герлига В.А. Пузырьковые кипящие потоки в энергооборудовании АЭС /В.А. Герлига, В.И. Скалозубов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 432 с.
13. Лукашин Ю.П. Аддитивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: Учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 415 с.
14. Маловик К.Н., Никишин В.В. Патент Украины № 51036 «Способ идентификации примесей в водной системе охлаждения», Бюллетень № 12. 2010.
15. Антонов А.В. Статистические модели в теории надёжности: Учеб. пособие /А.В. Антонов, М.С. Никулин. – М.: АБРИС, 2012. – 319 с.

Поступила в редакцию 17.12.2012

# МЕТОДИКА И ПРОГРАММА РАСЧЕТА СТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СИСТЕМЕ МНОГОЗОННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТВЭЛОВ

**В.А. Старков, Н.Ю. Марихин**  
ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград



Предложены методика и аналитическое решение стационарной задачи теплопроводности для системы многозонных цилиндрических тел. На их основе разработан алгоритм и написана инженерная ФОРТРАН-программа ТГРК для расчета температурного поля, плотности теплового потока в тепловыделяющей сборке с многозонными кольцевыми твэлами, температуры начала поверхностного кипения на твэлах, критических потоков и соответствующих теплотехнических запасов. В тепловыделяющей сборке предусмотрены две схемы циркуляции теплоносителя: прямоточная и схема Фильда. Проведено сравнение результатов расчета по программе ТГРК с программой-аналогом. Показано согласие результатов расчета и преимущества программы ТГРК по потребительским качествам.

**Ключевые слова:** твэл, плотность теплового потока, температура, кризис теплообмена, температура начала поверхностного кипения, теплотехнические запасы.

**Key words:** fuel element, thermal flux density, temperature, heat exchange crisis, surface boiling onset temperature, thermotechnical margins.

При планировании экспериментов по облучению образцов материалов, макетов изделий, реакторных испытаний твэлов и полномасштабных выделяющих сброк возникает потребность в проведении большого количества вариантовых расчетов для предварительного выбора конструкции облучательного устройства, определения температурных режимов облучения. При длительных испытаниях необходимо учитывать влияние на температурные условия облучения таких факторов, как наличие отложений на теплогенерирующих поверхностях, появление коррозионной пленки. Наличие зазора или, наоборот, диффузационного слоя между сердечником и оболочкой, который имеет отличную от них теплопроводность, тоже должно учитываться при расчете. Это определяет потребность в инженерной программе, которая решала бы эти задачи и в то же время обеспечивала минимальные погрешности в результатах расчета, обусловленные выбранным методом решения уравнений теплопроводности. Программа должна также определять такие важнейшие при проведении испытаний параметры как запас до начала поверхностного кипения теплоносителя и запас до кризиса теплообмена. Имеющиеся в общественном пользовании программы такого класса, основанные на численных и итерационных методах решения стационарной задачи теплопроводнос-

ти, как правило, рассчитывают твэлы с числом физических зон не более двух (сердечник и две оболочки из одинакового материала), что недостаточно, но не рассчитывают теплотехнические запасы.

Программа ТГРК (теплогидравлический расчет канала) реализует аналитическое решение задачи определения стационарного температурного поля и тепловых потоков в тепловыделяющей сборке (кассете), состоящей из произвольного количества цилиндрических твэлов (труб)  $M$ , охлаждаемых водяным теплоносителем (рис. 1).

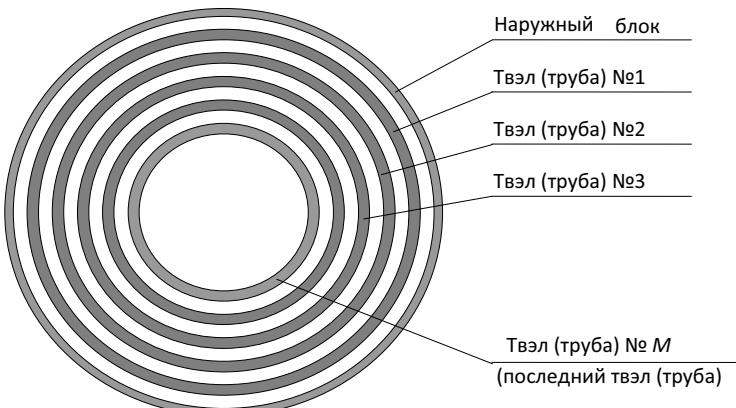


Рис. 1. Схема канала

На всех внешних границах твэлов (труб), кроме внутренней границы последнего твэла, задаются условия третьего рода. На внутренней границе последнего твэла по выбору могут быть заданы условия третьего или второго рода, если внутренний радиус твэла не равен нулю. Если внутренний радиус равен нулю (твэл (труба) представляет собой сплошной цилиндр без центрального отверстия), то в центре последнего твэла программой ставится условие равенства нулю плотности теплового потока в радиальном направлении. Предусмотренный выбор граничных условий на внутренней границе последнего твэла позволяет проводить расчет стержневых многозонных цилиндрических твэлов.

В межкассетном пространстве может находиться либо вода, либо твердый замедлитель (наружный блок). Первый твэл (труба) может являться корпусом рабочего канала (нумерация твэлов (труб) ведется снаружи). В замедлителе (наружном блоке) может быть учтено наличие энерговыделения заданием значения плотности теплового потока с поверхности наружного блока в первый зазор.

Методика расчета температурного поля в твэле строится на предположении, что толщина твэла (или диаметр, если твэл сплошной) значительно меньше его длины. Твэл может состоять из произвольного числа зон  $N$ , для каждой из которых задаются размеры, коэффициент теплопроводности и удельное энерговыделение.

Рассмотрим многозонную цилиндрическую область (рис. 2)

На рисунке приняты обозначения:

$k$  – номер зоны;  $k = 1, \dots, N$ ;

$q_k = \text{const}$ ,  $\lambda_k = \text{const}$  – удельное энерговыделение и теплопроводность для  $k$ -ой зоны соответственно;

$b_{k-1}$ ,  $b_k$  – внутренний и наружный радиусы  $k$ -ой зоны соответственно;

$Qs_k \text{ вн}$ ,  $Qs_k \text{ нар}$  – плотность теплового потока на внутренней и внешней границах  $k$ -ой зоны соответственно;

$T_{k-1}$ ,  $T_k$  – температура на внутренней и внешней границах  $k$ -ой зоны соответственно.

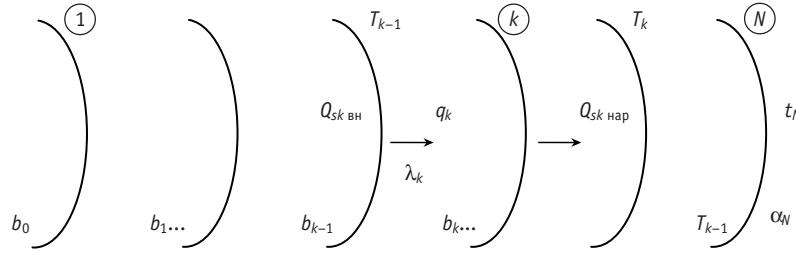


Рис. 2. Схема обозначений параметров сечения многозонного цилиндрического твэла

Наружная поверхность твэла охлаждается теплоносителем, температура которого  $t_N$ , коэффициент теплоотдачи  $\alpha_N$ .

Уравнение теплопроводности для  $k$ -ой зоны (обозначения общепринятые)

$$t''_k(r) + \frac{1}{r} t'_k(r) = -\frac{q_k}{\lambda_k}, \quad k=1\dots N \quad (1)$$

и его решение

$$t_k(r) = A_k \ln \frac{r}{b_k} + T_k + \frac{q_k}{4\lambda_k} (b_k^2 - r^2), \quad (2)$$

$$q_{sk}(r) = -\lambda_k t'_k(r) = \frac{q_k r}{2} - \lambda_k \frac{A_k}{r}. \quad (3)$$

Границочное условие на границах между зонами для плотности теплового потока.

$$q_{sk}(b_k) = Q_{sk, \text{нап}} = q_{sk+1}(b_k) = Q_{sk+1, \text{вн}}. \quad (4)$$

С учетом соотношения (3) из условия (4) имеем

$$\begin{aligned} \frac{q_k b_k}{2} - \frac{\lambda_k}{b_k} A_k &= \frac{q_{k+1} b_k}{2} - \frac{\lambda_{k+1}}{b_k} A_{k+1} \text{ или} \\ \lambda_{k+1} A_{k+1} - \lambda_k A_k &= \frac{q_{k+1} b_k^2}{2} - \frac{q_k b_k^2}{2} = \frac{b_k^2}{2} (q_{k+1} - q_k), \quad k=1\dots N-1. \end{aligned} \quad (5)$$

Из граничного условия для температуры

$$t_k(b_k) = t_{k+1}(b_k), \quad k=1\dots N-1$$

с учетом выражения (2) получим

$$T_k = A_{k+1} \ln \frac{b_k}{b_{k+1}} + T_{k+1} + \frac{q_{k+1}}{4\lambda_{k+1}} (b_{k+1}^2 - b_k^2), \quad k=1\dots N-1. \quad (6)$$

Просуммируем равенство (6) по  $k$  от 1 до  $N-1$  и после несложных преобразований получим

$$T_1 - T_N + \sum_{k=1}^{N-1} A_{k+1} \ln \frac{b_{k+1}}{b_k} = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^{N-1} \frac{q_{k+1}}{\lambda_{k+1}} (b_{k+1}^2 - b_k^2). \quad (7)$$

Запишем условие на внешней границе:

$$\begin{aligned} \alpha_N (T_N - t_N) &= Q_{sN, \text{нап}} = \frac{q_N b_N}{2} - \lambda_N \frac{A_N}{b_N} \text{ или} \\ T_N + \frac{\lambda_N}{b_N \alpha_N} A_N &= t_N + \frac{q_N b_N}{2 \alpha_N}. \end{aligned} \quad (8)$$

Рассмотрим граничные условия на внутренней границе при  $r = b_0$ .

**Случай А.** Граничные условия третьего рода.

$$\alpha_0 (T_0 - t_0) = -Q_{s1, \text{вн}} = -q_{s1}(b_0) = \frac{\lambda_1 A_1}{b_0} - \frac{q b_0}{2} \text{ или}$$

$$T_0 - \frac{\lambda_1 A_1}{b_0 \alpha_0} = t_0 - \frac{q_1 b_0}{2 \alpha_0}. \quad (9)$$

Поскольку  $T_0 = t_1(b_0)$ , то с учетом соотношения (2) из выражения (9) получим

$$T_1 - A_1 \left( \ln \frac{b_1}{b_0} + \frac{\lambda_1}{\alpha_0 b_0} \right) = t_0 - \frac{q_1 b_0}{2 \alpha_0} - \frac{q_1}{4 \lambda_1} (b_1^2 - b_0^2). \quad (10)$$

Сложим (7) и (8) и вычтем равенство (10):

$$\begin{aligned} A_1 \left( \ln \frac{b_1}{b_0} + \frac{\lambda_1}{\alpha_0 b_0} \right) + \sum_{k=2}^{N-1} A_k \ln \frac{b_k}{b_{k-1}} + A_N \left( \ln \frac{b_N}{b_{N-1}} + \frac{\lambda_N}{\alpha_N b_N} \right) = \\ = t_N - t_0 + \frac{q_N b_N}{2 \alpha_N} + \frac{q_1 b_0}{2 \alpha_0} + \frac{1}{4} \sum_{k=1}^N \frac{q_k}{\lambda_k} (b_k^2 - b_{k-1}^2). \end{aligned} \quad (11)$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \ln \frac{b_1}{b_0} + \frac{\lambda_1}{\alpha_0 b_0}; \quad \gamma_k = \ln \frac{b_k}{b_{k-1}}, \quad k = 2 \dots N-1; \quad \gamma_N = \ln \frac{b_N}{b_{N-1}} + \frac{\lambda_N}{\alpha_N b_N}; \\ p_1 &= \frac{q_1 b_0}{2 \alpha_0} + \frac{q_1}{4 \lambda_1} (b_1^2 - b_0^2) - t_0; \quad p_k = \frac{q_k}{4 \lambda_k} (b_k^2 - b_{k-1}^2), \quad k = 2 \dots N-1; \\ p_N &= \frac{q_N b_N}{2 \alpha_N} + \frac{q_N}{4 \lambda_N} (b_N^2 - b_{N-1}^2) + t_N. \end{aligned} \quad (12)$$

Соотношение (11) перепишем в виде

$$\sum_{k=1}^N \gamma_k A_k = \sum_{k=1}^N p_k. \quad (13)$$

Обратимся к граничным условиям (5) и просуммируем их по  $k$  от 1 до  $p-1$  ( $2 \leq p \leq N$ ):

$$\lambda_p A_p - \lambda_1 A_1 = \sum_{k=1}^{p-1} \frac{1}{2} b_k^2 (q_{k+1} - q_k), \quad p = 2 \dots N. \quad (14)$$

Представим выражение (14) в виде

$$A_k = \frac{\lambda_1}{\lambda_k} A_1 + \frac{1}{\lambda_k} \sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{2} b_i^2 (q_{i+1} - q_i), \quad k = 2 \dots N. \quad (15)$$

Умножим уравнение (15) на  $\gamma_k$  и просуммируем по  $k$  от 2 до  $N$

$$\sum_{k=2}^N \gamma_k A_k = A_1 \sum_{k=2}^N \gamma_k \frac{\lambda_1}{\lambda_k} + \sum_{k=2}^N \frac{\gamma_k}{\lambda_k} \sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{2} b_i^2 (q_{i+1} - q_i). \quad (16)$$

Подставим соотношение (16) в равенство (13) и найдем  $A_1$ :

$$A_1 = \left\{ \sum_{k=1}^N p_k - \sum_{k=2}^N \frac{\gamma_k}{\lambda_k} \sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{2} b_i^2 (q_{i+1} - q_i) \right\} / \sum_{k=1}^N \gamma_k \frac{\lambda_1}{\lambda_k}.$$

Алгоритм решения задачи следующий.

1. С помощью соотношений (5) или (15) находим  $A_k$ ,  $k = 2, \dots, N$ .
2. Определяем температуры внутренней и наружной поверхностей твэла с помощью соотношений (8) и (9). Если  $N \geq 2$ , то температуры на границах внутри твэла находятся с помощью соотношения (6).
3. Распределение температуры внутри зоны  $k$  определяется с помощью соотношения (2);

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

---

4. Находятся плотности потоков на внутренней и внешней границах твэла:

$$Q_{s1}^{\text{BH}} = -\alpha_0(T_0 - t_0) \text{ и } Q_{sN}^{\text{нап}} = \alpha_N(T_N - t_N).$$

Если  $N \geq 2$ , то плотности потоков на границах внутри твэла находятся с помощью соотношения  $Q_{sN}^{\text{нап}} = \frac{q_k b_k}{2} - \lambda_k \frac{A_k}{b_k}, k = 1, \dots, N-1$ .

5. Распределение плотности потока внутри зоны  $k$  находится с помощью соотношения (3).

**Случай Б.** Рассмотрим граничное условие при  $r = b_0$ , когда  $b_0 = 0$  и  $Q_{s1}^{\text{BH}} = 0$ .

Из соотношения (3) следует, что  $A_1 = 0$ , тогда из формулы (15)

$$A_k = \frac{1}{\lambda_k} \sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{2} b_i^2 (q_{i+1} - q_i), \quad k = 2 \dots N.$$

Алгоритм дальнейшего решения следующий.

1. Температура наружной поверхности твэла находится с помощью соотношения (8). На внутренней и на границах внутри твэла – с помощью (7):

$$T_{k-1} = \begin{cases} A_k \ln \frac{b_{k-1}}{b_k} + T_k + \frac{q_k}{4\lambda_k} (b_k^2 - b_{k-1}^2), & k = 2, \dots, N \\ T_1 + \frac{q_1}{4\lambda_1} b_1^2, & \text{где } k = 1. \end{cases}$$

2. Распределение температуры внутри зон определяется с помощью соотношения (2):

$$t_k(r) = \begin{cases} A_k \ln \frac{r}{b_k} + T_k + \frac{q_k}{4\lambda_k} (b_k^2 - r^2), & k = 2, \dots, N \\ T_1 + \frac{q_1}{4\lambda_1} (b_1^2 - r^2), & \text{где } k = 1. \end{cases}$$

3. Плотность теплового потока на границах находится из соотношения (3):

$$Q_{sk}^{\text{нап}} = \frac{q_k b_k}{2} - \lambda_k \frac{A_k}{b_k}, \quad k = 2, \dots, N;$$

$$\text{для } k = 1 \quad Q_{s1}^{\text{BH}} = \begin{cases} \frac{q_1 b_0}{2} - \lambda_1 \frac{A_1}{b_0}, & \text{если } A_1 \neq 0 \\ \frac{q_1 b_0}{2}, & \text{если } A_1 = 0. \end{cases}$$

4. Распределение плотности теплового потока

$$q_{sk}(r) = \frac{q_k r}{2} - \lambda_k \frac{A_k}{r}, \quad k = 2, \dots, N;$$

$$\text{для } k = 1 \quad q_{s1}(r) = \begin{cases} \frac{q_1 r}{2} - \lambda_1 \frac{A_1}{r}, & \text{если } A_1 \neq 0 \\ \frac{qr}{2}, & \text{если } A_1 = 0. \end{cases}$$

**Случай В.** Рассмотрим граничное условие при  $r = b_0 \neq 0$  второго рода  $Q_{s1}^{\text{вн}} = Q_{s0}$ . Из соотношения (3) для  $r = b_0$  следует

$$A_1 = \frac{q_1 b_0^2}{2\lambda_1} - \frac{Q_{s0} b_0}{\lambda_1},$$

и в соответствии с выражением (15)

$$A_k = \frac{\lambda_1}{\lambda_k} A_1 + \frac{1}{\lambda_k} \sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{2} b_i^2 (q_{i+1} - q_i).$$

Путь решения такой же, как для случая Б.

Алгоритм расчета строится на последовательном аналитическом определении температурного поля и плотности теплового потока в каждом сечении канала по высоте и последующем расчете подогрева теплоносителя на следующем шаге по высоте (см. рис. 3).

В каждой расчетной точке на поверхности твэлов проводится расчет температуры начала кипения теплоносителя по двум корреляциям.

Формула Берглиса-Розенау предназначена для воды с растворенным в ней воздухом и воздухом с насыщенным паром, которая характеризует температуру наружной поверхности твэла к моменту образования на ней первых пузырей [1]:

$$T_b = T_s + 0,555 \cdot \left[ \frac{Q}{1,053 \cdot P^{1,156}} \right]^{\frac{0,0234}{2,17}},$$

где  $Q$  – плотность теплового потока, кВт/м<sup>2</sup>;  $P$  – давление, бар;  $T_s$  – температура насыщения теплоносителя, °C:

$$T_s = 99,278 + 0,09617 \cdot P + 27,7567 \cdot \ln(P) + 2,5346 \cdot \ln^2(P) + 0,2065 \cdot \ln^3(P).$$

Формула Форстера-Грейфа дает менее консервативную оценку температуры поверхности твэла к моменту стабилизации поверхностного паровыделения [2]:

$$T_b = T_s + 2,041 \cdot Q^{0,35} \cdot P^{-0,23}$$

Коэффициент запаса до начала поверхностного кипения теплоносителя определяется по зависимости

$$K = \frac{(T_b - T_w)}{(T_{cl} - T_w)},$$

где  $T_w$  – температура теплоносителя, °C;  $T_{cl}$  – температура наружной стенки твэла, °C.

Критическое значение плотности теплового потока определяется по консервативной корреляции Миршака [3]:

$$Q_{cr} = 1510 \cdot (1 + 0,1198 \cdot W) \cdot (1 + 0,00914 \cdot \Delta T_{out}) \cdot (1 + 0,19 \cdot P),$$

где  $Q_{cr}$  – критическая плотность теплового потока, кВт/м<sup>2</sup>;  $W$  – скорость теплоносителя, м/с;  $\Delta T_{out}$  – недогрев теплоносителя до температуры насыщения на выходе из зазора, °C;  $P$  – давление, бар.

Запас до кризиса теплообмена рассчитывается по формуле

$$K_{kp} = \frac{Q_{cr}}{Q_{cl}},$$

где  $Q_{cl}$  – плотность теплового потока с поверхности твэла, кВт/м<sup>2</sup>.

Формулы для определения гидравлических параметров и критериальных зависимостей общеприняты и взяты из [4, 5].

Рассмотренный алгоритм был реализован в программе ТГРК, написанной на языке Fortran. При расчете система по высоте разбивается на равные интервалы, количество которых задается пользователем.

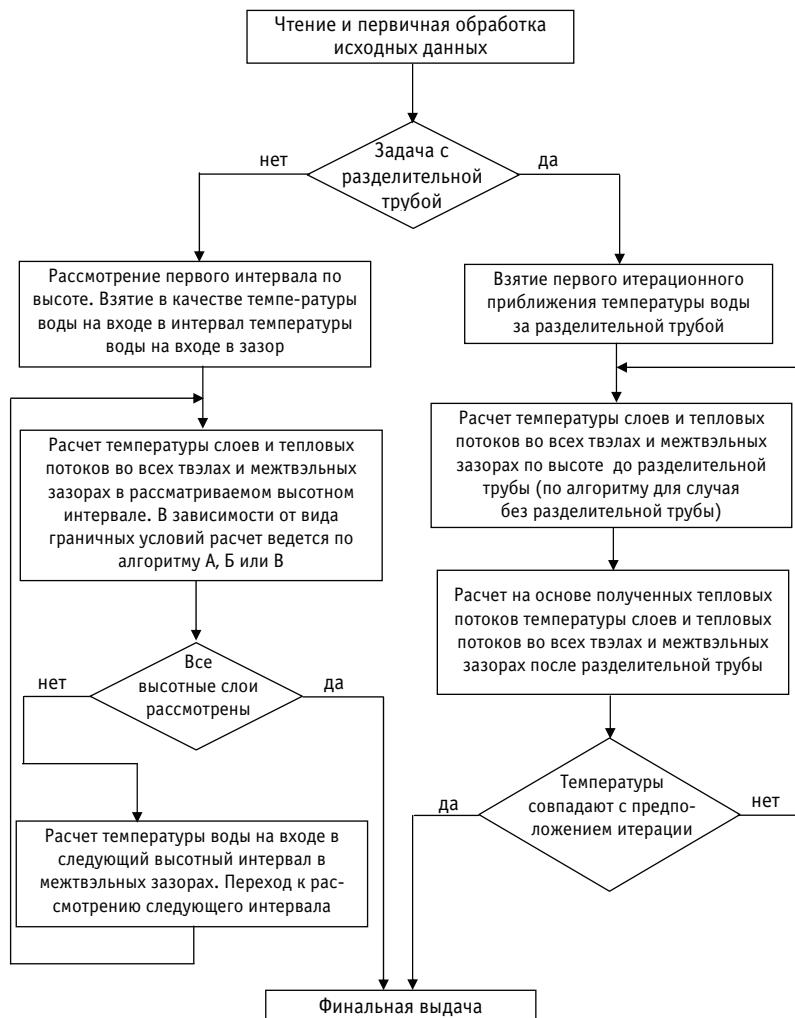


Рис. 3. Блок-схема работы программы ТГРК

В программе предусмотрены две схемы циркуляции теплоносителя:

- прямоточная, когда теплоноситель, омывающий твэл, циркулирует во всех зазорах в одном направлении и имеет одинаковую входную температуру;
- Фильда, когда в одном направлении теплоноситель циркулирует только в части наружных зазоров с одной входной температурой, а во внутренних зазорах движется в противоположном направлении с другой входной температурой. В этом случае задается местоположение твэла (трубы) – разделителя потока.

Необходимо отметить, что если первая труба является корпусом канала (а не твэлом), то входная температура теплоносителя в первом зазоре задается отдельно и может отличаться от таковой для остальных зазоров. Таким образом, в программе предусмотрено, что охлаждение кладки замедлителя в отличие от твэлов может осуществляться водой другого контура.

В задаче без разделительной трубы сначала рассчитываются тепловые потоки с поверхности твэлов в первом интервале (вход теплоносителя в кассету), на их основе находится температура воды и из нее – тепловые потоки во втором высотном интервале и так далее.

Таблица 1

**Исходные данные для расчета**

№/п	Параметр	Значение
1	Мощность ТВС, Мвт	3,2
2	Массовая скорость теплоносителя, кг/(м <sup>2</sup> с)	7636,3
3	Температура на входе, °C	40
4	Толщина, мм - сердечника - оболочки - твэла - зазора	0,94 0,53 2,0 2,5
5	Теплопроводность, Вт/(м град.) - сердечника - оболочки	91,2 170

Задача с разделительной трубой решается методом последовательных итераций. Задается начальное распределение температуры теплоносителя по высоте за разделительной трубой (начальная итерация). На его основе вычисляются тепловые потоки с поверхности твэлов до разделительной трубы и температура воды на повороте разделительной трубы. Используя температуру воды на развороте как новую температуру на входе твэлов, вычисляются тепловые потоки и распределение температуры воды по высоте в зазорах между твэлами. Сравнивается полученное новое распределение температуры теплоносителя по высоте с предполагаемым распределением в начале шага итерации. Если отклонение не превышает заданного значения погрешности, то полученные значения объявляются конечным решением, иначе итерация продолжается, пока не будет достигнуто согласие.

Исходные данные для программы задаются в текстовом виде в файле исходных данных, позволяющем расчитывать произвольное количество твэлов. В каждом твэле задается количество слоев материала с различной теплопроводностью и тепловыделением в объеме. Еще в файле задаются входная температура и скорость теплоносителя в зазорах между твэлами, граничные условия на поверхности наружной стенки системы и внутренней стенке последнего твэла (трубы), а также наличие и положение (если есть) разделительной трубы, после которой направление движения теплоносителя меняется на противоположное.

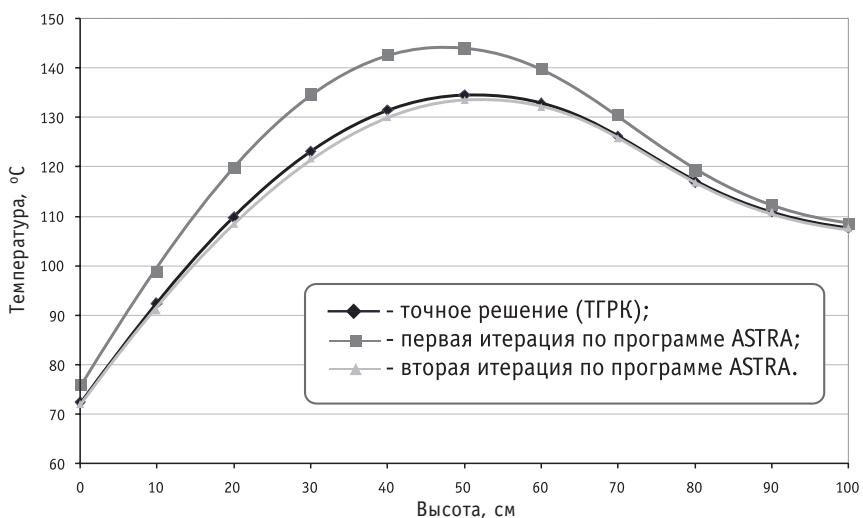


Рис. 4. Распределение максимальной температуры сердечника по высоте твэла

Таблица 2

**Сравнительные характеристики программ ТГРК и ASTRA**

Nº/п	Характеристика	ТГРК	ASTRA
1	Способ решения системы уравнений теплопроводности	Аналитический	Итерационный
2	Число физических зон в твэле	Произвольное	2 (сердечник, оболочка)
3	Число расчетных зон в твэле	Произвольное	3 (сердечник, две оболочки)
4	Максимальное число твэлов	Произвольное	Произвольное (необходимо изменять текст программы)
5	Возможность расчета многозонного стержневого твэла	есть	нет
6	Расчет температуры начала поверхностного кипения и запаса до начала кипения	есть	нет
7	Расчет критической плотности теплового потока и запас до кризиса теплообмена	есть	нет

В качестве аналога программы для сравнения выбран код ASTRA [5], который реализует итерационный метод при расчете тепловыделяющей сборки с трехслойными цилиндрическими твэлами и сходной схемы циркуляции теплоносителя.

В таблице 1 представлены исходные данные, а на рис. 4 – сравнительные результаты расчета шеститрубной тепловыделяющей сборки реактора МИР.М1.

Из представленных данных следует, что при задании погрешности итерационного решения в программе ASTRA меньше 0,05°C результаты расчета по двум программам совпадают. В таблице 2 приведены сравнительные потребительские характеристики программ, которые показывают определенные достоинства программы ТГРК: неограниченное число физических зон дает возможность рассчитывать многослойные твэлы и мишени, учитывать при расчете наличие диффузионного слоя между сердечником и оболочкой, окисной пленки, отложений на поверхности твэлов и т.д., выделяя их в отдельные расчетные зоны, а также проводить расчет стержневых твэлов.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предложена методика и получено аналитическое решение системы уравнений теплопроводности для многозонного кольцевого твэла. Методика реализована в виде программы ТГРК. Программа написанная на языке ФОРТРАН, позволяет рассчитывать поле температур в многозонном цилиндрическом твэле и сборке, состоящей из концентрических многозонных цилиндрических твэлов. Предусмотрены две схемы циркуляции теплоносителя в ТВС: прямоточная и схема Фильда. Проводятся оценки запасов до начала поверхностного кипения и кризиса теплообмена.

**Литература**

1. Bergles A.E., Rohsenow W.M. The determination of forced convection surface boiling heat transfer. Transacnions ASME 86//Journal of Heat Transfer. Series C. – 1964. – P. 365-371.
2. Fabrega S. Le calcul thermique des reacteurs de recherchй refroidis par eau/Rapport CEA-R-4114, 1971.
3. Mirshak S., Durant W.D., Towell R.H. Heat Flux at Burnout. DuPont, DP-335, February, 1959.
4. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. – М.: Атомиздат, 1974. – 396 с.
5. Емельянов М.К., Талиев А.В. Программа ASTRA для расчета теплового режима ТВС с трубчатыми коаксиальными твэлами/Препринт ИАЭ-4114/4. – М., 1985. – 17 с.

Поступила в редакцию 16.08.2012

# СВЕРХНЕЯВНАЯ СХЕМА НЕПОЛНОЙ ФАКТОРИЗАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО ТИПА

Н.М. Троянова\*, В.П. Гинкин\*\*

\*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

\*\*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Предложена сверхнеявная схема метода неполной факторизации (МНФ) для решения систем линейных разностных алгебраических уравнений, аппроксимирующих уравнения переноса нейтронов в многогрупповом диффузационном приближении, и вариант комбинированной схемы МНФ, в котором на четных итерациях используется периферийная компенсация итерируемых членов, а на нечетных она отсутствует. На численных примерах показана высокая эффективность разработанных схем МНФ. Исследованные схемы реализованы в программах-решателях и использованы в практических задачах нейтронной кинетики – в комплексе программ пространственно-временного расчета реакторов на быстрых нейтронах GVA [1, 2] и в комплексе программ расчета кампаний реакторов ВВЭР-1000 WIMS-ВОЛНА [3, 4].

**Ключевые слова:** нейтронная кинетика, итерационные методы, метод неполной факторизации, система линейных уравнений, комплексы программ.

**Key words:** neutron kinetics, iteration methods, incomplete factorization method, systems of linear algebraic equations, program codes

## ВВЕДЕНИЕ

Системы линейных разностных уравнений, аппроксимирующих уравнение эллиптического типа, обычно записываются и решаются в сеточном виде. Номер узла разностной сетки в таком случае однозначно определяется набором значений индексов, определяющих номера линий сетки по каждой из координат. Но это не всегда удобно. Используются и другие способы нумерации узлов разностной сетки, например, такой, когда узлы нумеруются по спирали, начиная от одного узла в центре области. Можно предположить, что нумерация узлов сетки произвольна. В этом случае необходимо введение нового инструмента для описания как самих систем сеточных уравнений, так и методов решения этих систем. В данной работе предложен именно такой новый формализм для описания исходных систем сеточных уравнений и различных итерационных схем метода неполной факторизации для их решения. Для этого вводится понятие матриц связности, устанавливающих однозначное соответствие номеру каждого узла разностной сетки номера узлов-соседей.

© Н.М. Троянова, В.П. Гинкин, 2013

В работе предложены и численно исследованы новые сверхнеявная схема метода неполной факторизации для решения девятиточечных систем разностных уравнений, основанная на использовании так называемой периферийной компенсации итерируемых членов, и новая комбинированная схема, в которой периферийная компенсация применяется не на каждой итерации, а через одну. Идея такой комбинированной схемы заключается в том, чтобы на одной итерации добиться эффективного сглаживания исходной функции ошибки, а на следующей итерации с использованием периферийной компенсации итерируемых членов добиться эффективного подавления гладкой составляющей функции ошибки.

Предложенный метод был использован в качестве решателя в комплексе программ GVA, написанном для расчета пространственной динамики реакторов на быстрых нейтронах [1, 2] и в комплексе программ WIMS-ВОЛНА, написанном для расчета кампаний реакторов ВВЭР-1000 [3, 4].

### **ОПИСАНИЕ МЕТОДА НЕПОЛНОЙ ФАКТОРИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЦ СВЯЗНОСТИ**

Пусть требуется решить уравнение диффузии в некоторой области с заданными граничными условиями на ее границе. Для определенности рассмотрим уравнение переноса нейтронов в многогрупповом диффузионном приближении в (*hex-z*)-геометрии.

$$-\nabla D^{(g)} \nabla \varphi^{(g)} + \Sigma_{yb}^{(g)} \varphi^{(g)} - \sum_{l=1}^{g-1} \Sigma^{(l \rightarrow g)} \varphi^{(l)} = \chi^{(g)} Q,$$

где  $g$  – номер группы нейтронов; остальные обозначения общеприняты.

Введем разностную сетку и перенумеруем узлы в произвольном порядке. Используя девятиточечный разностный шаблон, построим разностный аналог исходного уравнения. Чтобы определить номера узлов соседей для центрального узла шаблона, введем понятие матрицы связности  $MS(j, i)$ , элементы которой для каждого расчетного узла  $i$ ,  $i = 1, \dots, N_0$ , определяют  $J_0$  номеров узлов-соседей, соответствующих остальным узлам шаблона,  $j = 1, \dots, J_0$ . При этом трехмерной (*hex-z*)-геометрии соответствует девятиточечный шаблон с  $J_0 = 9$ ,  $j = 9$  – центральный узел,  $j = 1, \dots, 6$  – узлы гексагональной решетки в сечении  $z$ ,  $j = 7, 8$  соответствуют предыдущему ( $j = 7$ ) и последующему ( $j = 8$ ) сечению по координате  $z$ .

Исходное разностное уравнение в (*hex-z*)-геометрии при использовании введенного формализма примет вид

$$A\varphi = a^9 \varphi - \sum_{j=1}^8 a^j \varphi_{MS(j)} = f.$$

Для решения этого уравнения используем итерационный метод неполной факторизации (МНФ):

$$(DA + B)\varphi^m = Df + B\varphi^{m-1}, m = 1, 2, \dots$$

с такими операторами  $D$  и  $B$ , чтобы  $(DA + B)$  мог быть легко факторизован:

$$(DA + B) = MN.$$

Обозначив  $N\varphi = \psi$ , запишем МНФ в виде системы двух уравнений, которая решается методом последовательных приближений с итерируемым оператором  $B$ :

$$M\psi = Df + B\varphi^{m-1},$$

$$N\varphi^m = \psi.$$

## СВЕРХНЕЯВНАЯ СХЕМА НЕПОЛНОЙ ФАКТОРИЗАЦИИ

Вариант метода неполной факторизации определяется конкретным видом операторов  $M$ ,  $N$  и  $D$ . Выберем оператор  $D$  диагональным, а  $M$  и  $N$  – двухточечным и восьмиточечным соответственно:

$$\begin{aligned} D &= \text{diag}(\gamma), \\ M\psi &= \psi - \alpha^7 \psi_{MS(7)}, \\ N\varphi &= \varphi - \sum_{j=1, j \neq 7}^8 \alpha^j \varphi_{MS(j)}. \end{aligned}$$

Полученная схема является не просто неявной, а сверхнеявной, так как для решения последнего уравнения, определенного на восьмиточечном шаблоне, нельзя применить прямой экономичный метод с использованием только простых неявных схем типа одномерных прогонок, приходится применять итерационный метод. Мы используем для этих целей схему неполной факторизации Шнайдера-Зедана [5], в которой с целью ускорения сходимости введена периферийная компенсация итерируемых членов по типу  $h$ -факторизации [6] с итерационным параметром компенсации, меняющимся от нуля до 1.

В оператор  $B$  входят дополнительные по отношению к исходному шаблону узлы с номерами  $MS(7)$ ,  $MS(j)$ ,  $j = 1, \dots, 6$ , появившиеся при факторизации трехмерных уравнений от перемножения операторов  $M$  и  $N$ . Эти узлы образуют дополнительный шаблон по отношению к исходному разностному шаблону.

Вклад в оператор  $B$  дополнительных узлов можно компенсировать комбинацией членов, взятых в узлах основного шаблона. Пусть  $B = R + S$ , оператор  $R$  определен на дополнительном шаблоне  $R\varphi = \alpha^7 \sum_{j=1}^6 \alpha^j \varphi_{MS(7)} \Phi_{MS(7, MS(j))}$ ,  $S$  – компенсирующий

оператор  $S\varphi = \alpha^7 \sum_{j=1}^6 \alpha^j \varphi_{MS(7)} \sum_{\mu=1}^9 \Theta_j^\mu k_j^\mu \varphi_{MS(\mu)}$ , где  $\Theta_j^\mu$  и  $k_j^\mu$  – параметры и матрица коэффициентов компенсации. Положим  $\Theta_j^\mu = \text{const} = \theta$  и определим компенсирующий оператор  $S$  по типу  $h$ -факторизации:

$$B\varphi = \alpha^7 \sum_{j=1}^6 \alpha^j \varphi_{MS(7)} \left[ \varphi_{MS(7, MS(j))} + \theta (\varphi - \varphi_{MS(7)} - \varphi_{MS(j)}) \right].$$

## МОДИФИЦИРОВАННАЯ СХЕМА ШНАЙДЕРА-ЗЕДАНА

Как уже отмечалось выше, в сверхнеявной схеме двухточечный оператор  $M$  обращается простым пересчетом в сторону возрастания координаты  $z$ ; обращение же оператора  $N$  ведется в сторону уменьшения координаты  $z$ , причем для каждого фиксированного  $z$  необходимо обратить двумерный семиточечный оператор вида

$$A'\varphi' = \varphi' - \sum_{j=1}^6 \alpha^j \varphi'_{MS(j)} = f$$

размерностью  $M_0$ , где  $M_0$  – количество узлов в hex-плоскости.

Для этого выбрана и модифицирована введением параметрической периферийной компенсации по типу  $h$ -факторизации схема Шнайдера-Зедана.

Схема метода неполной факторизации для этого случая выглядит так:

$$D' = \text{diag}(\gamma'),$$

$$M'u = u - \sum_{j=1,3,5} \beta^j u_{MS(7)} = \gamma' f' + B' \varphi^{n-1}, n = 1, 2, \dots$$

$$N' \varphi^n = \varphi - \sum_{j=2,4,6} \beta^j \varphi_{MS(7)} = u,$$

где  $n$  – номер текущей итерации;  $\beta^j$  с нечетными  $j$  – коэффициенты оператора  $M'$ , с четными  $j$  – коэффициенты оператора  $N'$ , причем  $M'$  и  $N'$  имеют единичные диагонали. Оператор  $B'$  будет содержать элементы в дополнительных узлах  $MS(1)$ ,  $MS(4)$  и  $MS(5, MS(2))$ , вклад которых можно компенсировать комбинацией членов, взятых в узлах основного шаблона. Выберем

$$M' = (R_1 + S_1) + (R_2 + S_2),$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – операторы, определяющие итерируемые члены  $R_1 \varphi = \beta^1 \beta_{MS(1)}^4 \varphi_{MS(1, MS(4))}$  и  $R_2 \varphi = \beta^5 \beta_{MS(5)}^2 \varphi_{MS(5, MS(2))}$ ; а  $S_1$  и  $S_2$  – компенсирующие операторы, определенные в узлах основного шаблона:

$$S_i \varphi = a_i \sum_{\mu=1}^9 \eta_i^\mu k_i^\mu \varphi_{MS(\mu)},$$

$\eta_i^\mu$  и  $k_i^\mu$  – параметры и матрица коэффициентов компенсации.

Компенсирующие операторы выбираются по типу  $h$ -факторизации, и оператор  $B'$  имеет вид

$$B' \varphi = \beta^1 \beta_{MS(1)}^4 \left[ \varphi_{MS(1, MS(4))} + \eta_1 (\varphi - \varphi_{MS(1)} - \varphi_{MS(4)}) \right] +$$

$$+ \beta^5 \beta_{MS(5)}^2 \left[ \varphi_{MS(2, MS(5))} + \eta_2 (\varphi - \varphi_{MS(2)} - \varphi_{MS(5)}) \right].$$

Определив по рекуррентным формулам коэффициенты  $\beta^j$ , при  $\eta_1 = \eta_2 = 0$  получаем схему Шнайдера-Зедана без компенсации, при  $\eta_1 = \eta_2 = 1$  – получаем модифицированную схему Шнайдера-Зедана с периферийной компенсацией по типу  $h$ -факторизации, в которой первые члены разложения  $B\varphi$  в ряд Тейлора в центральном узле шаблона равны нулю.

Кроме исследования сверхнеявной схемы МНФ с постоянным параметром компенсации  $\theta$  сформулирован и исследован комбинированный МНФ, в котором значение параметра компенсации  $\theta^m$  зависит от  $m$  – номера итерации.

Алгоритмы выбора параметра компенсации  $\theta^m$  могут быть различными, например, простое чередование, циклический перебор и другие. Достаточно эффективной и экономной по памяти с точки зрения необходимости пересчета и (или) хранения коэффициентов операторов  $M$  и  $N$  для каждого  $\theta^m$  оказалась комбинированная схема, получившая название схемы МНФ с мерцающим параметром (МНФ-МП), в которой для каждой нечетной итерации используется параметр компенсации, равный нулю, а для каждой четной итерации – единице.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изложенный метод неполной факторизации был испытан на модельных неоднородных задачах Дирихле и Неймана с правой частью  $f = 1$ , точное решение которых равно единице во всей расчетной области, и начальном приближении (НП) двух типов – гладкой начальной функцией (ГНП)

$$\varphi_0^\Gamma = \cos(\pi i / N_1) \cdot \cos(\pi l / N_2) \cdot \cos(\pi k / N_3)$$

и негладкой начальной функцией (ННП)

$$\varphi_0^H = (-1)^{i+l+k} \cdot 200 \cdot \cos(\pi i / N_1) \cdot \cos(\pi l / N_2) \cdot \cos(\pi k / N_3) + \varphi_{AB},$$

где ступенчатая функция равна пяти в первой половине ( $i = 1, \dots, N_0/2$ ) и 300 во второй половине ( $i = N_0/2+1, \dots, N_0$ ) расчетной области с  $N_0 = N_1 \cdot N_2 \cdot N_3$  узлами;  $M_0 = N_1 \cdot N_2$  – количество узлов в каждой из  $N_3$  плоскостей по  $z$ .

Коэффициенты разностных аналогов операторов  $A$  для модельных задач имеют вид

$$a^j = 1, j = 1, \dots, J_0, a^9 = \sum_{j=1}^8 a^j + \sigma,$$

где  $\sigma$  – величина диагонального преобладания для внутренних узлов расчетной области. Для задачи Дирихле  $\sigma = 0$ , для задачи Неймана  $\sigma = \text{const} \neq 0$ .

Описание типов модельных задач приведено в табл. 1.

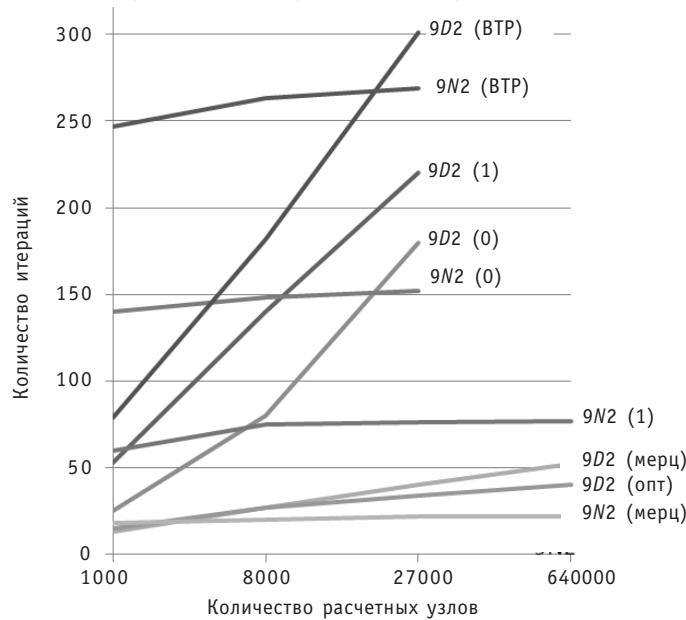
Таблица 1

**Типы модельных задач**

Геометрия	$(\text{hex-z}), J_0 = 9$	
Тип задачи	Задача Дирихле	Задача Неймана
Вид НП		
ГНП	9D1	9N1
ННП	9D2	9N2

Решение модельных задач для установления сходимости и исследования скорости сходимости итерационных процессов с разными параметрами компенсации  $\theta$ ,  $\eta_1$  и  $\eta_2$  сравнивалось по количеству итераций и затратам процессорного времени с решением методом верхней точечной релаксации (ВТР) с экспериментально подбираемым и близким к оптимальному итерационным параметром [7].

Внутренний итерационный процесс по модифицированному методу Шнайдера-Зедана считался законченным, если абсолютная величина максимума по всем  $M_0$  узлам локальной относительной погрешности становилась меньше заданной  $\varepsilon_1 = 10^{-6}$ ; внешний итерационный процесс в сверхнеявной схеме МНФ контроли-

Рис. 1. Зависимость количества итераций  $K_{\text{ит}}$  от числа расчетных узлов

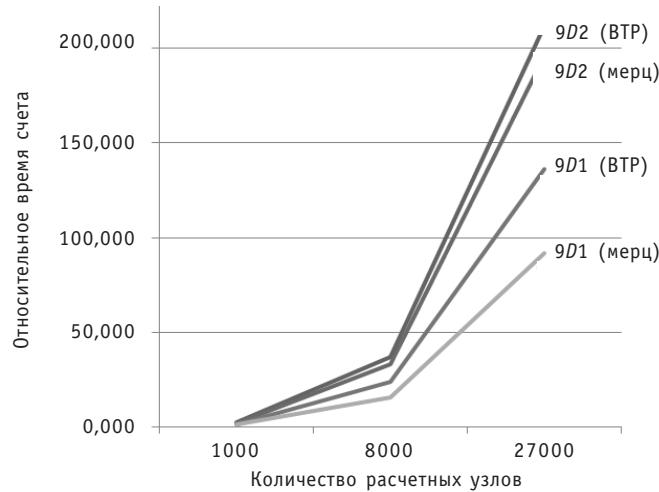


Рис. 2. Зависимость относительного времени решения задачи Дирихле от числа расчетных узлов

ровался максимумом  $\varepsilon_{\max}$  по всем  $N_0$  узлам абсолютного отклонения  $m$ -ого приближения от точного решения, равного единице, и заканчивался при условии  $\varepsilon_{\max} \leq \varepsilon \leq 10^{-3}$ .

На рисунке 1 показаны зависимости количества итераций  $K_{\text{ит}}$  от числа расчетных узлов для достижения точности  $10^{-3}$  при решении задач 9D2 и 9N2 с  $\sigma = 0,05$  тремя методами МНФ: при  $\theta = 0$ ,  $\theta = 1$  и МНФ-МП с мерцающим параметром.

Здесь же приведена зависимость числа итераций от  $N_0$  для задачи Дирихле при оптимальном экспериментально подобранным параметре  $\theta$ . Оказалось, что она близка к зависимости  $K_{\text{ит}}$  от  $N_0$  для МНФ-МП. Видно, что количество итераций  $K_{\text{ит}}$  в зависимости от  $N_0$  изменяется по закону, близкому к линейному, в задаче 9D2 и слабо зависит от  $N_0$  в задаче 9N2. Очевидна эффективность МНФ-МП по сравнению как с МНФ с параметром компенсации, равным как нулю, так и единице, вне зависимости от типа граничных условий и дифференциальной задачи.

На рисунках 2 и 3 приведено относительное время, затраченное на решение разных тестовых задач (нормировка выполнена на наименьшее время, полученное в задачах 9D1 и 9N1 соответственно), а на рис. 4 – относительное время, зат-

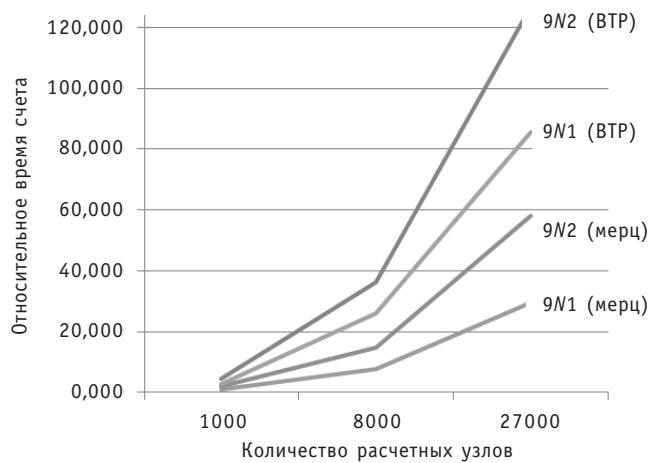


Рис. 3. Зависимость относительного времени решения задачи Неймана (диагональное преобладание равно 0,05) от числа расчетных узлов

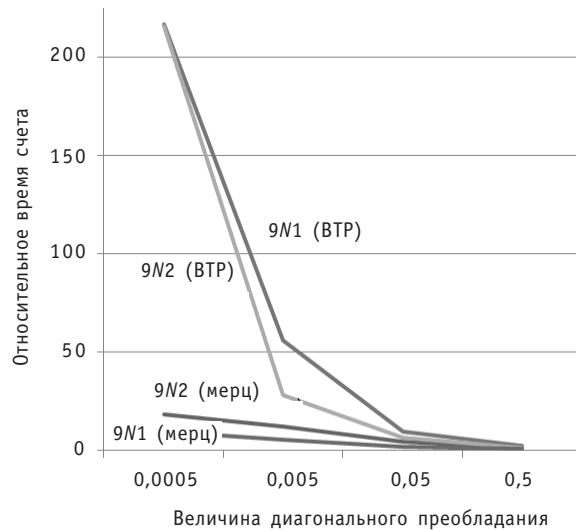


Рис. 4. Зависимость относительного времени решения задачи Неймана (количество расчетных узлов – 1000) методом верхней точечной релаксации и методом неполной факторизации с мерцающим параметром от величины диагонального преобладания

раченное на решение задачи Неймана с разным диагональным преобладанием (нормировка выполнена на наименьшее время, полученное в задаче 9N1). На этих рисунках буквами ВТР обозначен метод верхней точечной релаксации с оптимальным итерационным параметром.

Результаты численных исследований позволяют сделать вывод о том, что наиболее высокой скоростью сходимости из исследованных схем обладает схема с мерцающим параметром МНФ-МП. Эффект от чередования значений параметра компенсации (0 и 1) на каждой итерации оказался весьма высоким (зависимость числа итераций от числа узлов в схеме МНФ-МП при решении тестовых задач оказалась близкой к зависимости при оптимальном экспериментально подобранным параметре  $\theta$ ) и объясняется тем, что при параметре, равном нулю, эффективно гасятся высокочастотные, а единице – гладкие компоненты ошибки. Хотя эта схема требует расчета и хранения двух наборов коэффициентов в отличие от схемы МНФ с постоянным параметром компенсации  $q$ , этот перерасход памяти и времени оправдывается увеличением скорости сходимости итерационного процесса и снижением общих временных затрат на решение задачи. Аналогичный эффект усиления сходимости наблюдался в двумерной комбинированной схеме HFPP [6, 8]. Предложенный алгоритм чередования значений параметра не требует подбора оптимального значения параметра компенсации и особенно эффективен при решении плохоусловленных задач.

### **Литература**

1. Гинкин В.П., Ваньков К.А., Троянова Н.М. ВОЛНА – программа трехмерного нестационарного расчета реактора в квазистатическом групповом приближении/Препринт ФЭИ-2360. – Обнинск, 1994.
2. Безбородов А.А., Волков А.В., Ганина С.М., Гинкин В.П., Кузнецов И.А., Троянова Н.М., Швецов Ю.Е. Программа совместного решения уравнения пространственно-временного переноса нейтронов и теплогидравлических нестационарных и аварийных процессов в быстрых реакторах/Препринт ФЭИ-2637. – Обнинск, 1997.
3. Гинкин В.П., Троянова Н.М. Использование метода неполной факторизации в трехмерной задаче нейтронно-физического расчета реакторов типа ВВЭР/Препринт ФЭИ-2104. – Обнинск, 1990. – 15 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

4. *Troyanov V.M., Likhachev Y.I., Polomeev V.I., Demishonkov A.A., Troyanova N.M., Tutnov Al.A, Tutnov An.A, Kiselev A.S., Kiselev Al.S, Alekseev E.E., Ivanova O.I., Ulyanov A.I.* Numerical and analytical investigation of WWER-1000 fuel assembly and reactor core thermal mechanics// Proceedings of a technical meeting held in Cadarache, France, 22- 26 November 2004, IAEA-TECDOC-1454, 2005. – Р. 113-128.
5. *Schneider G.E., Zedan M.* A modified strongly implicit procedure for the numerical solution of field problems//Numerical Heat Transfer. – 1981. – Vol. 4. – P.1-19.
6. Гинкин В.П. Метод h-факторизации для решения двумерных уравнений эллиптического типа/ Доклад на IV Всесоюзном совещании по вычислительным методам линейной алгебры / Вычислительные методы линейной алгебры. – Новосибирск: ВЦ СОАН СССР, 1977. – С.123-132
7. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. – М.: Наука, 1978.
8. Гинкин В.П. Метод параболических прогонок для решения двумерных уравнений эллиптического типа/Препринт ФЭИ-1153. – Обнинск, 1981. – 13 с.

Поступила в редакцию 25.12.2012

# О ПРЕОБРАЗОВАНИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В ЭНЕРГИЮ НАПРАВЛЕННОГО ПОТОКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЯДЕРНО-ФОТОННОМ ДВИЖИТЕЛЕ

**А.В. Гулевич, О.Ф. Кухарчук, Н.И. Логинов, А.С. Михеев**  
ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского



Обсуждаются вопросы прямого преобразования тепловой энергии реактора ядерно-фотонного движителя в энергию направленного потока светового излучения. Рассмотрены возможные схемы такого конвертора, различающиеся геометрической формой излучателя и отражателя, и выполнен сравнительный расчетный анализ эффективности этих схем.

**Ключевые слова:** прямое преобразование энергии, ядерно-фотонный двигатель, излучатели тепловой энергии

**Key words:** direct conversion of energy, nuclear-photon engine, irradiators of thermal energy.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема исследования дальнего космоса связана прежде всего с созданием двигателя, обладающего очень высоким импульсом. В работах [1, 2] показана возможность и перспективность создания для указанной цели фотонного двигателя (ФД) малой тяги с ядерной энергетической установкой (ЯЭУ). В такой энергодвигательной установке тепловое излучение ЯЭУ, преобразованное в параллельный поток фотонов создает необходимую тягу.

Проблема создания ФД с ЯЭУ может быть разбита на две относительно самостоятельные задачи.

1. Создание высокотемпературной ЯЭУ с ресурсом работы в десятки лет, обладающей необходимыми массо-габаритными и энергетическими параметрами.

2. Создание системы передачи высокотемпературного ( $\sim 2000\text{--}3000^\circ\text{C}$ ) тепла от ЯЭУ к излучателю и преобразование теплового излучения в направленный поток фотонов.

Задачи рассмотрены на концептуальном уровне в [3], где показана реальность достаточно дальних полётов с помощью ядерных фотонных ракет уже при нынешнем уровне развития ядерной энергетики.

Одним из основных параметров, определяющих возможности таких полётов, является эффективность преобразования тепловой энергии ядерного реактора в направленный, желательно параллельный поток фотонов. В работе рассматриваются только вопросы преобразования теплового излучения в направленный поток фотонов. Целью исследования являются сравнительный анализ возможных си-

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

стем преобразования и получение максимально возможной тяги при заданных тепловой мощности и температуре излучателя.

В упомянутых работах указывается на целесообразность применения тепловых труб для передачи тепла от реактора к излучателю, так как только в этом случае можно получить минимальную разность значений температуры реактора и излучателя при заданном тепловом потоке. Эта разность может составить всего несколько градусов, т.е. температура излучателя практически равна температуре реактора или максимальной допустимой рабочей температуре конструкционных материалов. Поэтому будем считать, что температура излучателя практически равна максимально допустимой температуре элементов реакторной установки.

При создании ФД с ЯЭУ необходимо оптимизировать массогабаритные характеристики всей установки, однако данная работа ограничивается рассмотрением только системы излучения и преобразования тепла в силу тяги.

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Известно, что все тепло, выделяемое ЯЭУ, работающей в космосе, должно и может быть сброшено в окружающее пространство (за исключением части, затраченной на получение электроэнергии) только излучением. Известно также, что максимальное количество тепла, которое можно сбросить с единицы площади излучателя, определяется законом Стефана–Больцмана

$$q_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 = 5,67 (T/100)^4, \quad (1)$$

где  $q_0$  – тепловой поток, излучаемый с  $1\text{m}^2$  поверхности абсолютно черного тела (табл. 1).

Световое излучение, будучи сконцентрировано в одном направлении, создает давление на излучатель, определяемое формулой

$$P = q/c, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света.

Значения светового давления также приведены в табл.1, откуда видно, что фотонный двигатель с ядерной энергетической установкой мощностью  $\sim 3$  МВт с площадью излучателя  $1\text{m}^2$  при температуре абсолютно черного излучателя 2700 К может развить тягу 10 мН (или 1 г силы). Выберем эту гипотетическую установку в качестве основы для последующих сравнений.

Таблица 1

#### **Световое давление в зависимости от температуры излучателя**

$T, \text{K}$	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	<b>2700</b>	2800	2900	3000
$q, \text{kVt/m}^2$	902	1103	1328	1587	1881	2215	2591	<b>3013</b>	3485	4010	4593
$P \cdot 10^3, \text{H/m}^2$	3,02	3,68	4,43	5,29	6,27	7,38	8,64	<b>10,04</b>	11,62	13,37	15,31

Направленность излучения абсолютно черного тела (диффузное излучение) определяется геометрической формой излучателя и дополнительных устройств – концентраторов. Простейшие геометрические формы излучателей – это сфера, цилиндр и плоскость. Для того чтобы сбросить тепло упомянутой выше гипотетической установки с помощью излучателя  $1\text{m}^2$  нужно иметь сферический излучатель диаметром 0,564 м или цилиндрический диаметром, например, 0,16 м и длиной 2 м, или плоский диск диаметром 0,798 м с двухсторонним излучением (1,129 м – с односторонним излучением).

Каждый из этих излучателей посылает тепловое излучение более или менее равномерно во все пространство, и суммарная тяга равна нулю. Поэтому необхо-

димы дополнительные устройства, преобразующие это излучение в направленный, а в идеальном случае в параллельный, поток фотонов.

Рассмотрим возможные конструктивные формы излучателей (рис. 1), дающих тягу, отличную от нуля.

Очевидно, что площадь излучающей поверхности (при заданной мощности и температуре) должна оставаться прежней, в нашем случае  $1 \text{ м}^2$ . Следовательно, диаметр сферы должен быть увеличен в  $\sqrt{2}$  раз и будет равняться 0,795 м. При этом общая поверхность сферы и ее масса (без теплоизоляции) увеличиваются в два раза. Более целесообразной с теплофизической точки зрения представляется показанная на рис. 1 полусфера того же диаметра (0,795 м), так как в этом случае площадь теплоизоляции, её масса и потери тепла в два раза меньше.

То же можно сказать в отношении полуцилиндрического и плоского излучателей. Естественно, что и в этих случаях площадь излучающей поверхности должна быть сохранена. В частности, диаметр диска с односторонним излучением будет равен 1,129 м.

Во всех вариантах исполнения излучение происходит в полупространство и создает тягу, отличную от нуля, но меньшую, чем указано в табл. 1, в которой приведены данные для направленного излучения.

С точки зрения охлаждения ЯЭУ три типа излучателей равнозначны, так как сбрасывают в пространство одно и то же количество тепла. Однако тяга, создаваемая каждым из этих излучателей, различна, так как «направленность» их излучения различна (рис. 2). Излучение каждой элементарной площадки, расположенной на сфере и цилиндре под некоторым отличным от нуля углом к направлению движения, направлено частично навстречу движению, а на плоском излучателе «встречное» излучение отсутствует.

Рассчитаем тягу, создаваемую каждым из трех типов излучателей.

Начнем с плоского диска. Световое давление, или сила тяги на единицу площади поверхности излучателя равна  $P = q_0/c$ , где  $q_0$  – удельный тепловой поток (или

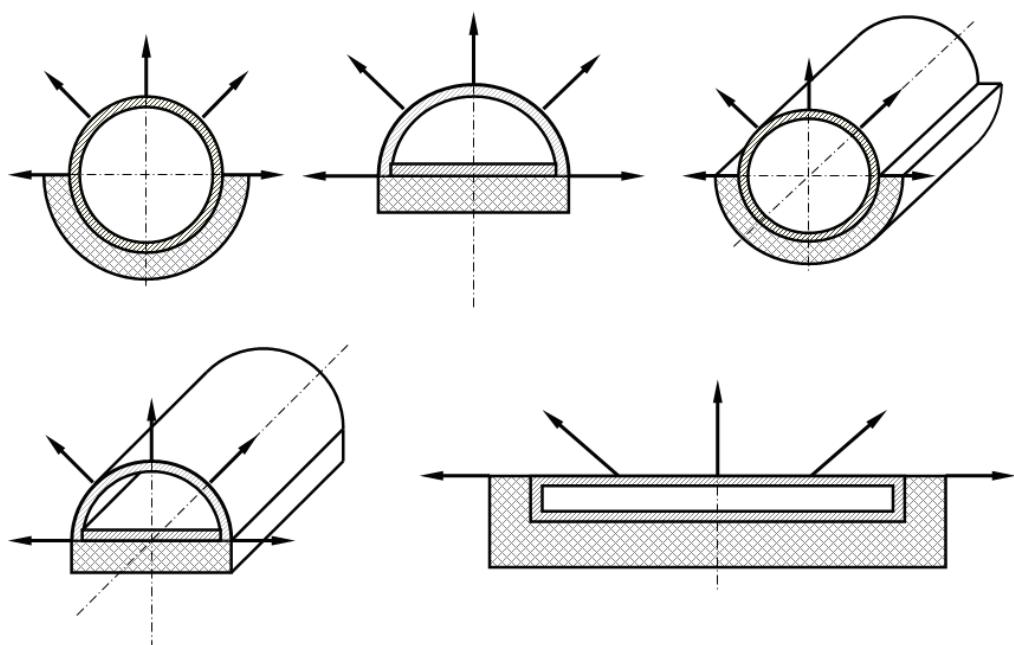


Рис. 1. Различные формы излучателя (сфера, полусфера, цилиндр, полуцилиндр, диск)

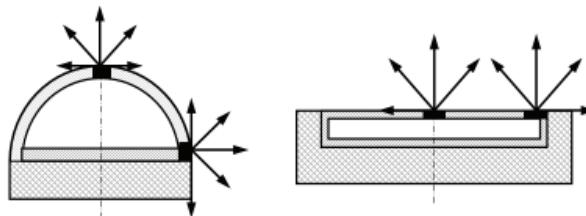


Рис. 2. Направленность излучения полусфера и диска

энергия  $E$ ), излучаемый с единицы площади. В соответствии с [4], энергия, излучаемая в единицу телесного угла с элемента поверхности  $df$ , равна

$$dE = dq_0 = E_n df d\psi \sin\varphi \cos\varphi d\varphi, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – угол, отсчитываемый от нормали к поверхности;  $\psi$  – угол, определяющий долготу, в полярных координатах.

Сравнивая (2) и (3) можно записать

$$dF = (E_n/c) \cdot df d\psi \sin\varphi \cos\varphi d\varphi, \quad (4)$$

где  $dF$  – сила тяги, действующая на площадку  $df$ .

Проекция этой силы на нормаль к площадке  $df$  равна

$$dF_n = dF \cos\varphi = (E_n/c) \cdot df d\psi \sin\varphi \cos^2\varphi d\varphi. \quad (5)$$

Полная сила, действующая на площадку  $df$ , за счет полного излучения этой площадки в полупространство

$$F = (2\pi/3) \cdot (E_n/c) df. \quad (6)$$

Согласно [4], полная энергия излучения с элемента  $df$  в полупространство равна

$$E = \pi E_n df. \quad (7)$$

Сравнивая (6) и (7) и, учитывая (2), можем записать

$$P = (2/3) \cdot (q_0/c) = (2/3) \cdot P_0. \quad (8)$$

Таким образом, сила тяги, создаваемая плоским диском площадью  $1 \text{ м}^2$ , излучающим в полупространство, равна  $(2/3)$  максимально возможной, т. е.

$$P_{\text{пл}}/P_0 = 2/3. \quad (9)$$

Формула (6) справедлива для элементов площади  $df$  и цилиндра, и сферы. Однако она определяет силу, направленную по нормали к площадке  $df$ . Для плоского диска нормаль ко всем площадкам  $df$  параллельна направлению движения, и суммарную силу, действующую на излучатель можно вычислить умножением формулы (8) на площадь излучателя. Нетрудно убедиться, что в случае цилиндра и сферы для вычисления суммарной силы нужно умножать формулу (8) не на площадь излучающей поверхности, а на ее проекцию, на плоскость, перпендикулярную направлению движения. Для полусфера площадь проекции меньше излучающей поверхности в два раза, а в случае цилиндра в  $\pi/2$  раз, тогда формула (9) запишется для цилиндра в виде

$$P_{\text{ц}}/P_0 = 4/3 \pi = 0,425, \quad (10)$$

а для сферы

$$P_{\text{сф}}/P_0 = 1/3. \quad (11)$$

Следовательно, плоские односторонние излучатели существенно эффективнее преобразуют энергию теплового излучения в силу тяги, чем сферические и цилиндрические.

Известным преобразователем светового излучения в параллельный поток является параболическое зеркало, в фокусе которого располагается излучатель. Такое зеркало в виде параболоида вращения (и параболического цилиндра) преобразует падающее на него излучение в параллельный поток, но часть излучения уходит мимо зеркала в виде расходящегося потока.

Рассмотрим систему сферический излучатель – параболоидное зеркало (рис. 3). Строго говоря, параллельный поток от параболоидного зеркала получается лишь в случае точечного источника излучения. Это приближение справедливо, когда фокусное расстояние зеркала больше диаметра излучателя хотя бы на порядок величины. Действительно, из верхней половины рис. 3, где  $d/F = 0,1$ , видно, что все лучи, исходящие от излучателя, почти параллельны радиальным лучам, исходящим из фокуса, и преобразуются в почти параллельный пучок отраженных от зеркала лучей. Тангенс угла расхождения между любыми двумя лучами 1 и 1' не превышает  $d/2F = 0,05$ , а проекция луча 1' на луч 1 равна 0,999, т.е. излучатель с  $d/2F = 0,1$  можно считать точечным.

Рассмотрим возможности оптимизации размеров зеркала, считая диаметр излучателя заданным ( $d = 564$  мм,  $s = 1 \text{ м}^2$ ). Зеркало преобразует в параллельный

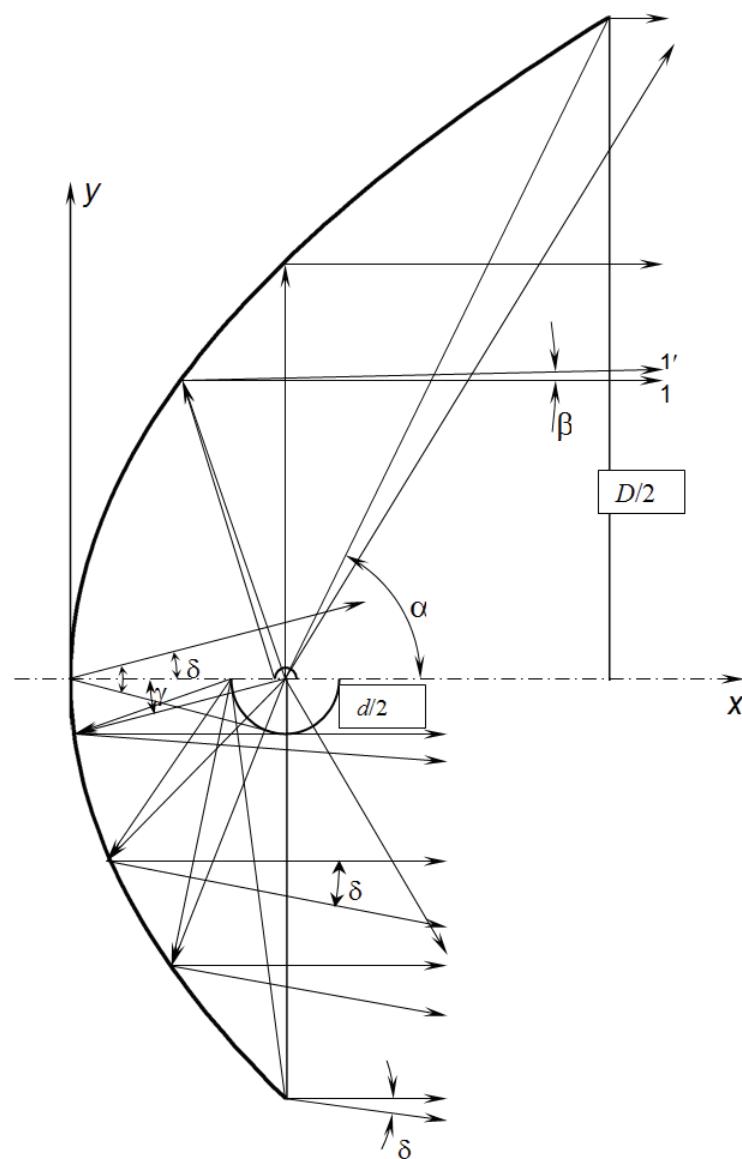


Рис. 3. Сферический излучатель с параболическим зеркалом (верх -  $d/F = 0,1$ ; низ -  $d/F = 0,5$ )

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

поток излучение, заключенное в телесный угол  $4\pi - 4\alpha$ . Излучение внутри угла  $4\alpha$  остается расходящимся.

Тяга, создаваемая в данном случае параллельным излучением, равна

$$P_1 = (1 - \alpha/\pi) \cdot P_0, \quad (12)$$

а тяга расходящегося излучения с учетом формулы (11) составит приблизительно

$$P_2 = (2\alpha/3\pi) \cdot P_0. \quad (13)$$

Суммарная тяга равна

$$P/P_0 = 1 - \alpha/3\pi. \quad (14)$$

На рисунке 3 (верх)  $\alpha = \pi/3$ , значит  $P/P_0 = 0,889$ . При этом диаметр зеркала  $D$  больше диаметра излучателя  $d$  в 63 раза, а площадь апертуры зеркала  $S$  больше площади излучателя  $s$  в 1264 раза. Отношение  $P/P_0$  стремится к единице при  $\alpha \rightarrow 0$ , но при этом размеры зеркала стремятся к бесконечности.

Если же увеличить угол  $\alpha$  до  $\pi/2$ , то  $P/P_0 = 0,5 + 0,333 \cdot 0,5 = 0,667$ ,  $D/d = 40$ ,  $S/s = 509,5$ . Видно, что геометрические размеры зеркала убывают быстрее, чем тяга. Следовательно, увеличение  $\alpha$  до  $\pi/2$  может быть целесообразным для уменьшения массогабаритных характеристик зеркала. Если взять  $\alpha = 2\pi/3$ , то  $D/d = 23$ ,  $S/s = 168,5$ . Однако при этом часть излучения, заключенная внутри  $\pi/2 \leq \alpha \leq 2\pi/3$ , создаст отрицательную тягу, и абсолютное значение тяги  $P$  будет меньше, чем при  $\alpha = \pi/2$ , а именно,  $P/P_0 = 0,585$ , поэтому едва ли целесообразно использовать  $\alpha > \pi/2$ .

Рассмотрим возможность увеличения  $d/F$ , сохраняя при этом  $\alpha = \pi/2$ . На нижней половине рис. 3 представлена такая система с  $d/F = 0,5$ . При этом отношение  $D/d = 8$ . Можно показать, что тяга этой системы равна 0,6345 вместо 0,667, т.е. потеря за счет «неточечности» излучателя составляет всего 4,9%, а диаметр зеркала  $D$  превышает диаметр излучателя  $d$  не в 40, а всего в 8 раз. В нашем случае  $d = 564$  мм, а  $D = 4,5$  м.

В расчетах принималось, что коэффициент отражения зеркала равен единице. Это не влияет на результат сравнения, абсолютное же значение тяги уменьшится пропорционально коэффициенту отражения реального зеркала. В [3] коэффициент отражения принимался равным 0,99.

Рассмотрим возможность дальнейшего улучшения этой системы. Заменим внешнюю полусферу излучателя плоским диском (рис. 4). Напомним что значения тяги полусферического, полуцилиндрического и одностороннего плоского излучателей одинаковой площади соотносятся как 0,333:0,425:0,667. Чтобы суммарная площадь поверхности излучателя была такой же, как у сферы, необходимо увеличить диаметр полусферы (и диска) в 1,155 раза. При этом оставляем угол раскрытия зеркала  $\alpha = \pi/2$  и отношение  $d/F = 0,5$ . Используя полученные ранее соотношения и учитывая, что площадь полусферы в два раза больше площади диска, получим для суммарной тяги значение 0,847 вместо 0,6345 от сферического излучателя, т.е. в 1,335 раза больше.

Если же поверхность диска теплоизолировать, то всю мощность будет излучать полусфера, обращенная к зеркалу. В этом случае ее диаметр должен быть увеличен в два раза по сравнению со сферой, чтобы иметь ту же площадь 1 м<sup>2</sup>, т.е.  $d = 1,128$  м. Ясно, что в этом случае тяга составит 0,937 от максимально возможной.

Ещё одна система – плоский излучатель в форме диска, теплоизолированный с одной стороны, и окруженный коническим рефлектором с углом конуса при вершине  $\beta = 60^\circ$  (рис. 5). Показано, что конический рефlector с углом раскрытия  $\alpha = 60^\circ$  увеличивает излучение в направлении нормали от значения 0,667 (без рефлектора) до 0,816. При этом размеры конического рефлектора относительно невелики.

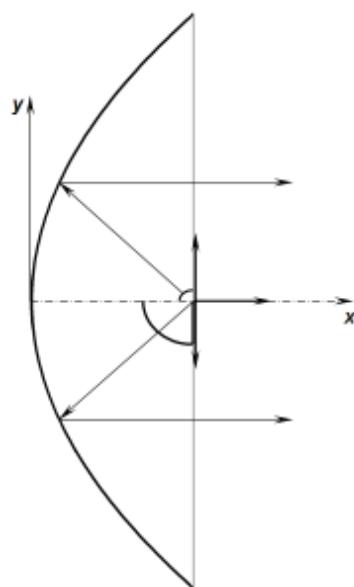


Рис. 4. Полусфера и диск с параболическим зеркалом

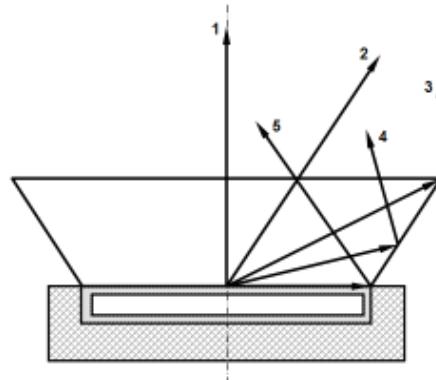


Рис. 5. Диск с боковым отражателем.

На рисунке показан ход некоторых лучей (прямых и отраженных): 1 – в направлении нормали; 2 – под углом  $30^\circ$  к нормали; 3 – под углом  $60^\circ$  (соответствует углу раскрытия); 4 – под углом  $75^\circ$ ; 5 – под углом  $90^\circ$  к нормали.

Поскольку нормальная составляющая излучаемой энергии пропорциональна  $\cos^2 \varphi$ , то ясно, что лучи 3 и 4 дают без отражателя малый вклад, а луч 5 вообще не имеет нормальной составляющей. Но отраженные лучи 3 и 4 имеют большую нормальную составляющую.

Была рассмотрена задача оптимизации угла раскрытия при неизменном угле конуса и показано, что оптимальным является угол  $45^\circ$ . При этом тяга равна 0,86 максимальной, но размеры рефлектора увеличиваются до двух диаметров диска, площадь апертуры – до  $4 \text{ м}^2$ , а удельная тяга уменьшается до  $2 \text{ мН}/\text{м}^2$ .

Все результаты сравнения представлены в табл. 2. Напомним, что они относятся к гипотетической энергодвигательной установке мощностью 3 МВт с температурой излучателя 2700 К и площадью  $1 \text{ м}^2$  (см. табл.1). Такая установка при идеальном преобразовании теплового излучения в параллельный поток фотонов могла бы развить тягу 10 мН.

Из таблицы 2 видно, что самым эффективным излучателем (без концентраторов) является плоский диск, излучающий в полупространство. Он создает тягу, равную  $2/3$  от максимально возможной. Он же обладает и наилучшей удельной тягой (или световым давлением), равной  $6,67 \text{ мН}/\text{м}^2$ .

Самой эффективной из рассмотренных систем преобразования (93,7 % или 9,37 мН) является полусферический излучатель с параболическим зеркалом, имеющим угол раскрытия  $\alpha = \pi/2$ . К перспективным преобразователям можно отнести полусферу–диск–зеркало, полусферу–зеркало и диск с боковым отражателем (см. табл. 2).

Однако следует заметить, что оптимизировать необходимо не преобразователь излучения в отдельности, а энергодвигательную установку в целом, и не только по размерам, но и по массе.

Таблица 2

**Сравнение концентраторов различной формы**

		Диаметр излучателя $d, \text{ м}$	Поверхность излучателя $S_{\text{изл}}, \text{ м}^2$	Фокусное расстояние $F, \text{ м}$	Диаметр апертуры $D, \text{ м}$	Площадь апертуры $S_a, \text{ м}^2$	Эффективность преобразования $P/P_0, \%$	Тяга $P, \text{ мН}$	«Удельная» тяга $P/S_a, \text{ мН/м}^2$	1
Полусфера (рис. 1)		0,795	1	-	-	1	33,3	3,33	3,33	2
Полуцилиндр $F/d = 50$ (рис. 1)		0,08	1	-	-	1	42,5	4,25	4,25	3
Диск (рис. 1)		1,129	1	-	-	1	66,7	6,67	6,67	4
«Точечная» сфера + зеркало	$\alpha = \pi/3$ (рис. 3, верх)	0,564	1	5,64	35,8	1007	88,9	8,89	$8,89 \cdot 10^{-3}$	5
	$\alpha = \pi/2$ (рис. 3, низ)	0,564	1	5,64	22,66	400	66,7	6,67	$3,33 \cdot 10^{-3}$	6
Сфера + зеркало	$\alpha = \pi/3$ (рис. 3, верх)	0,564	1	1,13	7,16	402	84,6	8,46	0,21	7
	$\alpha = \pi/2$ (рис. 3, низ)	0,564	1	1,13	4,51	16,2	63,5	6,35	0,397	8
Полусфера+диск+зеркало $\alpha = \pi/2$ (рис.4)		0,651	1	1,330	5,32	22,2	84,7	8,47	0,381	9
Полусфера+зеркало $\alpha = \pi/2$		1,128	1	2,256	9,0	63,9	93,7	9,37	0,147	10
Диск+конус $\alpha = \pi/3$ (рис.5)		1,129	1	-	1,7	2,25	81,6	8,16	3,63	11
Диск+конус $\alpha = \pi/4$ (рис.5)		1,129	1	-	2,258	4,0	86,0	8,6	2,04	12

Приведенные в работе численные значения не следует воспринимать как точные в строгом смысле, поскольку в рассуждениях содержатся определенные допущения и приближения. Однако можно считать, что они не искажают корректность выполненного сравнения.

Реальные излучатели отличаются от абсолютно черных тел прежде всего тем, что их степень черноты меньше единицы. Это снижает удельные характеристики излучателей и является предметом анализа при реальном конструировании. При этом необходимо либо искать способы увеличения степени черноты излучателя, либо увеличивать его площадь.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе рассмотрены возможные схемы конвертора тепловой энергии реактора ядерно-фотонного движителя в энергию направленного потока светового излучения, различающиеся геометрической формой излучателя и отражателя, и выполнен сравнительный расчетный анализ эффективности этих схем.

Сравнительный анализ различных схем преобразователей теплового излучения в направленный поток фотонов, создающий тягу, показывает, что наиболее приемлемыми для дальнейшей оптимизации являются схемы, приведенные в четырех последних строках табл. 2.

**Литература**

1. Pouplko V.Ya. et al. Light Propulsion for Space Flight // Proc. of Space Technology and Application International Forum–99. –Albuquerque, NM, 1999. –P.1232–1236.
2. Gulevich A.V. et. al. Application of Nuclear Photon Engines for Deep Space Exploration // Proc. of Space Technology and Application International Forum–2001. –Albuquerque, NM, 2001. –P.957–962.
3. Гулевич А.В., Зродников А.В., Иванов Е.А. и др. Применение ядерных фотонных ракет для исследования дальнего космоса // Известия вузов. Ядерная энергетика. –2002. –№2. –С.54–62.
4. Гребер Г. и др. Основы учения о теплообмене / Пер. с немецкого. М.: Иностр.литература. 1958. С.476.

**Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (проект № 04-02-97233)**

Поступила в редакцию 10.12.2012

# РАСЧЕТ МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОГО КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА В ТЯЖЕЛОМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

**А.Ю. Легких, П.Н. Мартынов, Р.Ш. Асхадуллин**

*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



Техническая реализация твердофазного метода регулирования содержания кислорода в свинецсодержащих теплоносителях, разработанного в ГНЦ РФ-ФЭИ, осуществляется с помощью специально разрабатываемых устройств – массообменных аппаратов, которые являются важной составной частью комплекса средств технологии тяжелых жидкometаллических теплоносителей. На стадии проектирования массообменного аппарата является необходимым расчетное определение основных характеристик его работы. Описана методика расчета массообменных аппаратов с твердофазным источником кислорода (оксидом свинца), которая позволяет оценить основные характеристики работы аппарата и прогнозировать их изменение в зависимости от времени эксплуатации. Приводятся результаты расчетов по разработанной методике.

**Ключевые слова:** термодинамическая активность, кислород, растворимость, свинец, свинец-висмут, оксид, теплоноситель, массообменный аппарат, твердофазный метод.

**Key words:** thermodynamic activity, oxygen, solubility, lead, lead-bismuth, oxide, coolant, mass exchanger, solid-phase method.

## ВВЕДЕНИЕ

Применение тяжелых жидкometаллических теплоносителей (ТЖМТ), таких как эвтектический сплав свинца-висмута и свинец, в энергетических установках связано с рядом проблем, важнейшими из которых являются обеспечение коррозионной стойкости контактирующих с данными теплоносителями конструкционных материалов и предотвращение случаев зашлаковки контура или отдельных его участков. Коррозия в жидкometаллической среде имеет принципиальные отличия по сравнению с коррозией в воде и газах, следовательно, необходимы специальные методы и устройства для обеспечения защиты конструкционных сталей от коррозии при использовании ТЖМТ.

Для защиты конструкционных сталей от коррозии в среде расплава свинца и свинца-висмута применяется кислородная пассивация. Пассивация заключается

© А.Ю. Легких, П.Н. Мартынов, Р.Ш. Асхадуллин, 2013

в формировании и поддержании на поверхностях сталей тонких (1–10 мкм), хорошо сцепленных с основой, плотных оксидных пленок. При наличии таких пленок коррозионная стойкость конструкционных материалов значительно возрастает. Поскольку в методе пассивации основу защитных покрытий составляют оксидные соединения компонентов сталей, то одним из основных параметров, определяющих их стабильность, является термодинамическая активность (ТДА) кислорода в теплоносителе [1].

Для обеспечения условий формирования и поддержания целостности защитных оксидных покрытий, а также для предотвращения случаев зашлаковки контура твердофазными отложениями на основе оксида свинца в процессе эксплуатации установок с ТЖМТ необходимо поддерживать ТДА кислорода на определенном уровне. При слишком низком уровне ТДА кислорода в расплаве свинца – висмута или свинца не обеспечивается надежная анткоррозионная защита конструкционных сталей, т.к. могут диссоциировать защитные покрытия. При перенасыщении теплоносителя кислородом возможно образование шлаковых «блокад» на теплообменных участках контура, нарушение проектных характеристик циркуляционного контура, отклонение от штатных режимов эксплуатации, снижение ресурса работы оборудования.

Специалистами ГНЦ РФ-ФЭИ были разработаны метод и средство регулирования ТДА кислорода в свинецсодержащих теплоносителях. Разработанный метод, основанный на использовании процесса растворения твердофазного оксида свинца, помещаемого в поток теплоносителя, называется твердофазным методом регулирования. Техническая реализация твердофазного метода регулирования ТДА кислорода осуществляется с помощью специально разрабатываемых устройств – массообменных аппаратов (МА), которые являются важной составной частью комплекса средств технологии ТЖМТ. Основной частью МА является реакционная емкость, в которой размещается засыпка из гранулированного оксида свинца. Через реакционную емкость обеспечивается расход теплоносителя. Твердофазное средство окисления, контактируя с циркулирующим тяжелым жидким металлом, растворяется, и кислород транспортируется по всему контуру с потоком теплоносителя [1, 2].

В настоящее время ведутся разработки массообменных аппаратов, которые обеспечивают возможность реализации твердофазного метода регулирования ТДА кислорода, в контурах проектируемых реакторных установок на быстрых нейтронах с тяжелым жидкокометаллическим теплоносителем.

На стадии проектирования массообменного аппарата является необходимым расчетное определение основных характеристик работы МА. Инженерный расчет позволяет оценить основные характеристики работы аппарата на стадии его проектирования и подобрать оптимальную конструкцию МА для конкретного объекта регулирования.

Одной из основных характеристик МА является его производительность по кислороду. Для расчета производительности МА необходимо знать как концентрацию или ТДА кислорода на выходе из аппарата, так и скорость насыщения теплоносителя кислородом в реакционной емкости аппарата. ТДА кислорода на выходе из МА в свою очередь зависит от времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем, кинетических характеристик процесса растворения PbO, конструкции и режима работы аппарата. В расчетах можно принять, что из МА выходит теплоноситель, насыщенный кислородом до предельной растворимости, и тем самым сделать консервативную оценку. Однако данное предположение справедливо не во всех случаях, а полученные значения могут быть завышены. Можно задать значе-

ние концентрации или ТДА кислорода на выходе из МА на основании опыта эксплуатации МА соответствующих конструкций и определить искомую эффективность работы аппарата, т.е. его производительность по кислороду, но заданное значение может не соответствовать конкретному техническому решению.

Таким образом, при расчетном определении характеристик МА является целесообразным рассчитывать концентрацию или ТДА кислорода и учитывать результаты данного расчета при определении производительности по кислороду.

При разработки МА является важным знание среднего размера гранул оксида свинца в любой момент времени в условиях процесса растворения, поскольку от геометрических характеристик засыпки зависит эффективность работы аппарата.

Авторами разработана методика расчета массообменных аппаратов с твердофазным источником кислорода (оксидом свинца), которая позволяет выполнить расчеты производительности МА и растворения оксида свинца в МА с учетом изменения значения ТДА кислорода на выходе из МА в зависимости от времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем и кинетических характеристик процесса растворения твердофазного средства окисления. Разработанная методика является одним из инструментов, которые позволяют прогнозировать изменение основных характеристик массообменных устройств при длительном ресурсе эксплуатации.

## ВЫВОД ОСНОВНЫХ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Не смотря на то, что МА разных типов имеют различные принципы организации расхода теплоносителя через реакционную емкость, подходы к расчетам производительности и растворения гранул засыпки для них являются схожими.

В методике расчета МА были приняты следующие допущения:

1. При рассмотрении процесса растворения кислорода в расплаве свинца-висмута за стандартное состояние выбирают состояние насыщения, т.е. состояние, в котором достигнута предельная растворимость кислорода в расплаве  $C_s$ . Предполагается, что зависимость концентрации растворенного кислорода  $C$  от ТДА ( $a_{[0]}$ ) выражается соотношением

$$a_{[0]} = \frac{C}{C_s}. \quad (1)$$

2. Гранулы имеют форму шариков и не изменяют своей формы в процессе растворения. В реальности гранулы PbO могут иметь форму, отличную от сферической, а растворение может происходить неравномерно по всей поверхности. Принятое допущение заменяет реальную поверхность растворения гранулы на поверхность эквивалентной сферы.

3. В каждом цикле работы МА влияние изменения размера гранул PbO на другие параметры является незначительным, и им можно пренебречь.

Основной закон кинетики физического растворения твердых тел, в соответствии с которым плотность потока вещества с поверхности растворения пропорциональна концентрационному недонасыщению раствора [3], может быть записан в виде

$$\frac{dm}{S_p \cdot d\tau} = K \cdot (C_s - C), \quad (2)$$

где  $C_s$  – концентрация насыщения;  $C$  – концентрация вещества в растворе;  $K$  – коэффициент скорости растворения.

Определяя скорость растворения оксида свинца как массу кислорода, покидающего твердую фазу PbO в единицу времени, а также учитывая соотношение (1),

получим

$$-\frac{dm_{[0]}}{d\tau} = K_p \cdot (1 - a_{[0]}) \cdot S_p, \quad (3)$$

где  $K_p = K \cdot C_{s[0]}$ .

Каждой схеме организации процесса растворения соответствует определенное уравнение материального баланса, связывающее концентрацию вещества в растворе с массой вещества, остающегося в твердом состоянии. Такое балансовое уравнение позволит совместно с уравнением кинетики образовать замкнутую систему и решить задачу о кинетике растворения в условиях принятой схемы.

Для растворения гранулированного оксида свинца в МА балансовое уравнение имеет вид

$$m_{[0]0} - m_{[0]} = V_{\text{тепл}} \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot (C_{[0]} - C_0), \quad (4)$$

где  $m_{[0]0}$ ,  $m_{[0]}$  – массы кислорода в начальный и конечный моменты времени в твердом PbO;  $C$ ,  $C_0$  – текущая и начальная концентрации кислорода в расплаве в реакционной емкости МА;  $\rho_{\text{тепл}}$  – плотность теплоносителя;  $V_{\text{тепл}}$  – объем теплоносителя в реакционной емкости МА.

За элементарное время  $d\tau$  масса кислорода в твердом PbO уменьшится на  $dm_{[0]}$ , концентрация кислорода в расплаве при этом изменяется на  $dC$ , тогда балансовое уравнение примет вид

$$dm_{[0]} = V_{\text{тепл}} \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot dC_{[0]}.$$

Основными принятыми в технике и технологии обобщенными характеристиками зернистого слоя являются порозность  $\varepsilon$  (доля объема, не занятого элементами зернистого слоя) и удельная поверхность зернистого слоя  $A$ . Значение  $\varepsilon$  зависит от формы элементов, характера упаковки в слое и, в принципе, не зависит от абсолютной величины геометрически подобных элементов слоя [4]. Удельной поверхностью зерен  $A_0$  ( $\text{м}^2/\text{м}^3$ ) называют отношение внешней поверхности зерна  $S_3$  к его объему  $V_3$ :

$$A_0 = S_3 / V_3. \quad (6)$$

Для зерен правильной формы расчет  $A_0$  по известным их размерам не представляет затруднений. Удельная поверхность одиночного шара:

$$A_0 = \frac{6}{d}. \quad (7)$$

Удельная поверхность  $A$  ( $\text{м}^2/\text{м}^3$ ) зернистого слоя в целом – это суммарная поверхность всех составляющих его зерен в единице объема реакционной емкости аппарата. Для сферических частиц с практически точечными контактами друг с другом

$$A = (6/d) \cdot (1 - \varepsilon). \quad (8)$$

Используя понятия порозности и удельной поверхности, применительно к МА на основании уравнений (3) и (4) можно записать систему

$$dm_{[0]} = \varepsilon \cdot V_{\text{РЕ}} \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot C_{s[0]} \cdot da_{[0]}, \quad (9)$$

$$-\frac{dm_{[0]}}{d\tau} = K_p \cdot (1 - a_{[0]}) \cdot A \cdot V_{\text{РЕ}}, \quad (10)$$

где  $\varepsilon$  – порозность засыпки из оксида свинца;  $V_{\text{РЕ}}$  – общий объем реакционной емкости МА;  $C_{s[0]}$  – предельная растворимость кислорода в свинце-висмуте;  $A$  – удельная поверхность засыпки PbO;  $K_p$  – коэффициент скорости растворения PbO.

Подставляя (9) в (10) и разделив переменные, получим дифференциальное уравнение

$$\frac{da_{[0]}}{(1-a_{[0]})} = \frac{K_p}{\varepsilon \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot C_s} \cdot A \cdot d\tau, \quad (11)$$

решение которого имеет вид

$$a_{[0]\text{вых}} = 1 - (1 - a_{[0]\text{вх}}) \cdot \exp \left( - \int_0^{\tau_k} \left( \frac{K_p \cdot A}{\varepsilon \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot C_s} \right) d\tau \right), \quad (12)$$

где  $a_{[0]\text{вх}}$ ,  $a_{[0]\text{вых}}$  – ТДА кислорода в теплоносителе на входе в МА и на выходе из него соответственно;  $\rho_{\text{тепл}}$  – плотность теплоносителя;  $K_p$  – коэффициент скорости растворения,  $\varepsilon$  – порозность засыпки;  $A$  – удельная поверхность засыпки;  $C_s$  – предельная растворимость кислорода;  $\tau_k$  – время взаимодействия теплоносителя с оксидом свинца.

В основу расчета коэффициента скорости растворения  $K_p$  могут быть положены экспериментально подтвержденные критериальные зависимости, характеризующие скорость растворения шарового зернистого слоя PbO при обтекании тяжелым теплоносителем [1]:

$$\text{свинец-висмут } Sh = 3,8 \cdot 10^{-2} \cdot Re^{0,70} \cdot Sc^{0,67}, \quad (13)$$

$$\text{свинец } Sh = 8,7 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1,42} \cdot Sc^{0,83}, \quad (14)$$

где  $Sh$  – число Шервуда;  $Re$  – число Рейнольдса;  $Sc$  – число Шмидта.

Связь  $Sh$  и  $K_p$  определяется из соотношений

$$Sh = \frac{\beta \cdot l}{D}, \quad (15)$$

$$\beta = K_p \cdot (1 - a) / [\rho_{\text{тепл}} \cdot (C_s - C)], \quad (16)$$

где  $\beta$  – коэффициент массоотдачи, м/с;  $D$  – коэффициент диффузии кислорода в свинце-висмуте,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $l$  – характерный размер, м;  $a$  – ТДА кислорода в теплоносителе.

Исходя из (15) и (16)  $K_p$  можно найти по формуле

$$K_p = \frac{Sh \cdot D}{l} \cdot C_s \cdot \rho_{\text{тепл}}, \quad (17)$$

где  $K_p$  – коэффициент скорости растворения,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $\rho_{\text{тепл}}$  – плотность расплава свинца-висмута,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $C_s$  – концентрация насыщения расплава свинца-висмута кислородом, в массовых долях;  $l$  – характерный размер, м.

Характерный размер для шарового зернистого слоя PbO находится по формуле [4]

$$l = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon \cdot d_{\text{сф}}}{1 - \varepsilon}, \quad (18)$$

где  $\varepsilon$  – порозность засыпки из сфероидов PbO (доля не занятого сфероидами объема слоя);  $d_{\text{сф}}$  – диаметр сфероидов PbO.

Для свободной засыпки шаров порозность зернистого слоя можно принять равной 0,4 [4].

Ввиду того, что подынтегральное выражение в зависимости (12) является достаточно сложной функцией, а на практике  $a_{[0]\text{вх}}$  является достаточно малой величиной ( $\ll 1$ ), то для практических инженерных оценок ТДА кислорода зависимость (12) можно упростить к виду

$$a_{[0]\text{вых}} = 1 - \exp \left( - \frac{K_p \cdot A}{\varepsilon \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot C_s} \cdot \tau_k \right), \quad (19)$$

где  $K_p$ ,  $C_s$ ,  $\rho_{\text{тепл}}$  – параметры при средней температуре теплоносителя;  $\tau_k$  – время

взаимодействия оксида свинца с теплоносителем.

Производительность МА с дискретным принципом работы, например, пневмодозаторного типа, вычисляется по формуле

$$q = \rho_{\text{тепл}} \cdot V_{\text{тепл}} \cdot C_s \cdot a_{[0]\text{вых}} \cdot N, \quad (20)$$

где  $q$  – производительность МА;  $a_{[0]\text{вых}}$  – ТДА кислорода на выходе из МА, соответствующая режиму работы аппарата;  $V_{\text{тепл}}$  – объем теплоносителя в реакционной емкости МА;  $N$  – количество циклов работы МА в единицу времени.

Применительно к МА пневмодозаторного типа под временем взаимодействия PbO с теплоносителем понимают время нахождения расплава в реакционной емкости устройства в одном цикле работы, которое определяет количество циклов работы МА. Упомянутые параметры связаны соотношением

$$N = 3600 / \tau_k$$

где  $\tau_k$  – время взаимодействия оксида свинца с теплоносителем в одном цикле, с;  $N$  – количество циклов работы аппарата при заданном времени  $\tau_k$ , циклов/ч.

Производительность МА с непрерывным расходом теплоносителя через реакционную емкость (например, МА с встроенным насосом или внутренним нагревателем) при известном расходе может быть вычислена по простой формуле

$$q = G \cdot C_s \cdot a_{[0]\text{вых}}, \quad (21)$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя через реакционную емкость МА, кг/с;  $a_{[0]\text{вых}}$  – ТДА кислорода в теплоносителе на выходе МА.

Важным для практики является оценка растворения оксида свинца в МА. Поскольку целью расчета растворения является определение размера частиц в любой момент времени в условиях данного процесса, то такой расчет позволяет прогнозировать изменения параметров работы аппарата, например, расхода теплоносителя через реакционную емкость, производительности, концентрации кислорода на выходе из МА, во времени.

Для построения модели расчета растворения оксида свинца рассмотрим один сфериод (гранулу) оксида свинца, который находится в реакционной емкости МА. При растворении за элементарное время  $d\tau$  радиус шарика изменится на  $dr$ , а его объем уменьшится на величину

$$dV = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot ((r + dr)^3 - r^3) = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (r^3 + 3 \cdot r^2 \cdot dr + 3 \cdot r \cdot (dr)^2 + (dr)^3 - r^3). \quad (22)$$

Ввиду малости  $(dr)^2$  и  $(dr)^3$  можно пренебречь слагаемыми  $3 \cdot r \cdot (dr)^2$  и  $(dr)^3$ , тогда

$$dV = 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot dr, \quad (23)$$

Масса шарика из PbO за время  $d\tau$  уменьшится на величину

$$dm_{\text{PbO}} = r_{\text{PbO}} \cdot dV. \quad (24)$$

Масса кислорода в шарике станет меньше за это же время на величину

$$dm_0 = \frac{\mu_0}{\mu_{\text{PbO}}} \cdot \rho_{\text{PbO}} \cdot dV, \quad (25)$$

где  $\mu_0$ ,  $\mu_{\text{PbO}}$  – молярные массы кислорода и оксида свинца соответственно.

Исходя из выражения (3) за элементарное время  $d\tau$  с поверхности шарика  $4\pi r^2$  растворится масса кислорода

$$dm_{[0]} = -K_p \cdot (1 - a_{[0]}) \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot d\tau. \quad (26)$$

Приравнивая (23) и (24), с учетом (22) получим

$$-K_p \cdot (1 - a_{[0]}) \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot d\tau = \frac{\mu_0}{\mu_{\text{PbO}}} \cdot \rho_{\text{PbO}} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot dr.$$

Разделяем переменные и интегрируем:

$$-\int_0^{\Delta\tau} K_p \cdot (1 - a_{[0]}) d\tau = \frac{\mu_0}{\mu_{Pb0}} \rho_{Pb0} \cdot \int_{r_0}^r dr,$$

где  $\Delta\tau$  – время взаимодействия сфероида с теплоносителем;  $r_0$  – начальный радиус сфероида.

Если рассматривать МА с непрерывным расходом теплоносителя через реакционную емкость (рис. 1), то сфероиды, расположенные у входа в реакционную емкость, будут находиться в теплоносителе с ТДА кислорода, равной  $a_{[0]_{вх}}$ , а сфероиды, расположенные у выходной части реакционной емкости МА, – в расплаве с ТДА кислорода  $a_{[0]_{вых}}$ , причем  $a_{[0]_{вх}} \ll a_{[0]_{вых}}$ . Следовательно, скорости растворения

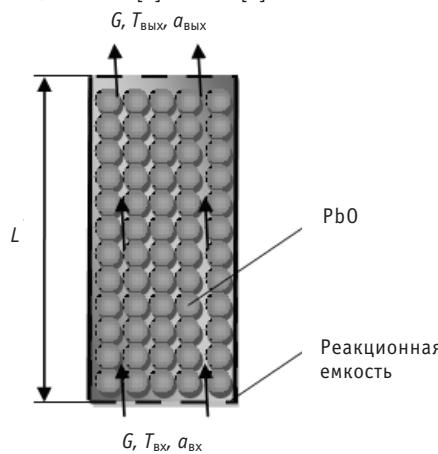


Рис. 1. Условная схема реакционной емкости МА с непрерывным расходом теплоносителя

сфероидов, расположенных в разных частях реакционной емкости будут разными, сфероиды, размещенные у входной части реакционной емкости, будут растворяться быстрее.

При рассмотрении МА с непрерывным расходом теплоносителя  $\Delta\tau$  в уравнении (27) имеет смысл рассматриваемого периода времени работы аппарата, а  $\tau_k$  в формуле (19) – времени взаимодействия слоя теплоносителя при его прохождении реакционной емкости от входа до выхода, которое при известном расходе теплоносителя находится из соотношения:

$$\tau_k = \frac{L}{G} \cdot \rho_{тепл} \cdot S_{MA} \cdot \varepsilon, \quad (28)$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя через МА;  $S_{MA}$  – площадь сечения реакционной емкости МА;  $L$  – высота слоя засыпки реакционной емкости МА к моменту времени  $\Delta\tau$ .

После интегрирования уравнения с учетом вышесказанного, (27) получим формулы для расчета радиуса сфероидов в любой момент времени:

- для сфероидов, расположенных у входа реакционной емкости МА

$$r = r_0 - \frac{K_p \cdot \Delta\tau}{\frac{\mu_0}{\mu_{Pb0}} \cdot \rho_{Pb0}}, \quad (29a)$$

- для сфероидов, расположенных у выхода реакционной емкости МА

$$r = r_0 - \frac{K_p \cdot (1 - a_{[0]}^{вых}) \cdot \Delta\tau}{\frac{\mu_0}{\mu_{PbO}} \cdot \rho_{PbO}}, \quad (296)$$

где  $\mu_0$ ,  $\mu_{PbO}$  – молярные масса кислорода и оксида свинца соответственно;  $\Delta\tau$  – период времени работы МА;  $r_0$  – начальный радиус сфераидов.

При расчете растворения сфераидов в МА с дискретным принципом работы ввиду особенностей конструкции и организации расхода через реакционную емкость [5] нужно применить несколько другой подход.

Так как теплоноситель, обогащенный кислородом, подается из МА в контур порциями, рассмотрим процесс взаимодействия теплоносителя с оксидом свинца в МА за один рабочий цикл [5]. Для того чтобы найти насколько изменится диаметр сфераидов за один рабочий цикл МА, можно построить итерационный процесс:

$$\begin{aligned} a_{[0]}^{(k)} &= 1 - \exp \left[ -\frac{K_p}{\varepsilon \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot C_s} \cdot \frac{6}{d^{(k-1)}} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \tau^k \right], \\ \Delta d^{(k)} &= \frac{2 \cdot K_p \cdot (1 - a_{[0]}^{(k)}) \cdot d\tau}{\frac{\mu_0}{\mu_{PbO}} \cdot \rho_{PbO}}, \\ \Delta d^{(k+1)} &= \Delta d^{(k)} + \Delta d^{(k-1)}, \\ \Delta d^{(k)} &= \Delta d^{(k-1)} + \Delta d^{(k+1)}, \\ \tau^{(k)} &= \tau^{(k-1)} + d\tau, \end{aligned}$$

$k$  – номер итерации;  $d\tau$  – шаг по времени;  $\Delta d$  – изменение диаметра шарика при растворении.

Получив изменение диаметра сфераидов за один цикл работы МА, легко определить, насколько изменится диаметр сфераидов за период времени работы МА:

$$\Delta d_{sum} = \Delta d \cdot N \cdot \Delta\tau, \quad (30)$$

где  $N$  – количество циклов работы в единицу времени;  $\Delta\tau$  – время непрерывной работы аппарата.

Для того чтобы прогнозировать изменение максимальной производительности МА при уменьшении размеров гранул засыпки PbO можно использовать следующий подход.

При уменьшении размера гранул в процессе эксплуатации МА изменяется общая поверхность растворения и объем, занимаемый засыпкой, а количество сфераидов PbO при растворении не изменяется.

Исходя из вышесказанного можно записать следующие соотношения:

$$\begin{aligned} S_{p0} &= \pi \cdot d_0^2 \cdot n = \frac{6}{d_0} \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot V_0, \\ S_p &= \pi \cdot d^2 \cdot n = \frac{6}{d} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot V, \end{aligned} \quad (31)$$

где  $S_{p0}$ ,  $V_0$  – поверхность растворения и объем, занимаемый засыпкой, в исходном состоянии (со средним диаметром гранул  $d_0$  и порозностью  $\varepsilon_0$ );  $S_p$ ,  $V$  – поверхность растворения и объем, занимаемый засыпкой, в состоянии со сред-

ним диаметром гранул засыпки  $d$  и порозностью  $\varepsilon$ ;  $n$  – количество гранул в засыпке.

Разделив одно соотношение на другое и выразив  $V$ , получим

$$V = \frac{d^3 \cdot (1 - \varepsilon_0)}{d_0^3 \cdot (1 - \varepsilon)} \cdot V_0. \quad (32)$$

Подставляя соотношение (32) в (20), получим зависимость максимальной производительности МА с дискретным принципом работы от времени работы аппарата при заданном режиме работы МА и температуре теплоносителя в явном виде

$$q(\tau) = \frac{d(\tau)^3 \cdot (1 - \varepsilon_0)}{d_0^3 \cdot (1 - \varepsilon)} \cdot V_0 \cdot \rho_{\text{тепл}} \cdot \varepsilon \cdot C_s \cdot a_{[0]\text{вых}} \cdot N, \quad (33)$$

где  $q$  – производительность МА;  $C_s$  – концентрация насыщения;  $a_{[0]\text{вых}}$  – ТДА кислорода на выходе из МА, соответствующая режиму работы аппарата;  $\rho_{\text{тепл}}$  – плотность теплоносителя;  $\varepsilon$  – порозность зернистого слоя;  $V_0$  – объем реакционной емкости МА (реакционная емкость полностью заполнена гранулами из PbO в исходном состоянии);  $d_0$  – размер сфероидов в исходном состоянии;  $N$  – количество циклов работы МА в единицу времени.

В инженерных расчетах в формуле (33) можно положить, что  $\varepsilon \approx \varepsilon_0$ .

При оценке зависимости производительности МА с непрерывным расходом теплоносителя от времени его работы необходимо выполнить гидравлический (для МА с насосом) или теплогидравлический расчет (для МА с нагревателем) расхода теплоносителя для различных значений среднего размера сфероидов оксида свинца в МА, поскольку при уменьшении размера сфероидов будет изменяться гидравлическое сопротивление слоя засыпки. Производительность по кислороду при этом вычисляется по формуле (21). Связь высоты слоя засыпки с размером гранул PbO определяется на основании соотношения (32).

## ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МА

Для проверки разработанной методики расчета производительности МА был

Таблица 1

### Входные данные для расчета образца МА

Параметр	Значение
Реакционная емкость МА:	
внутренний диаметр, мм	80
высота, мм	260
диаметр сфероидов PbO, мм	8
порозность засыпки	0,4
Температура теплоносителя, °C	390
Растворимость кислорода в свинце-висмуте, % масс.	$1,13 \cdot 10^{-4}$
Количество циклов работы МА в единицу времени, циклов/ч, соответствующее время взаимодействия PbO с теплоносителем в одном цикле, с	240–20, 15–180

выполнен расчет образца МА пневмодозаторного типа, аппарата с дискретным принципом работы, проходившего испытания на циркуляционном стенде «ТТ-2М» в 2008 г. В результате экспериментальных исследований была определена зависимость ТДА кислорода на выходе из МА от времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем за цикл работы МА.

Входные данные для расчета образца МА приведены в табл. 1.

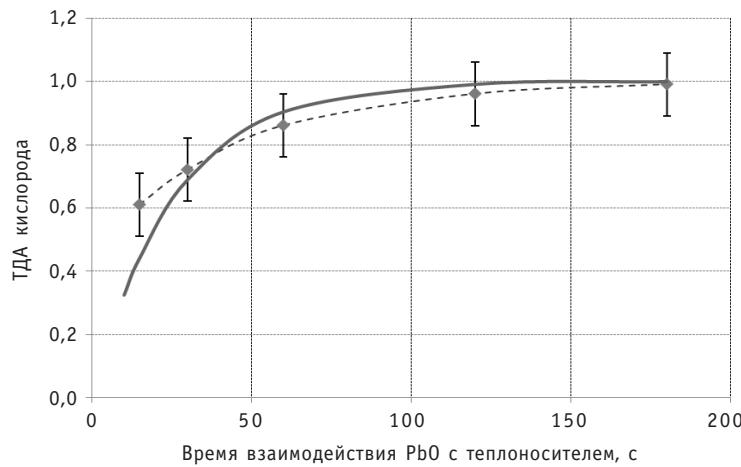


Рис. 2. Зависимость ТДА кислорода от времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем при температуре 390°C: ◆ – эксперимент; — — расчет

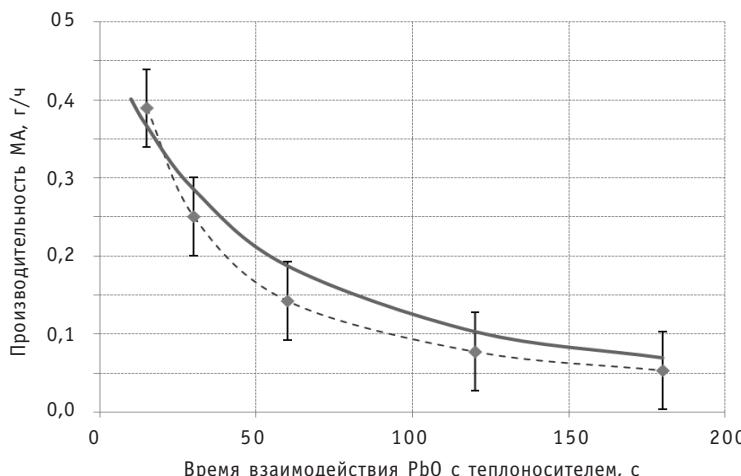


Рис. 3. Производительность образца МА пневмодозаторного типа при температуре 390°C:  
◆ – эксперимент; — — расчет

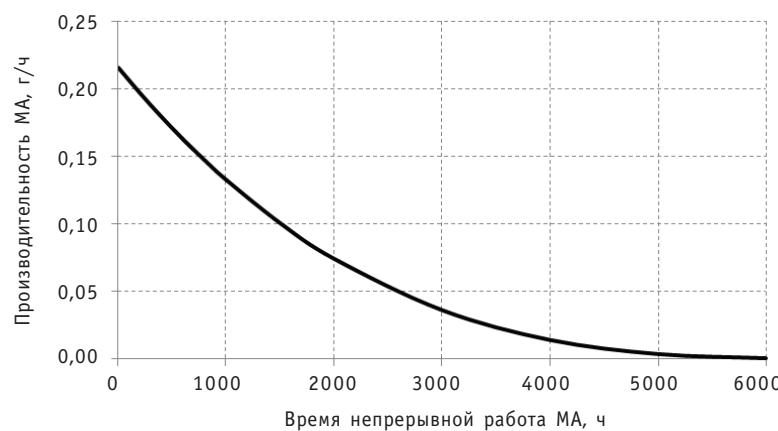


Рис. 4. Производительность МА пневмодозаторного типа при  $N = 30$  циклов/ч в зависимости от времени непрерывной работы

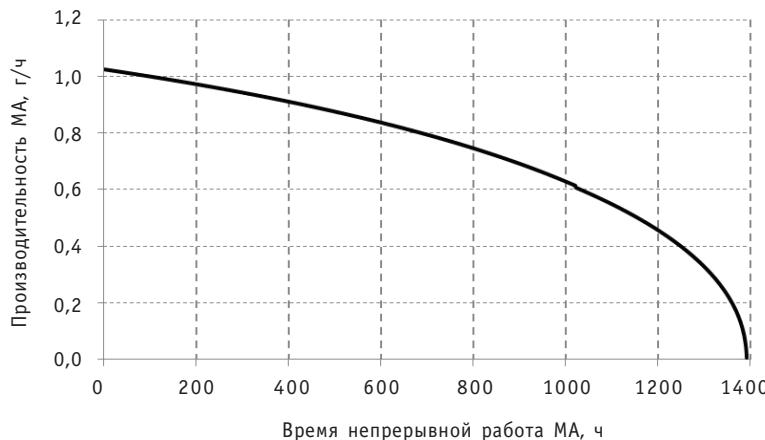


Рис. 5. Производительность МА с непрерывным расходом теплоносителя при 400°C в зависимости от времени непрерывной работы

Полученная расчетная зависимость ТДА кислорода от времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем достаточно хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований (рис. 2).

Значения производительности МА, полученные расчетным и экспериментальным путем, представлены на рис. 3. Расчетная кривая совпадает с экспериментальными данными с приемлемой точностью.

С использованием формулы (33) была выполнена оценка производительности образца МА пневмодозаторного типа при  $N = 30$  циклов/ч (т.е. времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем 120 с в каждом цикле) в зависимости от времени непрерывной работы аппарата в данном режиме (рис. 4). Температура теплоносителя была принята равной 400°C.

На рисунке 5 представлена расчетная оценка временной зависимости производительности МА с непрерывным расходом теплоносителя через реакционную емкость при постоянной температуре. Расчет выполнен по разработанной методике для МА с геометрическими характеристиками реакционной емкости, приведенными в табл. 1. Предполагалось, что давление, создаваемое побудителем расхода теплоносителя МА, постоянно в процессе работы МА и составляет 2 кПа, что соответствует расходу теплоносителя через засыпку в исходном состоянии 0,5 м<sup>3</sup>/ч; температура теплоносителя была принята равной 400°C.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методика расчета основных характеристик массообменных аппаратов. Методику можно использовать для расчета параметров МА с непрерывным расходом теплоносителя через реакционную емкость (МА со встроенным насосом или МА с нагревателем) и дискретным принципом работы (МА пневмодозаторного типа). Данная методика позволяет рассчитать и учесть зависимость ТДА кислорода на выходе из МА от времени взаимодействия оксида свинца с теплоносителем, выполнить оценку производительности МА, учитывая изменения размеров сфероидов PbO.

2. Проведена апробация разработанной методики расчета с использованием образца МА пневмодозаторного типа, проходившего испытания на циркуляционном стенде ТТ-2М, со свинцово-висмутовым теплоносителем. Результаты расчета достаточно хорошо согласуются с экспериментом.

3. Разработанная методика расчета МА позволит определить основные ха-

теристики работы аппаратов на стадии их проектирования и подобрать оптимальные конструкции МА для конкретных объектов регулирования. Методика также позволяет прогнозировать изменение производительности МА при длительной эксплуатации.

4. Предполагается продолжение работ по развитию и совершенствованию методов расчета массообменных аппаратов. Планируется подтверждение методики расчета растворения PbO в МА на основании результатов ресурсных испытаний образцов МА.

### **Литература**

1. Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш., Симаков А.А. и др. Твердофазная технология регулирования кислорода в тяжелых жидкокометаллических теплоносителях//Новые промышленные технологии. ЦНИЛОТ. – 2004. – №3. – С. 30-34.
2. Патент 2246561 РФ, МПК C23F11/00. Способ поддержания коррозионной стойкости стального циркуляционного контура с соединением теплоносителем и массообменное устройство для его реализации (варианты)/П.Н. Мартынов, Р.Ш. Асхадуллин, А.А. Симаков и др. 2005.
3. Аксельруд Д.А., Молчанов А.Д. Растворения твердых веществ. – М.:Химия, 1977. – 272 с.
4. Аэроп М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. – Л.:Химия, 1979. – 176 с.
5. Мартынов П.Н., Асхадуллин Р.Ш., Легких А.Ю., Симаков А.А. Экспериментальные исследования усовершенствованного массообменного аппарата с твердофазным источником кислорода применительно к технологии теплоносителя 44,5%Pb-55,5%Bi// Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 161-168.

Поступила в редакцию 24.09.2012

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕДОГРЕВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ОРГАНАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЫХОДЕ ИЗ ТВС РЕАКТОРА ВВЭР-1000

**В.И. Белозеров, Е.В. Варсеев, В.В. Колесов**

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ» г. Обнинск



Погрешности измерения среднесмешанной температуры на выходе из активной зоны реактора ВВЭР существенно зависят от протечек теплоносителя, не догретого до проектной температуры, через центральные трубы для поглощающих элементов в кассетах – так называемого «пэльного» эффекта. В работе решена задача по моделированию поля температур на выходе из реактора ВВЭР-1000 с целью оценки влияния эффекта на показания термопар по радиусу активной зоны при внутриреакторных измерениях. Задача решена в два этапа. Было рассчитано энерговыделение в элементах активной зоны серийного реактора ВВЭР-1000 с использованием нейтронно-физического кода MCNP. Температурное поле рассчитывалось с использованием пакета программ вычислительной гидродинамики OpenFOAM и распределения энерговыделения, полученного на первом этапе расчета. Результаты, полученные с помощью разработанной методики, находятся в хорошем согласии с данными реакторных измерений и расчетами других авторов. Результаты позволили оценить «пэльный» эффект в различных местах по радиусу активной зоны реактора ВВЭР-1000.

**Ключевые слова:** водоохлаждаемый реактор, метод Монте-Карло, открытый пакет OpenFOAM, «пэльный» эффект; тепловыделяющая сборка (ТВС), поглощающий элемент (ПЭЛ).

**Key words:** water-cooled reactor, Monte Carlo method, open source toolbox OpenFOAM; Absorber effect; fuel rod assembly (FRA); Absorber rod of FRA.

## ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения безопасной эксплуатации реакторной установки необходимо наличие точной и оперативной информации о распределении полей энерговыделения, температуры и других теплотехнических и ядерно-физических параметров внутри активной зоны и в циркуляционных петлях. Эту задачу выполняет система внутриреакторного контроля (СВРК), в состав которой входят датчики, линии связи, электронная измерительная аппаратура, а также ЭВМ, использующая алгоритмы и программы для обработки полученной информации. Точность, на-

---

© В.И. Белозеров, Е.В. Варсеев, В.В. Колесов, 2013

дежность и быстродействие мониторинга условий работы ядерного топлива являются основой обеспечения ядерной и радиационной безопасности реакторной установки. Система СВРК работает на большинстве атомных электростанций (АЭС) [1].

По мере накопления опыта эксплуатации реакторов ВВЭР и в связи с изменяющимися требованиями энергосистем происходит непрерывное усовершенствование характеристик реакторов ВВЭР с одновременным улучшением конструкции и состава тепловыделяющих сборок (ТВС). В настоящее время на 104%-ной мощности работают первый блок Ростовской АЭС и второй блок Балаковской АЭС с реакторами ВВЭР-1000, изучается возможность и экономическая эффективность повышения мощности вплоть до 112% четвертого блока Балаковской АЭС [2]. При этом основным является повышение надежности с одновременным увеличением ресурса энерговыработки. Все усовершенствования, безусловно, должны обеспечивать выполнение требований по безопасности.

Необходимость тщательного контроля режима работы активной зоны вызвана тем, что уже при номинальной мощности температура воды на поверхности оболочек некоторых твэлов близка к кипению (а на поверхности отдельных твэлов достигается местное поверхностное кипение) [3]. При уменьшении давления в первом контуре всего на 2 кгс/см<sup>2</sup> (это допустимый диапазон отклонений в работе автоматики) и неизменном фактическом тепловом потоке точка кипения приближается на 1.5 градуса. Таким образом, при эксплуатации реакторов даже на номинальной мощности требуется оперативный контроль основных теплогидравлических и нейтронно-физических характеристик активной зоны, который возлагается на СВРК.

С учетом необходимости контроля запаса до кризиса теплообмена и определения подогрева теплоносителя в реакторе формулируется требование определения абсолютной температуры на выходе из ТВС с погрешностью, не превышающей  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ .

Для определения абсолютной температуры теплоносителя на выходе из ТВС применяют термопары. Однако в погрешность измерения температуры существенный вклад вносят конструкции ТВС и ее головной части [4, 5].

Измерение энерговыделения производится в 64-х тепловыделяющих сборках, расположенных по сечению активной зоны, а температура теплоносителя измеряется термопарой на выходе из 95-ти ТВС. Теплоноситель движется снизу вверх. Чувствительный элемент термопары размещается в полости цилиндрической части головки кассеты (рис. 1). В эту полость поступает теплоноситель из направляющих каналов (НК) поглощающих элементов (ПЭЛ) и пучка твэлов через отверстия в плитах пружинного блока головки кассеты. Теплоноситель, выходящий из НК, имеет более низкую температуру по сравнению с выходящим из пучка твэлов. Эти потоки имеют характер отдельных струй и до места установки чувствительного элемента термопары полностью не перемешиваются.

Перемешивание нагретого теплоносителя с холодными струями, так называемый «пэльный» эффект, искажает величину подогрева теплоносителя в ТВС и влияет на достоверность получаемой информации о температуре на выходе из ТВС. Он возникает из-за существования протечек холодного теплоносителя через направляющие каналы ПЭЛ. При этом в разных ТВС эффект проявляется по-разному.

В 68-и ТВС без поглощающих элементов «пэльный» эффект возникает, в основном, из-за того, что теплоноситель, практически не нагреваясь, свободно протекает через пустые направляющие каналы, в то время как в 95-ти каналах с кластерами системы управления и защиты (СУЗ) «пэльный» эффект проявляется при движении ПЭЛ в канале.

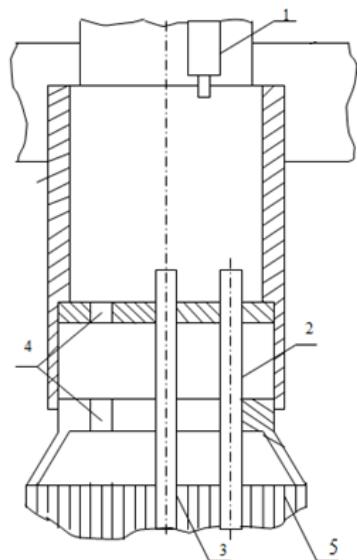


Рис. 1. Схема установки термопары в головке ТВС: 1 – канал для установки датчика ТК; 2 – трубы ПЭЛ (18 шт.); 3 – центральная трубка; 4 – отверстия в плитах пружинного блока (3 шт.); 5 – пучок твэлов

«Пэльный» эффект являющийся методической погрешностью, должен устраняться введением поправок [6]. Актуальной задачей является выработка рекомендаций по введению поправок к показаниям термопар, установленных на выходе из кассет серийного реактора ВВЭР-1000. Поставлена и решена задача по моделированию «пэльного» эффекта с помощью современных программных средств. Величина поправок может быть получена для каждой из кассет с поглощающими стержнями (ПС) СУЗ расчетным путем.

Расчет пространственного струйного эффекта должен включать в себя расчеты трехмерного энерговыделения и переноса массы, импульса и тепла в кассете. Целью работы является проверка работоспособности такой методики расчета. На следующем этапе необходимо проанализировать все ли ТВС с ПС СУЗ разные, одинаковы ли места установки термопар, можно ли сократить объем расчетов. После выполнения нейтронно-физического расчета, который можно сделать один раз для всей зоны, проводится серия теплофизических расчетов для ТВС с ПС СУЗ, на основании выполненной которых можно получить рекомендации о поправках к показаниям термопар в зависимости от места их установки на выходе из ТВС.

Для подтверждения работоспособности предложенной расчетной методики необходимо провести сравнение с данными измерений датчиков на выходе из ТВС, а также данными, полученными по инженерной методике, используемой в [6], для учета и устранения «пэльного» эффекта. Кроме того, в работе проводилось подтверждение инженерной расчетной методики для Балаковской АЭС (БалАЭС).

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для моделирования процессов, влияющих на измеряемую термопарой температуру, была разработана методика, состоящая из двух частей.

1. Нейтронно-физический расчет с помощью кода MCNP [7] с целью получения энерговыделения в ТВС и внутри трубок ПЭЛ и его распределения по радиусу активной зоны. Геометрический модуль программы позволяет описывать (практически без упрощений) любые системы в трехмерной геометрии. В расчете использовалась возможность программы MCNP моделировать нейтронные и фотонные поля с помощью метода Монте-Карло.

2. Теплогидравлический расчет с помощью пакета [8] с целью получения температуры в местах расположения термопар на выходе из ТВС. Пакет OpenFOAM представляет собой набор программных средств, написанных на языке программирования C++, доступных с исходным кодом. Пользователю предоставляется возможность менять модуль решения систем уравнений и библиотеки, содержащие модели сплошной среды, модели турбулентности, свойства идеальных газов, по собственному усмотрению [9].

При постановке задачи рассматривался случай, когда термопара находится под влиянием струи из НК, не догретой до номинальной. Предполагалось, что реактор работает на номинальной мощности, что соответствует условиям эксперимента.

По полученным результатам оценивалась температура в точке расположения термопары с учетом максимального влияния «пэльного» эффекта, которая сравнивалась с результатами инженерных расчетов на Балаковской АЭС и экспериментом.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР**

Теплоноситель в НК нагревается за счет отбора тепла от омываемых конструкций канала и непосредственно энерговыделения в теплоносителе от внутриреакторного нейтронного и гамма-излучений. При решении задачи моделировалось энерговыделение, которое использовалось в теплофизической части расчетов.

В общем случае на «пэльный» эффект влияет распределение обогащения по радиусу активной зоны. Однако ввиду отсутствия данных по истории перегрузок и с целью упрощения поставленной задачи была смоделирована часть свежей загрузки реактора с одинаковым обогащением топлива во всех ТВС по урану-235 4.4%. На этапе разработки методики такая идеализация загрузки зоны является приемлемой.

Расчетная модель представляет собой надкритическую систему из 14-ти ТВС в борированной воде, имитирующую активную зону ВВЭР-1000. Каждая ТВС смоделирована в реальную величину в виде пучка твэлов с головкой и хвостовиком. В твэлах предусмотрены центральные отверстия в топливных таблетках и зазоры между оболочкой и топливом.

По радиусу загрузки от центра к внешней границе в головках ТВС на месте установки термопар определялось энерговыделение в системе. Затем путем экстраполяции расчетным точкам ставились в соответствие экспериментальные точки, в которых проводился замер подогрева непосредственно в реакторе на четвертом блоке Балаковской АЭС.

Так как по программе MCNP результаты получаются в расчете на одно деление, то получившееся энерговыделение нормировалось на значение номинальной мощ-

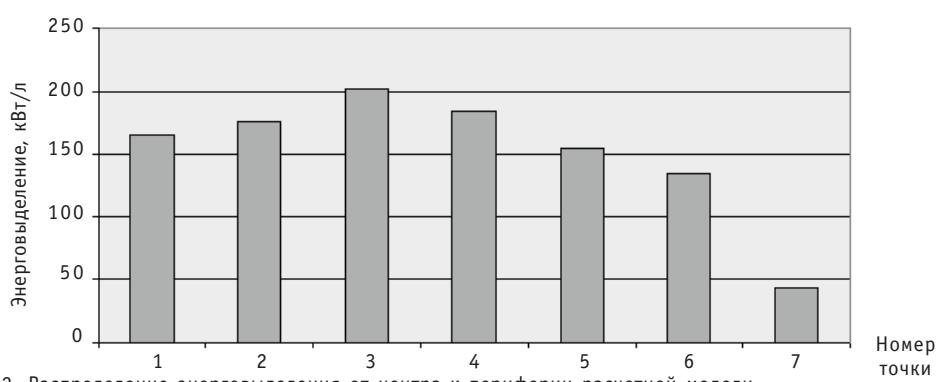


Рис. 2. Распределение энерговыделения от центра к периферии расчетной модели

ности реактора [10]. В результате получены значения распределения энерговыделения в точках, лежащих на различных радиусах расчетной модели (рис. 2).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИКИ НК ПЭЛ ТВС ВВЭР- 1000

Для расчета теплообмена в ТВС была разработана двумерная модель направляющего канала ПС СУЗ ТВС реактора ВВЭР-1000. НК моделировался по всей длине. Решалась сопряженная задача теплообмена с расчетом единого температурного поля в стенках и теплоносителе. Для корректной математической постановки граничных условий реализованы стабилизационные участки на входе и выходе расчетной области. В твердотельной модели сетка строится с помощью стандартных средств пакета OpenFOAM.

В работе использовался стандартный модуль численной гидродинамики, дополненный авторами свойствами воды и водяного пара из международной библиотеки IAPWS.

Теплогидравлическая модель течения теплоносителя не менялась. Для расчета турбулентного течения была выбрана наиболее часто используемая модель при решении реальных инженерных задач ( $k$ - $\epsilon$ -модель турбулентности [11]), в которой решаются уравнения транспорта кинетической энергии и диссипации турбулентности. Модифицированный модуль решает усредненные уравнения Навье-Стокса методом PISO, алгоритм которого следующий [12]:

1. Установка граничных и начальных условий на входе в канал и на его стенках.
2. Решение уравнения сохранения массы (расчет промежуточных скоростей)

$$\frac{\partial \rho U}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho U) = 0. \quad (1)$$

3. Расчет расходов через границы ячеек.
4. Решение уравнения сохранения импульса

$$\frac{\partial \rho U}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho U \cdot U) = -\nabla \cdot P - \nabla \cdot [(\mu + \mu^T) \nabla \cdot U] + \rho \cdot g. \quad (2)$$

5. Корректировка расходов через границы ячеек.
6. Корректировка скоростей по новому полю давлений.
7. Решение уравнения сохранения энергии

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho U \cdot C_p T) - \nabla \cdot [(\lambda + \lambda^T) \nabla T] = q_v. \quad (3)$$

8. Обновление граничных условий.
9. Итерационное повторение с шагов 3–8 до достижения необходимой точности.
10. Шаги 1–9 выполняются для следующего момента времени.

Кроме того, в модуле решается система уравнений сохранения (массы, энергии и три скалярных уравнения для компонент векторного уравнения сохранения импульса). Плотность при неизотермическом режиме течения рассчитывалась с помощью библиотеки misca [13], реализованной на основе открытой библиотеки freesteam [14].

Уравнение энергии, которое в пакете программ изначально записывалось в виде

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho U \cdot C_p T) - \nabla \cdot [(\lambda + \lambda^T) \nabla \cdot T] = 0, \quad (4)$$

было изменено таким образом, чтобы возможно было решать задачу с источником:

$$\frac{\partial \rho C_p T}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho U \cdot C_p T) - \nabla \cdot [(\lambda + \lambda^T) \nabla \cdot T] = q_v, \quad (5)$$

где  $C_p$  – удельная изобарная теплоемкость, Дж/кг·К;  $T$  – температура теплоносите-

ля,  $K$ ;  $\rho$  – плотность теплоносителя,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\lambda$  – теплопроводность теплоносителя,  $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ ;  $\lambda^T$  – турбулентная теплопроводность теплоносителя,  $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ ;  $q_v$  – источник объемного энерговыделения,  $\text{МВт}/\text{м}^3$ ;  $U$  – скорость теплоносителя,  $\text{м}/\text{с}$ .

На следующем этапе данные нейтронно-физического расчета использовались для задания в уравнении (5) объемного энерговыделения  $q_v$ .

Модифицированный таким образом модуль решения системы уравнений полностью готов к решению поставленной задачи.

## ГРАНИЧНЫЕ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

Для математической постановки задачи и дальнейшего решения необходимы граничные и начальные условия на входе/выходе из канала и на его стенках:

- давление на выходе из трубки ПЭЛ – 160 атм;
- скорость на входе в канал – 5 м/с (средняя скорость теплоносителя в активной зоне);
- скорость на стенках канала – 0 м/с (условие прилипания);
- параметры на входе для стандартной  $k$ - $\epsilon$ -модели турбулентности ( $k$  и  $\epsilon$ ) рассчитаны с помощью программы kOmegaEpsilon 3.5, реализованной на языке C++ [15] (эта же программа рассчитывает гидравлическое сопротивление, энергию генерации и диссиpации в канале в зависимости от его геометрии и режима течения теплоносителя в нем);
- объемное энерговыделение  $q_v$ , полученное с помощью кода MCNP.

Для определения удельного энерговыделения в нейтронно-физическом расчете использовались параметры эксперимента на реакторе – 3038 МВт тепловых.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В результате последовательных нейтронно-физического расчета с помощью кода MCNP, перенормировки значений энерговыделения  $q_v$  и теплогидравлического расчета были получены подогревы теплоносителя в кассете, включая подогрев в НК. Полученные данные есть подогрев с учетом «пэльного» эффекта, т.е. связанный с ним недогрев до номинальной температуры проявляется максимально.

Расчетные значения локальных подогревов теплоносителя сравнивались с экспериментальными величинами с учетом «пэльного» эффекта при его измерении и полученными в инженерном расчете для Балаковской АЭС (рис. 3, табл. 1). Результаты расчета в 14-ти точках ставились в соответствие 17-ти экспериментальным показаниям путем экстраполяции. Результаты приведены для 17-ти ТВС, расположенных по радиусу (от центра к периферии).

Расчетная методика, использованная в инженерном расчете для Балаковской АЭС, заключается в обработке результатов эксперимента с целью получения коэффициента, характеризующего степень отклонения показаний ТП от расчетного подогрева.

Для сравнения с данными эксперимента Балаковской АЭС расчетные результаты авторов умножались на коэффициенты неравномерности энерговыделения, вследствие чего относительное расхождение расчета и эксперимента составляет от 0.2% в центре до 25% на периферии активной зоны. Это расхождение, вероятно, связано с более высокими расходами теплоносителя через периферийные ТВС. В среднем расхождение равно 10%, что соответствует результатам расчета и анализу других авторов [6].

При сравнении результатов учитывалось, что в поставленной задаче рассматривался крайний случай, когда термопара находится под влиянием только недогретой струи из НК. Именно поэтому в расчете авторов «пэльный» эффект прояв-

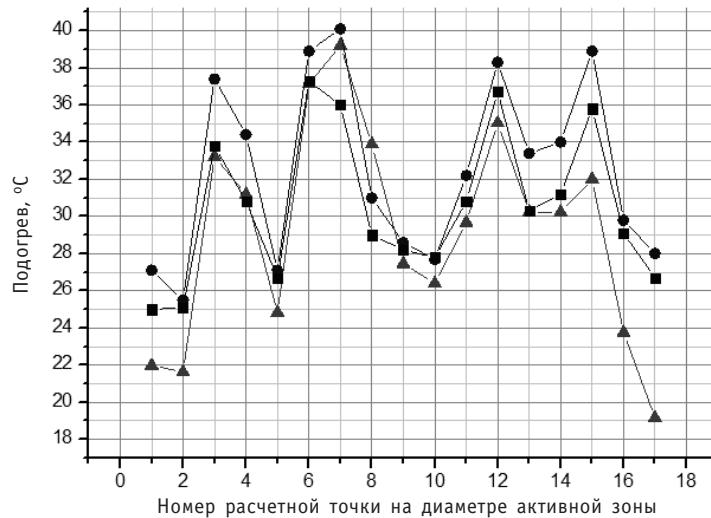


Рис. 3. Сравнение расчетных локальных подогревов теплоносителя для различных ТВС, расположенных по радиусу активной зоны, полученных следующими способами: ■ – расчет авторов; ● – инженерный расчет для БалАЭС; ▲ – эксперимент

Таблица 1

**Результаты эксперимента (I), расчетов авторов (II) и Балаковской АЭС (III) [10]**

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
I	21.9	21.6	33.2	31.1	24.8	37.1	39.2	33.8	27.4	26.3	29.6	35.0	30.2	30.2	32.0	23.7	19.2
II	25	25.1	33.8	30.8	26.7	37.3	36	29	28.2	27.8	30.8	36.7	30.3	31.2	35.8	29.1	26.7
III	27.1	25.5	37.4	34.4	27.1	38.9	40.1	31	28.6	27.7	32.2	38.3	33.4	34	38.9	29.8	28

ляется максимально (температура, получаемая в расчете без какой-либо добавки горячей воды из межтвэльного пространства), в то время как в расчете, проведенном на Балаковской АЭС, это не учитывается. За счет этого результаты, полученные при расчетах на Балаковской АЭС, получились несколько выше эксперимента.

В наших расчетах учитывалась только недогретая вода, проходящая через НК. Доля горячей воды, необходимой для нивелирования «пэльного» эффекта, составляет 8–10% и представляет собой величину «пэльного» эффекта, который может быть учтен в термоконтроле поправкой на учет теплоносителя из межтвэльного пространства. При этом величина «пэльного» эффекта является значительной для половины ТВС активной зоны, исключая крайние. Результаты инженерного расчета для Балаковской АЭС показывают, что значительное расхождение с расчетом существует в точках для двух третей ТВС активной зоны.

Средняя температура на выходе из активной зоны по расчетам авторов – 29,2°C, по расчету для Балаковской АЭС – 32,5°C, для эксперимента это значение равно 30,6°C. Таким образом, обнаружено, что величина «пэльного» эффекта, т.е. доля холодной воды, попадающей на термопару, составляет менее 10%.

Естественно, что в расчете авторов из-за максимального расчетного «пэльного» эффекта интегральная температура занижена по отношению к температуре экспериментальной. Расчет для станции дает значение температуры в среднем почти на 7% больше номинальной. Возможно, это связано с влиянием коэффициентов неравномерности энерговыделения на расхождения расчета для станции с

данными эксперимента. Точно пока это влияние определить невозможно из-за небольшой статистики измерений.

## ВЫВОДЫ

В результате проведенной работы разработан метод совместного решения нейтронно-физических и теплогидравлических задач.

Расчет показал, что «пэльный» эффект оценивается в среднем в 10% подогрева на ТВС реактора ВВЭР-1000. Это совпадает с оценками и анализом других авторов и находится в хорошем согласии с данными реакторных измерений, что дает основание применять разработанную методику для проведения совместных нейтронно-физических и теплогидравлических прецизионных расчетов, в том числе и для оценки «пэльного» эффекта.

Величина «пэльного» эффекта для периферийных рядов ТВС существенно отличается от величины «пэльного» эффекта для ТВС центральной части активной зоны, что связано с различием энерговыделения для центральных и периферийных ТВС.

На практике на результаты эксперимента влияет не только положение ТВС в активной зоне, но и ряд других параметров – конструкция ТВС, обогащение топлива, история перегрузок, текущее положение органов СУЗ. По результатам расчета для Балаковской АЭС был сделан вывод, что в чистом виде выделить зависимость «пэльного» эффекта от одного фактора не представляется возможным, так как он одновременно зависит от достаточно большого числа факторов. В нашем расчете так же, как и в расчете для Балаковской АЭС, учитывалось влияние на «пэльный» эффект только одного параметра – положение ТВС в активной зоне.

В достоверности инженерного расчета для Балаковской АЭС возникали сомнения из-за малой статистики измерений. Проведенный в данной работе расчет подтверждает его представительность.

## Литература

1. Брагин В.А. и др. Системы внутриреакторного контроля АЭС с реакторами ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Шутиков А.В. Освоение и опыт эксплуатации АЭС на повышенном уровне мощности. Перспективы дальнейшего повышения мощности до 110 и 112%. VII Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». – М., 2010.
3. Крылов Д.В. Новые виды ядерного топлива/Международный форум «АТОМЭКСПО 2011». – М., 2011.
4. Никонов С.П., Журбенко А.В., Семченко Ю.М. Оценка влияния внутриреакторных характеристик реактора ВВЭР-1000 на точность расчета теплогидравлических параметров/Доклад на VII МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» ОКБ «Гидропресс» (Подольск, Россия, 17-20 мая 2011 г.).
5. Шилов Д.Л., Романов А.И., Самойлов О.Б., Фальков А.А. Технические характеристики и результаты эксплуатации ТВСА ВВЭР-1000. Доклад на 7-й МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия, 17-20 мая 2011 г.
6. Кобзарь Л.Л. Разработка рекомендаций по введению поправок к показаниям термопар, установленных на выходе кассет серийного реактора ВВЭР-1000/Рабочий материал. РНЦ «Курчатовский институт» и ОАО «Твэл». – М., 1998
7. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. X-5 Monte Carlo Team. Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-03-1987 (April, 2003).
8. OpenFOAM User Guide Version 1.6. 2009.
9. OpenFOAM Programmer's Guide Version 1.6. 2009.
10. Колесов В.В. Использование программы MCNP для проведения нейтронно-физического рас-

## ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕПЛОГИДРАВЛИКА

---

чета ядерных реакторов: Учеб. пособие по курсу «Физический расчет ядерных реакторов». – 06-нинск: ЙАТЭ, 2008. – 44 с.

11. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003 – 840 с.

12. WIKI страница OpenFOAM URL [http://openfoamwiki.net/index.php/The\\_PISO\\_algorithm\\_in\\_OpenFOAM](http://openfoamwiki.net/index.php/The_PISO_algorithm_in_OpenFOAM).

13. Open Source – CFD URL <http://www.os-cfd.ru/> (дата обращения 26 апреля 2010).

14. Open source implementation of international-standard IAPWS-IF97 steam tables [электронный ресурс] // <http://freesteam.sourceforge.net/> (дата обращения: 26 апреля 2010).

15. kOmegaEps 3.5 URL: <http://sourceforge.net/projects/turbcalc/files/kOmegaEps> (дата обращения: 26 апреля 2010).

Поступила в редакцию 20.10.2011

# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МОДЕЛИ ПАРОГЕНЕРАТОРА БРЕСТ-ОД-300

**В.А. Грабежная\*, А.С. Михеев\*, Ю.Ю. Штейн\*, А.А. Семченков\*\***

\*ГНЦ РФ - Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского, г. Обнинск

\*\*ОАО «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежаля», г. Москва



Приводятся результаты испытания трехтрубной модели парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300, обогреваемой свинцом, при докритическом (18 МПа) и сверхкритическом (25 МПа) давлении в водяном контуре при расходах воды 80, 100 и 120 % от номинального значения. Экспериментальные данные сравниваются с результатами расчетного моделирования с использованием кода RELAP5/mod 3.2.

**Ключевые слова:** реактор на быстрых нейтронах, модель парогенератора, витой канал, свинец, вода, температурные поля.

**Key words:** fast breeder reactor, model of steam generator, helically coiled tube, liquid lead, water, temperature distribution

## ВВЕДЕНИЕ

В ОАО «НИКИЭТ» разрабатывается проект реакторной установки (РУ) БРЕСТ с реактором на быстрых нейтронах и свинцовым теплоносителем в первом контуре. Рассматриваются различные варианты парогенераторов реакторной установки. Одним из них является парогенератор с витыми трубами.

Разработка проекта РУ БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем в первом контуре началась в НИКИЭТ в начале 2000-х гг. В том проекте РУ парогенератор (ПГ) прямоточного типа без промежуточных смесительных устройств был рассчитан на сверхкритические параметры по водяному контуру. Он представлял собой бухту витых теплообменных труб с углом наклона к горизонту в 8°. В настоящее время данная конструкция ПГ РУ БРЕСТ рассматривается в качестве одного из возможных вариантов ПГ, обогреваемого свинцовым теплоносителем, но с большим углом наклона – от 24 до 30° к горизонту. В одном из вариантов новой конструкции ПГ в качестве рабочего давления второго контура принято 18 МПа вместо сверхкритического давления, которое было заложено в ранний проект ПГ конструкции ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

В реальной конструкции движение греющего теплоносителя опускное, однако в модели организовать подобное затруднительно. Поэтому для изучения влияния вида обтекания (поперечное и продольное) на коэффициент теплообмена со стороны греющего теплоносителя в ГНЦ РФ-ФЭИ были проведены эксперименты на

моделях парогенераторов при продольном обтекании вертикальной трубы и поперечном обтекании змеевика свинцом. Для этого были созданы две малые модели: одна однотрубная с продольным обтеканием свинцом теплопередающей трубы, вторая с поперечным обтеканием теплопередающей трубы [1].

Эксперименты, проведенные на модели с продольным обтеканием теплопередающей трубы, показали удовлетворительное согласие опытных значений коэффициентов теплообмена со стороны свинца с расчетными значениями, полученными по известным эмпирическим корреляциям. Для корректного переноса экспериментальных данных по теплообмену к воде, полученных при продольном течении теплоносителя (экспериментальная модель), на случай поперечного обтекания витых теплопередающих трубок теплоносителем (натурный ПГ) необходимо правильно считать теплоотдачу от жидкого металла при поперечном обтекании пучка витых труб. Однако, как показали эксперименты [1], а позднее и эксперименты [2], проведенные с поперечным омыванием тяжелым металлом пучка труб, опытные значения коэффициентов теплообмена существенно отличаются от существующих расчетных рекомендаций.

Принципиальная программа исследований на рассматриваемой модели парогенератора направлена на изучение теплообмена теплогидравлической устойчивости парогенерирующих труб и определение выходных параметров пара, подтверждающих (или опровергающих) расчетные проектные показатели. Данные, полученные в процессе испытаний на этой модели парогенератора, будут являться консервативными для нового парогенератора в части теплообмена в закризисной зоне, термодинамической неравновесности пароводяного потока.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Исследование работы трехтрубной секции (двухмодульной) модели парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300 проводилось в ГНЦ РФ-ФЭИ на стенде СПРУТ (стенд для проведения работ по универсальной тематике), который состоит из двух контуров: контура свинца и контура воды высокого давления, технологическая схема которого представлена в [1], а подробное описание основных элементов контуров (насосы, подогреватели, компенсаторы объема и др.) можно найти, например, в [3].

После завершения монтажа стенда контур воды был испытан давлением 32 МПа, теплопередающие трубы модулей парогенератора - 53 МПа.

Технологическая схема рабочего участка с моделью парогенератора представлена на рис. 1. На схеме указано расположение контурных термопар, расходомеров, датчиков активности кислорода (ДАК), вентилей и некоторого другого оборудования [4].

Модель парогенератора состоит из двух идентичных трехтрубных секций (модулей). Разработчиком модели, ее электрического обогрева, тепловой изоляции и металлоконструкций, связывающих две трехтрубные модели, был ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

Корпус модуля парогенератора выполнен из трубы диаметром 76×4,5 мм. Модель парогенератора по конструктивным характеристикам (высотные отметки, движение среды: опускное, винтовое подъемное) максимально приближена к конструкции парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300 (вариант 2000 г.). В качестве диаметра навивки трехтрубного пучка выбран средний диаметр навивки теплопередающих трубок натурного парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300, 1600 мм (вариант 2000 г.). Материал теплопередающих трубок соответствует материалу натурных парогенерирующих труб, примененных в проекте РУ БРЕСТ-ОД-300. Наружный

диаметр теплопередающих труб – 17 мм, толщина стенки теплопередающей трубы – 3,0 мм, осевой шаг расположения труб – 25 мм. По длине витой трубы было установлено 15 дистанционирующих элементов, расположенных на расстоянии 750 мм друг от друга.

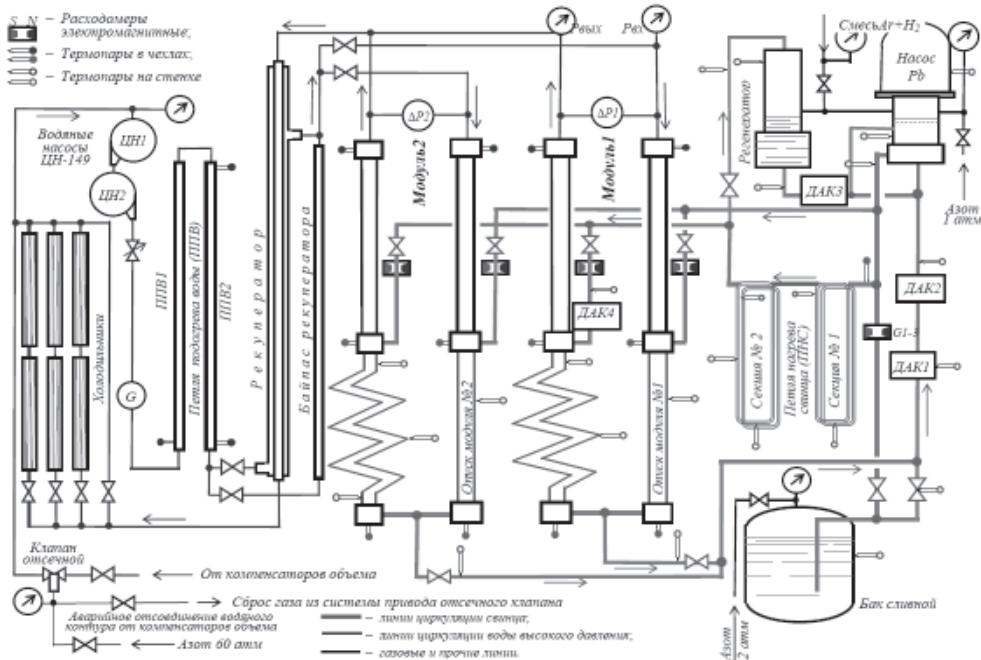


Рис. 1. Схема свинцового контура с моделью парогенератора [4]

Температура свинца и воды на входе и выходе из секции парогенератора изменяется с помощью термопар, помещенных в поток теплоносителей. Термопары также установлены в двух сечениях по ходу водяного тракта на трех теплопередающих трубках, одна из которых имеет гидравлическую нетождественность. Для измерения температуры корпуса ПГ секция оснащена термопарами, расположенными с переменным шагом. В одном сечении на расстоянии 19 м от входа по свинцу по периметру корпуса модели размещены четыре термопары для выявления возможных разверток температуры свинца. Термопары, установленные в потоке, изготовлены из термопарного хромель-алюмелевого кабеля диаметром 0,1 мм и заключены в капилляры диаметром 0,5 мм. Спай термопар, приваренные к стенке, изготовлены из хромель-алюмелевого кабеля диаметром 0,5 мм.

## ОПИСАНИЕ РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ

На рисунке 2 представлена нодализационная схема одного из двух испытываемых модулей. Схема составлена для кода RELAP5/mod 3.2. Описание элементов приведено в табл. 1. Эта схема представляет собой упрощённую расчёту схему парогенератора для реактора БРЕСТ-ОД-300.

В расчётной схеме можно выделить три тракта: 1 – водяной тракт; 2 – тракт свинца опускного участка; 3 – тракт свинца подъёмного участка. Водяной тракт имеет входной объём под номером 001, выходной объём под номером 399. Тракт свинца на опускном участке имеет начальный объём 500 и конечный 513, на подъёмном участке соответственно объёмы 400 и 413. Водяной и свинцовый тракты обмениваются друг с другом теплом через тепловые структуры 1100–1102. Нод

18 водяного тракта не связан со свинцовыми трактами, так как моделирует небольшой участок стенда, расположенный между сливами потоков свинца с опускного и подъемного участков.

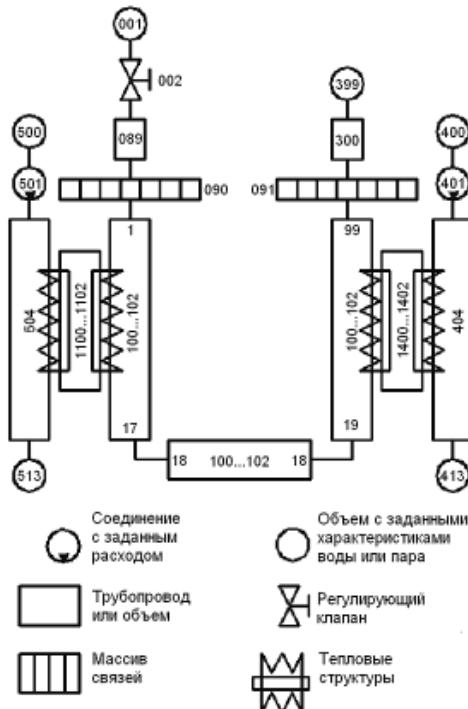


Рис. 2 . Расчёчная схема

Таблица 1

#### Описание расчётной схемы

Номер элемента	Элементы в коде RELAP5	Описание
089	pipe	Водяной коллектор
100...102	pipe	Три парогенерирующие трубы
1100...1102 1400...1402	heat structure	Тепловые связи гидравлических элементов (тепловые структуры)
401, 501	tmdpjn	Соединение с заданным расходом
090	mpljpn	Входная трубная доска
091	mpljpn	Выходная трубная доска
400, 413 500, 513	tmdpvol	Источник и сток для свинцового тракта соответственно на витом подъемном участке и опускном
001, 399	tmdpvol	Источник воды и сток пара для водяного тракта
300	pipe	Паровой коллектор
404	pipe	Тракт свинца на подъемном участке ПГ
504	pipe	Тракт свинца на опускном участке ПГ
002	valve (srvvlv)	Регулирующий клапан

В коде RELAP5/mod 3.2 отсутствует возможность задать в качестве теплоносителя жидкий свинец. Так как от модели свинцового тракта необходимо только соответствие температур и коэффициента теплоотдачи, то было принято решение заменить в модели свинец на пар и скорректировать расходы пропорционально

отношению теплоёмкостей свинца и пара. Давление пара в «свинцовом» контуре было принято равным 2,738 МПа, при этом давлении отклонения от среднего значения теплоёмкости пара в заданном диапазоне температур не превышают  $\pm 0,25\%$ . Так как теплоёмкость свинца равна 147,3 Дж/(кг·К), то для соответствия температуры модельного пара температуре свинца расход пара в расчётной модели должен быть меньше расхода свинца в  $2238,7/147,3 \approx 15,2$  раза. Для стационарных режимов соответствие объёма контура модели и реального объёма свинцового контура не важно. Коэффициент теплоотдачи рассчитывался для каждого режима до начала моделирования и задавался в виде таблицы. Число Nu для свинца вычислялось по формуле [5]

$$Nu = 6 + 0,02 \cdot Re^{0,8}$$

При задании расходов свинца и, соответственно, расчёте коэффициентов теплоотдачи для номинального режима были приняты следующие условия:

- массовая скорость воды соответствует массовой скорости теплоносителя на витом участке в разрабатываемом парогенераторе для реактора БРЕСТ-ОД-300;
- наличие недогрева воды до температуры насыщения при выходе из опускного участка при различных расходах воды;
- температура свинца, обогревающего опускной участок, на входе равна 420°C;
- температура свинца, обогревающего подъёмный участок, на входе равна 540°C.

В результате расходы свинца в номинальном режиме были приняты равными  $\sim 0,7$  кг/с на опускном участке, что соответствует расходу пара 0,046 кг/с в расчетной модели, и  $\sim 10,3$  кг/с на подъёмном участке, соответственно, расход пара в расчетной модели 0,6776 кг/с.

## ИСПЫТАНИЯ СЕКЦИИ МОДЕЛИ ПАРОГЕНЕРАТОРА

Экспериментальное исследование работы трехтрубного модуля парогенератора было направлено на подтверждение проектных характеристик в различных режимах работы, создание банка результатов экспериментов для дальнейшей верификации расчетных кодов, описывающих теплогидравлические процессы, происходящие в парогенерирующей установке.

Перед проведением испытания модуля при номинальных параметрах были проведены пусконаладочные работы, которые включали в себя отладку и проверку работоспособности различных узлов и аппаратуры установки, тарировку термопар и определение тепловых потерь.

Методика проведения экспериментов была следующей. Проводился разогрев сливного бака, в котором помещен свинец, и свинцового контура с помощью нихромовых нагревателей до температуры 450–500°C. При заданном давлении в водяном контуре (18 или 25 МПа) с помощью вентилей тонкой регулировки устанавливали заданный расход воды через модуль циркуляционным насосом. С помощью регулируемого электрического подогревателя устанавливали необходимую температуру воды на входе в модуль (340°C). Затем производилось заполнение модуля свинцом при контроле уровня свинца в насосе и регенераторе и устанавливался требуемый расход теплоносителя. В процессе заполнения контура был включен компенсационный электрообогрев корпуса. Устанавливали циркуляцию свинца через опускную и подъемную части модуля парогенератора.

После этого постепенно плавным изменением мощности электрических подогревателей поднимали температуру свинца до заданного уровня: 420°C на входе в опускной по тракту воды участок (стояк) и 540°C на входе в подъемный по тракту воды участок (змеевик). При достижении стационарного режима производилась запись показаний на жесткий диск компьютера.

При неизменных режимных параметрах по свинцовому теплоносителю, при постоянном давлении в контуре воды ( $\sim 18$  МПа) с неизменной ее температурой на входе в модуль витого парогенератора ( $340^{\circ}\text{C}$ ) исследовалось поведение этого парогенератора при разных расходах воды – 80, 100 и 120 % от номинального значения.

При всех тех же режимных параметрах, кроме давления, были проведены опыты при сверхкритическом давлении 25 МПа. В качестве примера на рис. 3 представлено распределение температуры корпуса трехтрубного модуля при давлении воды на входе около 18 МПа для проектного номинального режима.

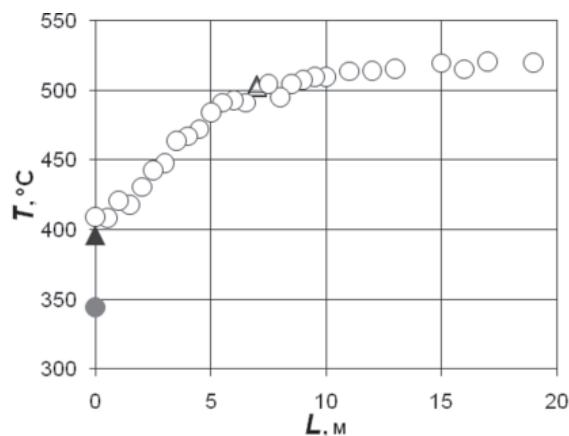


Рис. 3. Распределение температуры адиабатной стенки по длине модуля (расход воды – 100 %  $G_{\text{ном}}$ ,  $P = 18$  МПа):  $\blacktriangle$  – вход (выход) свинца;  $\bullet$  – вход (выход) воды (пара);  $\circ$  – температура корпуса

На длине 7 м от входа воды в подъемный участок по корпусу модуля установлены четыре термопары под углом  $90^{\circ}$ . Как видно из рисунка, разверка температуры адиабатной стенки по периметру не наблюдается.

Температура пара на выходе из модуля во всех экспериментах всегда была выше  $500^{\circ}\text{C}$ . Изменение расхода воды на  $\pm 20\%$  от номинального значения практически не сказывается на величине перегрева пара.

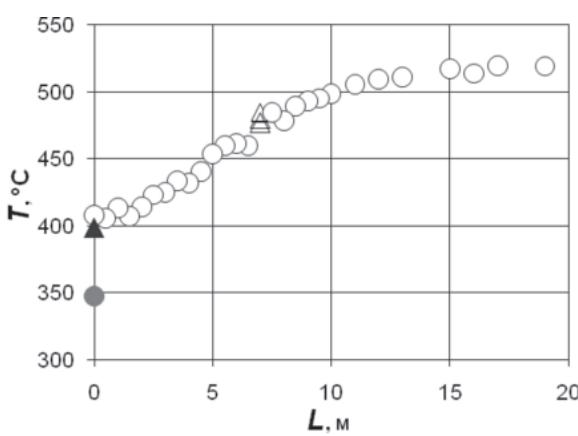


Рис. 4. Распределение температуры адиабатной стенки по длине модуля (расход воды – 100 %  $G_{\text{ном}}$ ,  $P = 25$  МПа, обозначения см. на рис. 3)

На рисунке 4 представлено распределение температуры корпуса модуля при сверхкритическом давлении воды 25 МПа для тех же режимных параметров, что и при докритическом давлении.

Из распределения температуры корпуса при  $P = 18$  МПа видно, что большую часть подъемного участка занимает область перегрева пара с низкими коэффициентами теплообмена. При сверхкритическом давлении (рис. 4), корпус модуля и, следовательно, теплопередающие трубы находятся в менее нагруженном (по температуре) состоянии, чем при докритическом давлении. В экспериментах отмечалось, что при массовой скорости 120% от номинала температура корпуса модуля была ниже 500°C на участке протяженностью 17 м, в то время как при докритическом давлении протяженность этой зоны составляла около 11 м.

Если сравнивать эпюры температуры корпуса при докритическом давлении с эпюрами, полученными при аналогичных режимных параметрах, но при сверхкритическом давлении, можно отметить, что, несмотря на разницу давления почти в 7 МПа, температура пара на выходе из модели слабо зависит от расхода воды и составляет 500–510°C.

Никаких явлений, связанных с локальным ухудшением теплообмена при сверхкритических параметрах, обнаружено не было.

Поскольку во всех режимах на входе в секцию витого парогенератора подавалась не догретая до температуры насыщения вода, а на выходе из нее всегда был перегретый пар, отдельно опыты по сходимости теплового баланса не проводились. Для большинства экспериментов разброс по сходимости теплового баланса не превышал  $\pm 5\%$ .

Одним из условий безопасной работы парогенератора является отсутствие пульсаций расхода, давления и температуры воды (пара) во втором контуре. Поэтому при проведении испытаний уделялось большое внимание вопросам, связанным с возможным возникновением неустойчивости в контуре воды. Однако в проведенных экспериментах витого парогенератора ни в одном из режимов никаких пульсаций расхода воды на входе в модель ( $G1$ ), давления воды на входе в модель ( $Pin1$ ), а также температуры воды на входе ( $T67$  и  $T68$ ), температуры пара на выходе ( $T69$  и  $T70$ ) обнаружено не было. Это наглядно видно из приведенного ниже листинга записи режима с расходом воды 120% от номинального значения (таблица 2).

Таблица 2

#### Запись параметров воды при расходе 120 %

Время	$T67, ^\circ\text{C}$	$T68, ^\circ\text{C}$	$T69, ^\circ\text{C}$	$T70, ^\circ\text{C}$	$G1, \text{кг/с}$	$Pin1, \text{МПа}$
11:39:27	340,5	340,7	507,8	507,6	0,14998	18,644
11:39:38	340,7	341,1	508,0	507,9	0,14951	18,832
11:39:48	341,4	341,6	508,4	508,3	0,14998	18,738
11:39:59	341,0	341,2	507,9	507,7	0,14998	18,644
11:40:10	341,3	341,4	508,1	508,0	0,14999	18,738
11:40:21	341,7	341,8	508,3	508,2	0,14857	18,832
11:40:32	342,2	342,3	508,7	508,5	0,14952	18,832
11:40:42	341,7	341,8	508,1	507,9	0,14857	18,832
11:40:53	342,1	342,2	508,3	508,2	0,14999	18,832
11:41:04	342,0	342,2	508,1	507,9	0,14999	18,738
11:41:15	342,0	342,1	508,0	507,9	0,14952	18,927

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сопоставление результатов расчётной модели ПГ и опытов на стенде СПРУТ показало, что они сильно зависят от размера нодов в области появления кризиса теплоотдачи второго рода. Это проявляется в колебании расчётного расхода воды и пара в случае,

если паросодержание в ноде близко к границе резкого изменения значения коэффициента теплоотдачи. Для того чтобы избавиться от колебаний в расчётную модель были внесены изменения: длина и количество нодов парогенерирующих труб были подобраны такими, чтобы исключить из расчётной модели нод с граничным паросодержанием, при котором появляется кризис второго рода.

На рисунках 5 и 6 приведены расчётные температуры пара и свинца для режимов, аналогичных экспериментальным при давлении  $\sim 18$  МПа (протестовые расчёты).

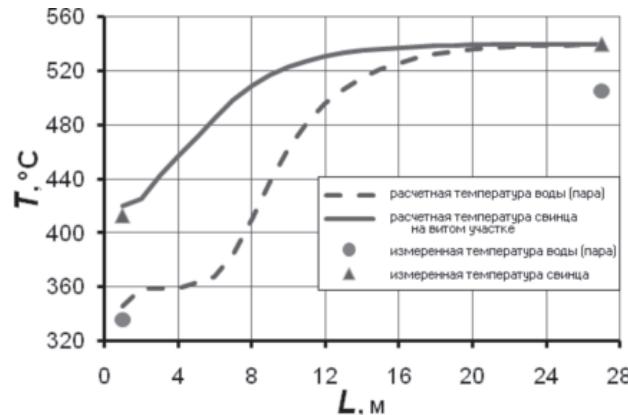


Рис. 5. Расчётное распределение температур воды (пара) и свинца (расход воды - 80%  $G_{ном}$ )

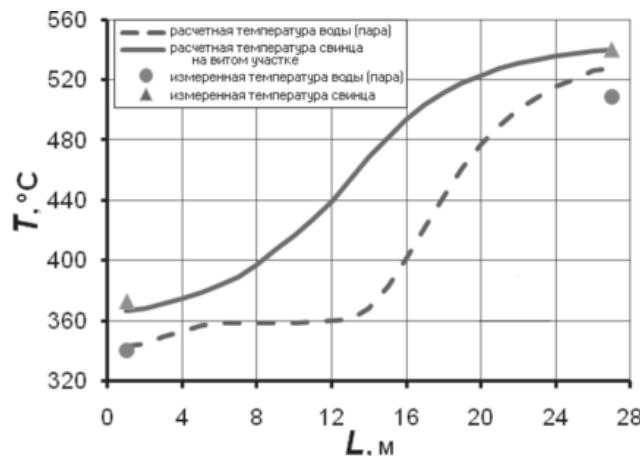


Рис. 6. Расчётное распределение температур воды (пара) и свинца (расход воды - 120%  $G_{ном}$ )

Как видно из рисунков, расчётные температуры свинца на выходе рабочего участка лежат близко к измеренным в эксперименте. Расчётные и экспериментальные температуры пара на выходе из рабочего участка при расходе 80 % от номинального отличаются на  $\sim 33^{\circ}C$ , а при расходе 120% от номинального на  $\sim 18^{\circ}C$ . Это составляет 19,5 и 10,8% от общего измеренного подогрева воды. Однако отличие между экспериментом и расчётом в приращении энталпии на витом участке составляет  $\sim 3\%$  в каждом из режимов (табл. 3). Расчётные температуры воды на входе в рабочий участок выше экспериментальных приблизительно на 10 и  $3,5^{\circ}C$  соответственно для режима с 80% расхода от номинального и 120%. Отличие в расчётных и экспериментальных значениях энталпии воды на входе в рабочий участок приводит к завышению расчётной температуры пара на  $\sim 24$  и  $\sim 7,5^{\circ}C$  соответственно.

Таким образом, большая часть погрешности в определении температуры пара легко устраняется при более тщательном согласовании исходных данных расчёта с экс-

периментальными данными. Итоговая погрешность позволяет говорить о том, что выбранная расчётная модель теплообмена между паром и свинцом адекватно описывает происходящие процессы, и после верификации на экспериментах с более низкими расходами воды может быть использована для расчётного моделирования парогенератора.

Таблица 3

**Запись параметров воды при расходе 120 %**

Расход воды	Приращение энталпии воды (пара) на витом участке, кДж/кг		Отклонение расчетных данных от экспериментальных
	RELAP5	Опыт	
120% $G_{\text{ном}}$	1762	1711	~3 %
80% $G_{\text{ном}}$	1790	1732	~3,3 %

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Впервые проведены испытания трехтрубной модели витого парогенератора, обогреваемого свинцом при докритических и сверхкритических давлениях воды. Отработан режим запуска свинцового контура.

При испытаниях трехтрубной секции модели витого парогенератора как при докритическом давлении (18 МПа), так и при сверхкритическом температура пара на выходе из модели достигала 509°C и не опускалась ниже 503°C во всем диапазоне изменения расходов воды.

При расходе воды 80–120% от номинального не обнаружено пульсаций давления и расхода воды на входе в модель во всем диапазоне изменения давления.

Средствами кода RELAP5/mod 3.2 была создана расчётная модель теплообмена между жидким свинцом и водой (паром). С помощью претестовых расчётов были определены расходы свинца для опускного и подъемного участков парогенераторного модуля.

Экспериментальные данные, полученные на стенде СПРУТ, позволили провести отладку и предварительную верификацию модели. После проведения экспериментальных исследований с низкими расходами воды будет проведена верификация расчётной модели.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Экспериментальное исследование теплообмена в жидким металле в обоснование парогенератора установки РУБРЕСТ-ОД-300 / С.Г. Калякин, Н.С. Грачев, В.А. Грабежная и др. // Труды III Российской конференции по теплообмену (РНКТ-3). – М.: МЭИ, 2002. – Т. 2. – С. 159-162.
2. Калякин С.Г., Грабежная В.А. Экспериментальное исследование теплообмена в жидким металле при поперечном обтекании пучка труб в обоснование парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300 // Труды IV Российской конференции по теплообмену (РНКТ-4) – М.: МЭИ, 2006. – Т. 2. – С. 128-131.
3. Грачев Н.С., Кириллов П.Л., Мартынов П.Н. Парогенераторы с прямым контактом между жидким металлом и водой / Тяжелые жидкокометаллические теплоносители в ядерных технологиях: Тр. конф. В 2-х томах. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999. – Т. 2. – С. 799-806.
4. Грабежная В.А., Михеев А.С., Штейн Ю.Ю. Испытания модели парогенератора БРЕСТ на стенде СПРУТ / Итоги научно-технической деятельности Института ядерных реакторов и теплофизики за 2011 год: Сб. статей. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2012. (В печати).
5. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / Под ред. П.Л. Кириллова. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

Поступила в редакцию 10.11.2012

# ОЦЕНКА УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА <sup>99</sup>Мо ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНОВКАХ АКТИВНОЙ ЗОНЫ НА РЕАКТОРЕ ВВР-ц

**О.Ю. Кочнов\*, В.В. Колесов\*\*, Р.В. Фомин\*\***

\*Обнинский филиал ГНЦ РФ НИФХИ им. Л.Я. Карпова, г. Обнинск

\*\* Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск



Рассмотрены возможности увеличения наработки <sup>99</sup>Мо с помощью модернизации урансодержащих мишеней и размещения бериллиевых блоков в активной зоне реактора ВВР-ц. Обнаружено, что существует резерв увеличения наработки изотопа медицинского назначения <sup>99</sup>Мо для производства радиофармпрепаратов.

**Ключевые слова:** реактор ВВР-ц, наработка <sup>99</sup>Мо, блоки бериллиевого замедлителя.

**Key words:** WWR-c reactor, <sup>99</sup>Mo production, beryllium moderator.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время расширение производства радионуклида медицинского назначения <sup>99</sup>Мо для диагностики онкологических заболеваний по-прежнему является актуальным. Поэтому увеличение наработки этого изотопа в филиале НИФХИ им. Л.Я. Карпова (г. Обнинск) является важной народно-хозяйственной задачей. Основное внимание при этом может уделяться модернизации мишеней, располагающихся в технологическом канале, и использованию бериллиевых блоков в активной зоне реактора.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [1] была представлена прецизионная модель активной зоны реактора ВВР-ц, позволяющая проводить расчетные исследования по улучшению наработки <sup>99</sup>Мо в технологических каналах. Увеличение наработки <sup>99</sup>Мо может быть получено с помощью как модернизации мишеней, так и улучшения нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора. Такое улучшение может быть получено с помощью введения в активную зону бериллиевых блоков [2].

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Были проведены расчеты выхода <sup>99</sup>Мо в стандартной (рис. 1) и модернированной (рис. 2) мишиени, помещаемой в технологический канал 4-1 реактора ВВР-ц в процессе кампании. Химический состав сплава САВ-І, используемый в качестве оболочек твэлов, по ОСТ 190048-72 (изменение №3): Al – основа, Mg – 0.45–0.9%, Si – 0.7–1.2%, Fe – 0.2%, Cu – 0.012%, Mn – 0.012%, Ni – 0.03%, Ti – 0.012%, В – 0.00012%, Cd – 0.0001%, Zn – 0.03%, прочие – 0.07%.

© О.Ю. Кочнов, В.В. Колесов, Р.В. Фомин, 2013

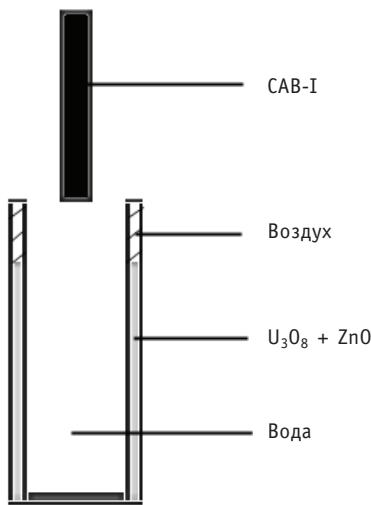


Рис. 1. Детализация стандартной мишени «стакан» для производства  $^{99}\text{Mo}$  в модели активной зоны реактора ВВР-ц

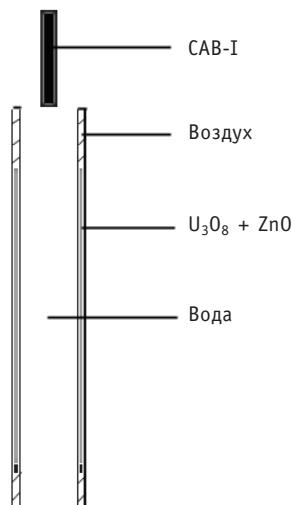


Рис. 2. Детализация модифицированной мишени «труба в трубе» с проточным охлаждением для производства  $^{99}\text{Mo}$  в модели активной зоны реактора ВВР-ц

Модернизация мишени (рис. 2) заключалась в создании быстроразборной<sup>1</sup> мишени «труба в трубе». Такого типа мишени ранее в Российской Федерации не использовались. Между внутренней и наружной трубами помещается смесь  $^{235}\text{U}$  (90%) и оксида цинка. Одновременно в канал устанавливается не более двух мишеней. За счет конструкции в модернизированной мишени можно обеспечить охлаждение протекающей через нее водой, что невозможно для случая «стакан в стакане». При установке двух мишеней на всю высоту активной зоны канала более полно, чем при установке четырех мишеней (три места под головку), используется пространство канала.

Длительность кампании составляла 72 часа работы реактора на номинальной мощности 10 МВт с последующей выдержкой мишени в течение 24 часов. При этом нейтронно-физические параметры активной зоны изменялись посредством введения бериллиевых блоков в разные места активной зоны. На рисунке 3 приводятся различные компоновки активной зоны с использованием бериллиевых блоков, которые использовались в расчетах.

Размеры бериллиевых блоков имеют ряд ограничений:

- при установке в ячейки активной зоны вместо ТВС наружные геометрические размеры полностью соответствуют размерам ТВС;
- при установке на краю активной зоны бериллиевый блок представляет собой обрезанный сегмент по кромке активной зоны стандартного блока;
- боковые зазоры между ТВС, бериллиевыми блоками и сепаратором для протока теплоносителя сохраняются.

При отсутствии бериллиевых блоков пространство активной зоны заполнено теплоносителем (дистиллированной водой).

Расчетные исследования по использованию бериллия в качестве отражателя для улучшения нейтронно-физических свойств реактора ВВР-К, аналогичного по конструкции реактору ВВР-ц, было проведено в [3]. В работе [2] приводятся анало-

<sup>1</sup> Одно из основных требований к мишени для наработки  $^{99}\text{Mo}$  является удобство и быстрота переработки в условиях «горячей» камеры.

гичные результаты для реактора ВВР-ц. Было показано, что использование бериллия в качестве отражателя позволяет увеличить плотность потока нейтронов в экспериментальных каналах на 10%. Расчеты проводились для бериллиевых блоков, т.к. они имеются в наличии и могут быть установлены в активную зону реактора.

В работе проведены сравнительные расчеты выхода  $^{99}\text{Mo}$  для стандартной и модифицированной мишени в стандартной активной зоне и в активной зоне с бериллиевым отражателем в различных вариантах размещения бериллиевого отражателя в активной зоне. Рассматривались четыре варианта активной зоны (рис. 3):

- без бериллиевых блоков (стандартная);
- два бериллиевых блока располагаются по периметру активной зоны в непосредственной близости от экспериментального канала;
- бериллиевые блоки располагаются по всему периметру активной зоны;
- бериллиевые блоки окружают экспериментальный канал.

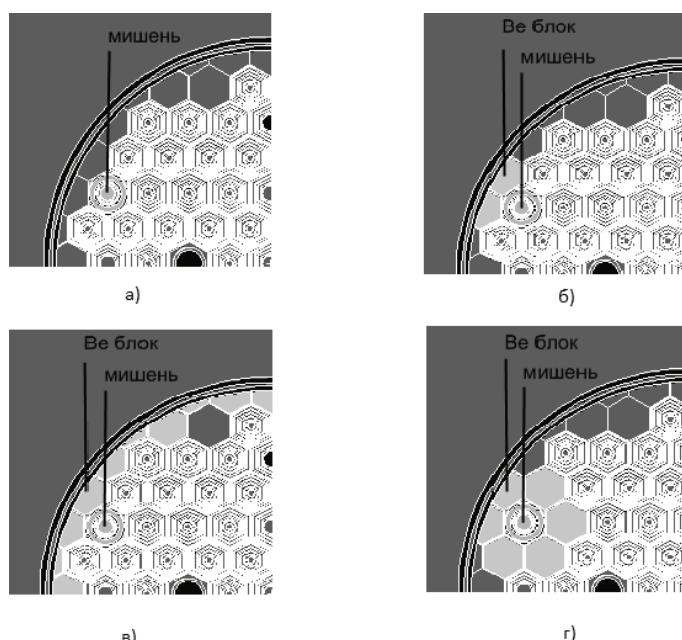


Рис. 3. Активная зона реактора ВВР-ц: а) без бериллиевых блоков; б) с двумя бериллиевыми блоками; в) с бериллиевыми блоками, расположенными по периметру активной зоны; г) с бериллиевыми блоками, окружающими технологический канал 4-1

На рисунке 4 приводится расположение стандартных мишеней в экспериментальном канале. Расположение модернизированных мишеней аналогично с учетом того, что их в экспериментальном канале располагается две единицы.

На рисунках 5 и 6 приводится зависимость плотности потока тепловых нейтронов (до 0.2 эВ) в стандартной и модернизированной мишених при различных вариантах расположения бериллиевых блоков в активной зоне. Как видно из графиков, как для стандартной, так и для модернизированной мишени тепловые нейтронные потоки (до 0.2 эВ) максимальны для четвертого варианта (экспериментальный канал окружен бериллиевыми блоками). Это дает возможность утверждать, что в реакторе ВВР-ц с тепловым спектром нейронов можно получить увеличение наработки  $^{99}\text{Mo}$ , используя бериллиевые вставки.

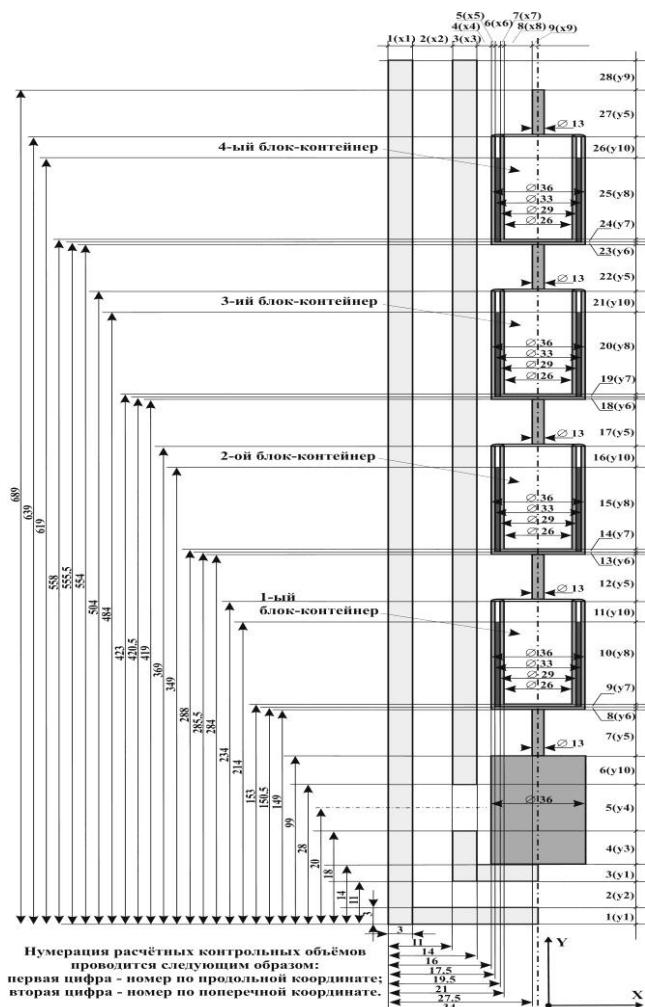


Рис. 4. Расположение стандартных мишеней в экспериментальном канале

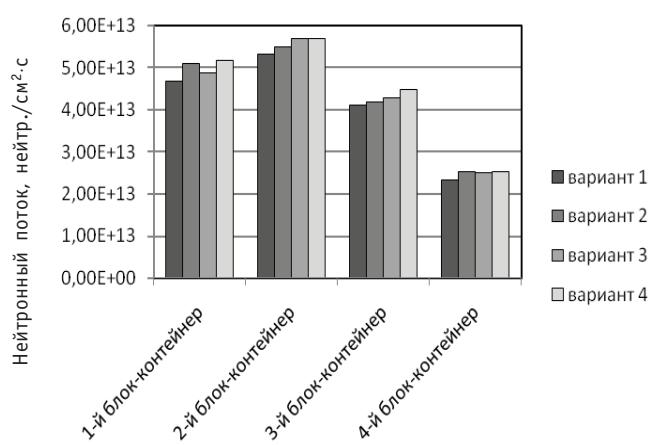


Рис. 5. Зависимость плотности потока тепловых нейтронов в стандартной мишени для различных вариантов размещения бериллиевого отражателя в активной зоне

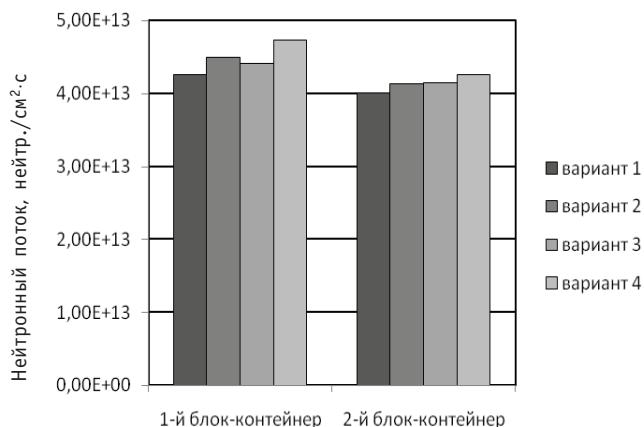


Рис. 6. Зависимость плотности потока тепловых нейтронов в модернизированной мишени для различных вариантов размещения бериллиевого отражателя в активной зоне

Результаты расчетов выхода  $^{99}\text{Mo}$  (в Ки) для стандартной мишени приводятся в табл. 1, а для модернизированной – в табл. 2.

Таблица 1

**Результаты расчетов выхода  $^{99}\text{Mo}$  (в Ки)  
для стандартной мишени при различных вариантах  
расположения бериллиевых блоков в активной зоне**

№ варианта	Первая снизу мишень	Вторая снизу мишень	Третья снизу мишень	Четвертая снизу мишень	Суммарный выход
1	125	143	110	62	440
2	136	147	112	68	463
3	131	153	115	67	466
4	138	150	118	66	473

Таблица 2

**Результаты расчетов выхода  $^{99}\text{Mo}$  (в Ки)  
для модернизированной мишени при различных  
вариантах расположения бериллиевых блоков  
в активной зоне**

№ варианта	Первая снизу мишень	Вторая снизу мишень	Суммарный выход
1	373	355	728
2	385	359	744
3	393	364	757
4	410	384	795

Результаты, приведенные в таблицах, доказывают, что модернизированная мишень позволяет в 1.7 раза увеличить наработку  $^{99}\text{Mo}$ . Использование бериллиевых вставок позволяет также увеличить наработку  $^{99}\text{Mo}$ . Например, для четвертого варианта это увеличение составляет 7.5% для стандартной мишени и более 9% – для модернизированной.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетов показывают заметное увеличение выхода  $^{99}\text{Mo}$  при размещении бериллия в активной зоне реактора ВВР-ц, которое составляет до 7.5% для стандартной мишени и выше 9% – для модифицированной. Как видно из графиков, это увеличение достигается за счет некоторого смягчения спектра.

Следует отметить увеличение (до 65–70%) суммарного выхода  $^{99}\text{Mo}$  при замене стандартной мишени на модернизированную. Поскольку задача увеличения производства  $^{99}\text{Mo}$  комплексная, то возможно и увеличение кампании облучения мишеней и повышение плотности нейтронного потока в мишени (уровня мощности реактора) и т.д. В статье не учитываются эти факторы. В работе также не исследовались вопросы соответствия активной зоны с бериллиевыми вставками требованиям норм безопасности.

Таким образом, для реактора ВВР-ц существует резерв увеличения наработки изотопа медицинского назначения  $^{99}\text{Mo}$  для производства радиофармпрепаратов без изменения расходов на облучение мишени.

## Литература

1. Колесов В.В., Кочнов О.Ю., Волков Ю.В., Украинцев В.Ф., Фомин Р.В. Создание прецизионной модели реактора ВВР-ц для последующей оптимизации его конструкции и наработки  $^{99}\text{Mo}$  и других радионуклидов//Известия вузов. Ядерная энергетика.– 2011. – № 4. – С. 129-133.
2. Кочнов О.Ю., Колесов В.В. Влияние бериллиевого отражателя, помещенного в активную зону реактора ВВР-ц на ее нейтронно-физические характеристики// Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 2.
3. Аринкин Ф.М., Бейсебаев А.О., Гизатуллин Ш.Х. и др. О возможности использования бериллиевого отражателя в существующей активной зоне реактора ВВР-К// Вестник НЯЦ РК. – 2008. – Вып. 4. – С. 106-112.

Поступила в редакцию 13.09.2012

# ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ АСИММЕТРИИ У РАСТЕНИЙ ОТ ВЕЛИЧИНЫ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ

**Т.А. Горшкова\*, Р.С. Чурюкин\*\*, О.А. Карагузова\*, Н.В. Амосова\***

**Н.Н. Павлова\*, Ю.М. Мартиросян\*, О.П. Власова\*, И.М. Симакова\***

\**Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*

\*\**Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии, г. Обнинск*



Приведены результаты исследования показателя флюктуирующей асимметрии листьев трех видов растений в зависимости от радиационного фона и удельной активности радиоцезия на территории Ульяновского района, загрязненного в результате аварии на ЧАЭС. Проведен корреляционный анализ, обнаружена сходная реакция растений на радиоактивное загрязнение территории. Это позволяет предположить, что исследованные виды растений могут быть использованы для биоиндикации данного вида антропогенного изменения среды.

**Ключевые слова:** радиоактивное загрязнение, флюктуирующая асимметрия.

**Key words:** contamination, fluctuating asymmetry.

Мониторинговые исследования, проводимые на отдельных территориях Калужской области, загрязненных вследствие аварии на ЧАЭС, по сей день не утратили актуальности. В связи с длительным периодом полураспада некоторых радионуклидов, в частности, радиоактивных цезия и стронция, попавших с осадками в природные биогеоценозы в 1986 г., их присутствие в среде может отражаться не только на количественном содержании их в живых системах, но и на некоторых морфологических показателях отдельных организмов. В связи с этим представляется перспективным поиск среди живых объектов наиболее доступных индикаторов, отражающих текущий уровень отдаленных последствий воздействия чернобыльского радиоактивного следа. Одной из форм реакции индикаторных систем является изменение величины коэффициента флюктуирующей асимметрии у индикаторных видов растений.

Под флюктуирующей асимметрией (ФА) понимают незначительные и ненаправленные отклонения от строгой билатеральной симметрии, которые проявляются при нарушении стабильности развития организма и выражаются тем отчетливее, чем сильнее внешние воздействия, в первую очередь, антропогенное загрязнение

---

© Т.А. Горшкова, Р.С. Чурюкин, О.А. Карагузова, Н.В. Амосова, Н.Н. Павлова,  
Ю.М. Мартиросян, О.П. Власова, И.М. Симакова, 2013

[1, 2]. Дестабилизация развития для метрических и меристических признаков наблюдается уже на относительно низком уровне средовых нарушений, которые еще не связаны с необратимыми изменениями в популяциях. Это позволяет использовать ФА как индикатор даже незначительных отклонений параметров среды от фонового состояния, еще не приводящих к существенному снижению жизнеспособности особей.

Из всех органов растений самыми чувствительными ко многим антропогенным факторам являются листья. Такая чувствительность объясняется тем, что лист является высокопластичным органом, в котором осуществляется большое количество важных физиологических процессов, поэтому характер изменчивости его морфоструктуры может служить индикатором загрязнения условий внешней среды.

Пластиинка листа формируется в течение достаточно длительного времени благодаря активности краевой (маргинальной) меристемы, которая функционирует билатерально, на двух сторонах листового зачатка. Производные маргинальной меристемы продолжают делиться в качестве интеркалярных (вставочных) меристем. До выхода листа из почки формируется только от 1 до 40% клеток будущего взрослого листа, остальные – после выхода листа из почки (два–шесть циклов асинхронных делений клеток; один цикл – 24–48 часов). Первой останавливается митотическая активность клеток верхушки листа, затем снижение митотической активности идет в базипетальном направлении [3]. Таким образом, лист может проявлять чувствительность к вызывающим его асимметрию факторам, в том числе радиоактивному загрязнению территории, на ранних этапах развития, пока функционируют наиболее уязвимые его ткани – меристемы.

Оценка флюкутирующей асимметрии является доступным и быстрым методом определения стабильности развития живых организмов [1, 4–6], показателем, насколько «хорошо» или «плохо» живется организму в сообществе. Однако в некоторых случаях интегральность этого показателя становится минусом данного метода, поскольку он не может обнаружить, на какое именно воздействие организм реагирует асимметричным изменением своих структур. Поэтому для применения метода оценки ФА с целью определения ответа растений на конкретное изменение среды необходим тщательный подбор сходных условий в опыте и контроле с различием в один фактор. При этом хорошим свидетельством справедливости оценки состояния сообщества по данному параметру в данных условиях может быть сходная реакция разных индикаторных видов.

## РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования были проведены в 2010–2012 гг. на территории Государственного природного заповедника «Калужские засеки» (Калужская обл., Ульяновский район). Выбор расположения учетных точек изначально основывался на анализе карт радиоактивного загрязнения территории, предоставленных руководством заповедника. На этих территориях сведены к минимуму все формы антропогенного воздействия кроме радиоактивного загрязнения.

В качестве контрольных были выбраны территории лесных растительных сообществ в окрестностях г. Обнинска. Учетные точки находились на участках, minimally подверженных рекреационной, автотранспортной и радиоактивной нагрузкам.

На всех учетных точках проводился пробоотбор почвы методом конверта на глубину около 20 см и весом порядка 1 кг с целью дальнейшего анализа удельной активности  $^{137}\text{Cs}$ . Глубина пробоотбора определялась тем, что максимальные запасы радионуклидов, в частности, радиоцезия, сосредоточены в почве на глубине

## ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

---

5–20 см [7]. Пробные образцы почвы имели схожую влажность и гранулометрический состав.

В качестве биоиндикаторов были взяты липа сердцевидная (*Tilia cordata Mill.*), майник двулистный (*Maianthemum bifolium L.*) и ландыш майский (*Convallaria majalis L.*). Удобство выбора именно этих растений в качестве биоиндикаторов заключается в том, что они имеют общий ареал обитания и схожий вегетационный период, а также в том, что для них достаточно просто осуществлять необходимые промеры и рассчитывать коэффициент ФА.

Листья липы сердцевидной собирали с подроста на высоте 1–1,5 м по 50 листьев на точку. Измерения проводили по шести параметрам справа и слева: 1 – расстояние от центральной жилки до края листа посередине листовой пластинки; 2, 3 – расстояние от центральной жилки до края листа в верхней и нижней четвертях листа; 4 – расстояние от черешка листовой пластинки до начала жилки второго порядка; 5 – расстояние второй жилки второго порядка до третьей жилки второго порядка; 6 – перпендикуляр от нижнего края листа до линии второго промера.

Листья майника двулистного собирали в количестве 30 на учетную точку в силу того, что ценопопуляции майника на учетных территориях были представлены небольшим количеством экземпляров. Расчет коэффициента ФА вели по пяти промерам справа и слева: 1 – расстояние от центральной жилки до края листа посередине листовой пластинки; 2 – расстояние от центральной жилки до второй главной жилки посередине листовой пластинки; 3 – расстояние от второй главной жилки до третьей посередине листовой пластинки; 4 – перпендикуляр от черешка (начала центральной жилки) до края листа; 5 – перпендикуляр от нижнего края листа до линии четвертого промера.

В каждой точке брали также по 50 листьев ландыша майского. Для него был разработан метод из одиннадцати промеров листа, по которым производился поиск коэффициента ФА: 1 – расстояние от центральной жилки до края листа посередине листовой пластинки; 2, 3 – расстояние от центральной жилки до края листа в верхней и нижней 1/4 листа; 4–7 – расстояние от центральной жилки до края листа в верхней и нижней 1/8 листа; 8 – расстояние от верхнего края листа до четвертого промера; 9 – расстояние от начала главной центральной жилки листа до седьмого промера; 10 – расстояние от центральной жилки листа до первой от нее жилки посередине листа; 11 – расстояние от первой до второй жилки посередине листа.

После промеров каждого из предлагаемого признака осуществляли расчет коэффициента флюктуирующей асимметрии. Интегральный индекс равен среднему арифметическому сумм относительных значений асимметрии по всем признакам у каждого листа. Относительное значение асимметрии в данном случае вычисляется как среднее арифметическое отношения разности к сумме промеров листа слева и справа, отнесенное к числу признаков [1].

Оценку мощности экспозиционной дозы радиации на учетных точках в заповеднике «Калужские засеки» и в окрестностях г. Обнинска осуществляли с помощью дозиметров Radex QUARTA и ДБГ-06Т. Относительная погрешность обоих дозиметров не превышает 15 %. Измерения мощности экспозиционной дозы гаммаизлучения производили на уровне почвы, а также на высоте 1 и 2 м. По результатам десяти замеров в каждой учетной точке определяли максимальную мощность дозы и ее среднее значение.

Определение активности  $^{137}\text{Cs}$  проводилось на сцинтилляционном гамма-спектрометре с программным обеспечением «Прогресс» в лаборатории радиационно-

го контроля ГНУ ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии (г. Обнинск). Активность  $^{137}\text{Cs}$  определяли как в просушенных почвенных образцах, так и в высушенном растительном материале – образцах листьев липы и ландыша.

По величине УА  $^{137}\text{Cs}$  рассчитывали плотность загрязнения территории. Плотность загрязнения представляет собой активность изотопа на единицу площади, при этом считается, что на 1 м<sup>2</sup> приходится 100 кг почвы, т.е. удельная активность радионуклида 100 Бк/кг соответствует плотности загрязнения 10 кБк/м<sup>2</sup> (или 0,24 Кү/км<sup>2</sup>) [8].

Для оценки величины поступления из почвы  $^{137}\text{Cs}$  в растения использовали коэффициенты накопления и перехода. Коэффициент накопления (КН) определяется как отношение удельной активности радионуклида в единице массы растений к активности радионуклида в почве. Коэффициент перехода (КП) определяются как отношение удельной активности радионуклида в единице массы растений к плотности загрязнения единицы площади почвы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 1 представлены данные по радиационному фону, плотности загрязнения и удельной активности (УА)  $^{137}\text{Cs}$  в почве, расположенные по возрастанию средней величины радиационного фона.

Из таблицы видно, что на территории учетных точек в г. Обнинске удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в почве близка к значению фонового уровня, который для данного радионуклида составляет около 24 Бк/кг, что соответствует плотности загрязнения 0,06 Кү/км<sup>2</sup> [9]. Этот уровень принят в качестве фонового после массовых испытаний ядерного оружия в 50–60-х годах XX в. и рассеяния в окружающей среде продуктов радиоактивного распада.

На учетных точках на территории ГПЗ «Калужские засеки» при незначительном (от 1,3 до 3,6 раз) превышении мощности экспозиционной дозы по сравнению с обнинскими показателями удельная активность и плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  превышают соответствующие фоновые значения в 17–101 раз. Колебание величины плотности загрязнения на территории заповедника в пределах 1,2–6,5 Кү/км<sup>2</sup> соответствует современному уровню загрязнения буферной и даже импактной зоны Восточно-Уральского радиационного следа (ВУРС). Так, по данным В.Н. Позолотиной и др. на территории Южного Урускиля (импактная зона ВУРС, 9 км. от ПО «Маяк») плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  в почве в начале двухтысячных годов составляла 5,9 Кү/км<sup>2</sup>, а в буферной зоне ВУРС запас этого радионуклида колебался от 0,2 до 0,6 Кү/км<sup>2</sup> [7].

Таким образом, территория заповедника «Калужские засеки» мозаично загрязнена  $^{137}\text{Cs}$ , причем связи между удельной активностью изотопа и мощностью экспозиционной дозы излучения в нашем исследовании не обнаружено. Коэффициент корреляции между этими показателями, рассчитанный как для средней, так и для максимальной мощности дозы, близок к значению 0,1.

Логично предположить, что концентрация радионуклидов в растениях должна линейно возрастать с увеличением их концентрации в почве. Радиоактивный изотоп цезия является химическим аналогом калия, входящего в состав растительных тканей. Поэтому цезий поступает в растение и замещает калий в жизненно важных для растения соединениях. При этом многим растениям свойственно накопление некоторых радионуклидов в зеленой массе и генеративных органах. Таким образом содержание радиоизотопов в растениях может значительно превышать соответствующий показатель в почве, что показано в работах разных авторов [7, 8].

Таблица 1

**Мощность радиационного фона, плотность загрязнения и удельная активность (УА)  $^{137}\text{Cs}$  в почве исследованных территорий (в процентах приведены погрешности измерения УА  $^{137}\text{Cs}$ )**

Номер учетной точки	Мощность экспозиционной дозы, мкР/ч		УА $^{137}\text{Cs}$ в почве, Бк/кг	Плотность загрязнения $^{137}\text{Cs}$ , Кн/км <sup>2</sup>
	средняя	максимальная		
1*	12,2 ± 1,8	14 ± 2,1**	27 (15%)	0,07
2*	16,0 ± 2,4	17 ± 2,5	27 (14%)	0,07
3	18,9 ± 2,8	30 ± 4,5	1157 (11%)	3,12
4	21,9 ± 3,2	27 ± 4,0	571 (11%)	1,42
5	25,5 ± 3,8	32 ± 4,8	—	—
6	25,7 ± 3,8	30 ± 4,5	977 (10%)	2,61
7	26,6 ± 3,9	40 ± 6,0	—	—
8	29,2 ± 4,8	34 ± 5,1	—	—
9	30,3 ± 4,5	31 ± 4,6	812 (9%)	2,19
10	30,3 ± 4,5	39 ± 5,8	527 (9%)	1,42
11	31,4 ± 4,7	42 ± 6,3	1499 (9%)	4,05
12	32,8 ± 4,9	41 ± 6,1	785 (10%)	2,12
13	34,2 ± 5,1	51 ± 7,6	—	—
14	34,4 ± 5,1	43 ± 6,4	2433 (9%)	6,57
15	36,6 ± 5,4	43 ± 6,4	474 (9%)	1,28
16	37,6 ± 5,6	41 ± 6,1	—	—
17	38,0 ± 5,7	40 ± 6,0	861 (8%)	2,32
18	38,0 ± 5,7	41 ± 6,1	824 (9%)	2,22
19	38,9 ± 5,6	45 ± 6,7	683 (11%)	1,84
20	47,6 ± 7,1	49 ± 7,3	650 (8%)	1,75
21	49,6 ± 7,4	59 ± 8,8	400 (9%)	1,08

\* – контрольные точки в окрестностях г. Обнинска;

\*\* – погрешность дозиметра

В таблице 2 представлены данные по удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в листьях липы и ландыша, для наглядности расположенные по возрастанию удельной активности цезия в почве.

На процесс перехода радионуклидов из почвы в растения могут оказывать воздействие различные факторы. Установлено, что в зависимости от физико-химических свойств почв и видовых особенностей растений коэффициенты перехода радионуклидов могут варьировать в широких пределах (от 0,03 до 79,9, т.е. в 2700 раз). При этом минимальные значения коэффициента перехода наблюдались на дерново-подзолистой почве, а максимальные – на торфяно-глеевых почвах [10]. О сложном характере перехода радионуклидов в растения свидетельствует и В.Н. - Позолотина [7], утверждающая, что сравнение величин содержания  $^{137}\text{Cs}$  в растениях и почве может не давать прямой зависимости между ними. Коэффициент перехода для одного и того же вида растений на разных участках сходной по почвенным характеристикам территории может варьировать в пределах порядка величины.

Таблица 2

**Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в почве и растениях  
в контроле (Обнинск) и на загрязненных территориях  
(ГПЗ «Калужские засеки»), коэффициенты накопления  
и перехода (В процентах приведены погрешности  
измерения УА  $^{137}\text{Cs}$ )**

Номер	УА $^{137}\text{Cs}$ , Бк/кг		КН		КП	
	в почве	в листьях липы	в листьях ландыша	липа	ландыш	липа
1*	27 (15%)	9 (15%)	20 (15%)	3,5	7,5	0,3
10	527 (9%)	—	475 (28%)	—	0,9	—
4	571 (11%)	153 (23%)	244 (40%)	1,3	2,1	0,13
19	683 (11%)	18 (48%)	3880 (23%)	0,1	15,0	0,01
12	785 (10%)	141 (55%)	814 (20%)	0,9	5,4	0,1
6	977 (10%)	390 (13%)	5386 (19%)	5,5	55,0	0,4
3	1157 (11%)	17 (65%)	51 (49%)	0,2	0,7	0,02
11	1499 (9%)	236 (25%)	9235 (20%)	4,4	17,0	0,4
14	2433 (9%)	52 (46%)	732 (20%)	3,0	0,02	0,30
						0,02

\* – контрольная точка в г. Обнинск

В нашем случае колебания величины коэффициента перехода радиоактивного цезия из почвы в листья растений составляют от 0,01 до 0,4 для липы и от 0,02 до 55 для ландыша. Эти результаты, с одной стороны, близки к данным [10], с другой – отличаются от десятикратного различия в работе [7]. Возможно, данные различия можно объяснить некоторым особенностями взятых на территории «Калужских засек» почвенных проб.

Для получения достоверных данных по переходу радионуклидов из почвы определенного типа в разные структуры одного и того же вида растения необходимо проведение специального лабораторного экспериментального исследования. В нашем случае в условиях нахождения исследуемых видов растений на территории естественных сообществ можно только со значительной долей допущения говорить о возможном влиянии радиоизотопов на некоторые биологические характеристики, например, стабильность развития, оцениваемую по изменению величины флуктуирующей асимметрии.

В нашем исследовании выявлена корреляционная зависимость средней степени (значение 0,5 по Спирмену) между удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  в листьях ландыша и почве. Коэффициент корреляции между активностью цезия в почве и листьях липы оказался ниже – 0,3. Зеленые однолетние побеги эфемероидных растений, в том числе ландыша, основная биомасса которых заключена в листьях, должны более выражено реагировать на увеличение содержания радиоизотопов в почве по сравнению с древесными растениями, что и было отмечено по результатам проведенного исследования. Эти данные соответствуют общему правилу увеличения содержания  $^{137}\text{Cs}$  в частях растений травянистого яруса по сравнению с древесным [11].

## ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Интересным является тот факт, что при слабой корреляции между уровнем содержания радиоактивного цезия в почве и показаниями дозиметра существует близкая по степени к средней корреляционная связь между радиационным фоном и удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$ , содержащегося в листьях ландыша (коэффициент 0,47 по Спирмену для средней и 0,51 – для максимальной мощности экспозиционной дозы).

О том, что на одних и тех же территориях существует единый принцип перехода радиоактивного цезия в растения, возможно, свидетельствует высокий показатель корреляции (0,78) между удельной активностью радиоактивного цезия в листьях ландыша и липы, а также связанные с УА коэффициенты накопления и перехода. Кроме того, сходная реакция растений на содержание  $^{137}\text{Cs}$  в почве в некоторой степени «оправдывает» возможность сравнения данных полевого исследования, когда некоторые другие характеристики почвы могут различаться между собой.

Коэффициенты флюктуирующей асимметрии как для древесных, так и для травянистых растений даже на близко расположенных учетных точках заповедника имеют отличающиеся значения. Связь между этими и остальными показателями представлена в табл. 3.

Таблица 3

### Корреляция между значениями радиационного фона, удельной активности $^{137}\text{Cs}$ в почве, листьях ландыша и липы, а также асимметрии листовых пластинок этих растений на исследованных учетных точках заповедника

	С3 ЭД*, мкР/ч	М3 ЭД**, мкР/ч	УА $^{137}\text{Cs}$ , Бк/кг			ФА липы	ФА ландыша
			в почве	в липе	в ландыше		
М3 ЭД	0,90						
УА $^{137}\text{Cs}$ (почва)	0,10	0,14					
УА $^{137}\text{Cs}$ (липа)	0,23	0,08	0,30				
УА $^{137}\text{Cs}$ (ландыш)	0,47	0,51	0,50	0,78 ( $p < 0,05$ )			
ФА липы	0,43	0,13	-0,62	-0,08	0,16		
ФА ландыша	0,35	0,27	0,69 ( $p < 0,05$ )	0,01	0,26	0,28	
ФА майника	0,27	0,26	0,70 ( $p < 0,05$ )	0,16	0,47	-0,10	0,31

\* С3 ЭД – среднее значение мощности экспозиционной дозы

\*\* М3 ЭД – максимальное значение мощности экспозиционной дозы  
( $p < 0,05$ ) – достоверность полученного коэффициента корреляции

Корреляционный анализ данных показал, что существует тенденция зависимости ФА липы сердцевидной от среднего значения радиационного фона с коэффициентом корреляции, равным 0,43. Зависимости ФА майника двулистного и ландыша майского от мощности средней экспозиционной дозы выявлено не было. Таким образом, увеличение радиационного фона на учетных территориях вносит свой вклад в развитие листовых пластинок липы при их формировании в несколько большей степени, чем ландыша и майника. Это может быть связано с различны-

ми сроками роста листа до его конечных размеров – более долгим у липы и более сжатым у майника и ландыша.

Коэффициенты зависимости индекса ФА листьев *Maianthemum bifolium* и *Convallaria majalis* от удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в почве составляют 0,70 и 0,69 соответственно. По-видимому, это связано с возможным влиянием уровня содержания радионуклидов на процесс формирования побега в целом и листовой пластиинки травянистого растения в частности особенно на ранних стадиях ее развития. Небольшая вегетативная масса этих растений и расположение их корневищ в зоне максимальной концентрации изотопа, по-видимому, являются факторами, усиливающими радиочувствительность этих растений по показателю стабильности развития к содержанию радиоактивного цезия в почве.

Необычным является тот факт, что коэффициент корреляции между ФА липы и удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  имеет отрицательное значение (минус 0,62). О том, что это может служить доказательством радиационного гормезиса в отношении действия этого изотопа на рост листовых пластинок липы, говорить пока преждевременно.

Примечательно, что статистически значимо не коррелируют между собой показатели асимметрии у разных растений на одних и тех же территориях. Возможно, это говорит все-таки о существовании иных, не связанных с содержанием  $^{137}\text{Cs}$ , факторов, вызывающих изменение ФА на учетных точках.

Если рассматривать показатель ФА листьев липы, ландыша и майника как индикатор качества среды в трактовке, предложенной для берескы [6], то можно отметить, что учетные территории, в том числе сходные по значениям радиационного фона и содержанию радионуклидов, в отношении показателя асимметрии листьев липы и майника демонстрируют полный спектр классов качества среды. Значения ФА ландыша и вовсе не превышают уровня, соответствующего верхней границе индекса ФА для первого («чистого») класса качества среды. Все исследованные виды растений довольно слабо изучены в радиобиологическом плане, кроме того, весьма ограниченны сведения об изменении показателя флюкутирующей асимметрии у этих растений в ответ не только на радиоактивное загрязнение, но и на другие формы антропогенного воздействия. Поэтому представляется актуальной дальнейшая работа по выяснению значимости этих растений и показателей их ФА в качестве биоиндикаторов радиоактивного загрязнения.

В целом, как видно из результатов данного исследования, пока рано говорить о наличии определенных зависимостей между изучаемыми показателями у растений обследованных природных растительных сообществ и параметрами радиоактивного загрязнения. Присутствие различий в почвенных характеристиках, гидрологическом, температурном и других режимах на пробных участках, некоторая разница в видовом составе и структуре изученных сообществ, в освещенности целых растений или отдельных их частей и т.д. – все эти факторы могут влиять на появление у растений различий физиологического и морфологического плана, не связанных напрямую с удельной активностью радионуклидов или повышенным радиационным фоном. Однако одним из обоснований применения в данной работе и в перспективе именно выбранного метода – оценки флюкутирующей асимметрии билатеральных структур – может служить то, что «обычные» отклонения в параметрах среды, к которым растения адаптированы в течение миллионов лет эволюции, должны оказывать меньшее влияние на асимметрию, чем относительно «новый» экологический фактор – присутствие в среде повышенного количества радионуклидов (адаптацию к которому у растений данных территорий, впрочем, также не стоит сбрасывать со счетов). И важным обстоятельством, приближаю-

## ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

---

щим экологические условия в контроле (окрестности г. Обнинска) и опыте (заповедник «Калужские засеки») к различию в один этот фактор, в данном исследовании является отсутствие или пренебрежимо малые уровни остальных форм антропогенной нагрузки – автотранспортной, рекреационной и пр.

Для установления более определенных зависимостей между показателем флюктуирующей асимметрии у растений и уровнем радиоактивного загрязнения необходимы лабораторные исследования, а в полевых условиях – усиление «стандартизации» в пробоотборе для минимизации возможного влияния иных факторов, увеличение объема выборок (количества измерений, проб почвы и растительного материала) для более строгого статистического обоснования результатов. Основанием для предварительного утверждения исследованных видов травянистых растений в качестве индикаторов может служить достаточно высокий уровень корреляции флюктуирующей асимметрии их листовых пластинок с удельной активностью цезия в почве.

### Литература

1. Захаров В.М. Здоровье среды: практика оценки. – М.: Центр экологической политики России, 2000. – 320 с.
2. Зорина А.А. Характеристика флюктуирующей асимметрии листьев бересклета в Карелии // Экология. Экспериментальная генетика и физиология. – 2007. – Вып. 11. – С. 28–36.
3. Корона В.В. Строение и изменчивость листьев растений. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 280 с.
4. Гелашвили Д.Б. Статистический анализ флюктуирующей асимметрии билатеральных признаков разноцветной ящурки *Eremias arguta* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2007. – Т. 9. – №4. – С. 941–949.
5. Кожара А.В. Структура показателя флюктуирующей асимметрии и его пригодность для популяционных исследований // Биологические науки. – 1985. – №6. – С. 100–103.
6. Стрельцов А.Б. Региональная система биологического мониторинга. – Калуга: Калужский ЦНТИ, 2003. – 158 с.
7. Позолотина В.Н. Современное состояние наземных экосистем восточно-радиоактивного следа: уровни загрязнения, биологические эффекты. – Екатеринбург: Изд-во «Гощицкий», 2008. – 204 с.
8. Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале. – М.: Наука, 1993. – 336 с.
9. Доклад о состоянии природных ресурсов и охране окружающей среды на территории Калужской области в 2010 году. – Калуга: Манускрипт, 2011. – 344 с.
10. Перепелятников Г.П. Рациональное использование лугов зоны Полесья УССР, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС//Третья Всесоюзная конференция по сельско-хозяйственной радиологии: Тез. докл. – 1990. – Т. 1 – С. 39.
11. Варфаламеева К.В. Особенности формирования радиоактивного загрязнения лесной экосистемы после аварии на ЧАЭС//Радиационная гигиена. – 2008. – Т. 1. – №3. – С. 49–53.

Поступила в редакцию 26.10.2012

# ГЕТЕРОГЕННЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР ГАМА-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АЗОТОСОДЕРЖАЩИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НЕЙТРОННО- РАДИАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

**А.А. Юдов\*, Ю.А. Соколов\*, Ю.И. Чернухин\*\***

\* ФГУП "РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина", г. Снежинск

\*\* СФТИНИЯ УМиФИ, г. Снежинск



Обсуждается гетерогенный сцинтилляционный детектор (ГСД), позволяющий повысить чувствительность и надежность обнаружения взрывчатых веществ (ВВ). Детектор представляет собой набор слоев конвертора гамма-излучения и примыкающих к ним слоев сцинтиллятора, детектирующих электроны и позитроны, возникающие в конверторе. Толщины слоев выбраны таким образом, чтобы рождающиеся в конвертирующих слоях заряженные частицы могли быть зарегистрированы в двух и более сцинтилляционных слоях. Представлены результаты расчетов чувствительности обнаружения азотосодержащих ВВ нейтронно-радиационным методом с применением ГСД. Показано, что при соответствующем выборе состава и размеров ГСД чувствительность рассматриваемой методики существенно выше, чем при традиционной постановке подобных измерений с использованием больших NaI(Tl)-детекторов и в перспективе может быть доведена до ~ 100–200 г тротила при времени измерений меньше одной минуты.

**Ключевые слова:** гетерогенный сцинтилляционный детектор, нейтронно-радиационный метод, взрывчатое вещество.

**Key words:** heterogeneous scintillation detector, neutron-radiation method, explosive.

Гетерогенный сцинтилляционный детектор (ГСД) представляет собой многослойную структуру, состоящую из попарно чередующихся слоев конвертирующего материала с высоким порядковым номером  $z > 50$  (например, свинца), в которых  $\gamma$ -кванты трансформируются в поток быстрых заряженных частиц (электронов и позитронов), и примыкающих к ним сцинтиллирующих (сенсорных) слоев, в которых энергия заряженных частиц преобразуется в световые вспышки, регистрируемые фотоприемниками (рис. 1). В качестве сенсорных слоев в ГСД могут использоваться сцинтиллирующие стекловолокна, сцинтиллирующее оптическое волокно из полистирола или тонкие пластины пластического сцинтиллятора (ПС) со спектросмещающими волоконными световодами [1, 2].

© А.А.Юдов, Ю.А.Соколов, Ю.И.Чернухин, 2013

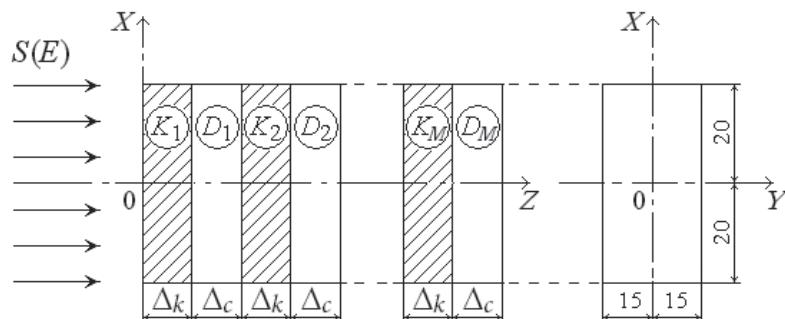


Рис. 1. Схема ГСД:  $K_i$  – конвертирующие слои из свинца ( $Pb, \rho = 11,3 \text{ г/см}^3$ ) толщиной  $\Delta_k$ ;  $\Delta_i$  – сенсорные слои из полистирола ( $CH, \rho = 1,05 \text{ г/см}^3$ ) толщиной  $\Delta_c$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$ ;  $S(E)$  – источник  $\gamma$ -квантов, падающих на входное окно детектора.

Такая конфигурация детектора позволяет совмещать преимущества кристаллических неорганических сцинтилляторов с  $z > 50$  (типа  $NaI$ ,  $CsI$  и др.), обладающих большой эффективностью регистрации  $\gamma$ -квантов, но имеющих, как правило, сравнительно небольшие размеры (с площадью входного окна  $< 400 \text{ см}^2$ ), с преимуществами пластических сцинтилляторов, обладающих сравнительно низкой эффективностью ( $z < 10$ ), но в силу их дешевизны допускающих изготовление детекторов с рекордно большими размерами (с площадью входного окна  $P \sim 1 \text{ м}^2$ ).

Важным качеством ГСД является возможность изменения его спектральной чувствительности, что достигается посредством целенаправленного выбора материалов и толщин слоев, их числа, а также применением схемы совпадений при регистрации сигналов от сенсорных слоев ГСД [1, 2]. Это позволяет создать структуру ГСД, обладающую высокой эффективностью для регистрации жесткого гамма-излучения.

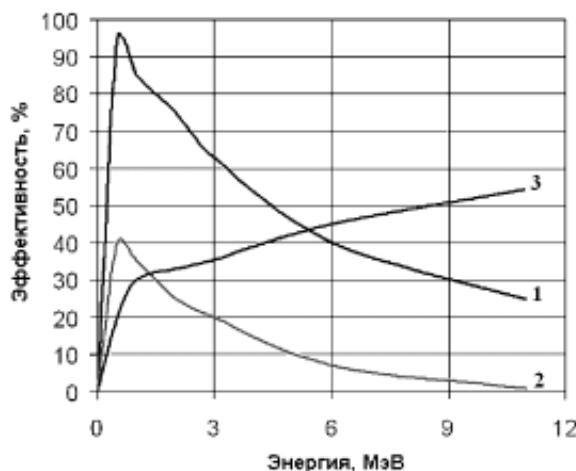


Рис. 2. Эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов сцинтилляционными детекторами трех типов: 1 –  $NaI(Tl)$ ,  $\varnothing 10 \times 10 \text{ см}$  [3]; 2 – ПС (PVT)  $6 \times 36 \times 122 \text{ см}$  [3]; 3 – ГСД,  $8,7 \times 40 \times 30 \text{ см}$  [2]

На рисунке 2 представлена энергетическая зависимость эффективности регистрации гамма-квантов трех сцинтилляционных детекторов:  $NaI$ , ПС и ГСД. У детекторов из  $NaI$  и ПС эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов с ростом их энергии снижается, тогда как у ГСД (15 попарно чередующихся слоев  $Pb, \Delta_k = 0,08 \text{ см}$  и полистирола,  $\Delta_c = 0,5 \text{ см}$  [2]) эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов с ростом энер-

гии возрастает. Эта особенность ГСД может быть использована для создания высокоэффективных устройств обнаружения азотосодержащих взрывчатых веществ (ВВ) нейтронно-радиационным методом по регистрации высокоэнергетических  $\gamma$ -квантов ( $E_\gamma = 10,8$  МэВ) реакции радиационного захвата нейтронов на азоте  $^{14}\text{N}(n, \gamma)^{15}\text{N}$ .

Другая отличительная особенность ГСД, важная для применения в таких устройствах, состоит в возможности определения кратности ( $K$ ) регистрации  $\gamma$ -квантов в его сенсорных слоях и, соответственно, селекции спектров регистрируемого  $\gamma$ -излучения по этому признаку при условии использования соответствующих схем совпадений сигналов от каждого из сенсорных слоев. Совпадение сигналов в сенсорных слоях является следствием того, что  $\gamma$ -кванты в зависимости от их энергии  $E$  могут быть зарегистрированы более, чем в одном сенсорном слое ( $K > 1$ ).

В рамках проекта EXPLODET (Explosive Detection)\* [4] был выполнен цикл работ по изучению возможностей поиска закладок ВВ в грунте нейтронно-радиационным методом с использованием NaI-детекторов  $\gamma$ -излучения большого размера и источника нейтронов с изотопом  $^{252}\text{Cf}$  интенсивностью  $I_n \sim 10^7$  н/с [5].

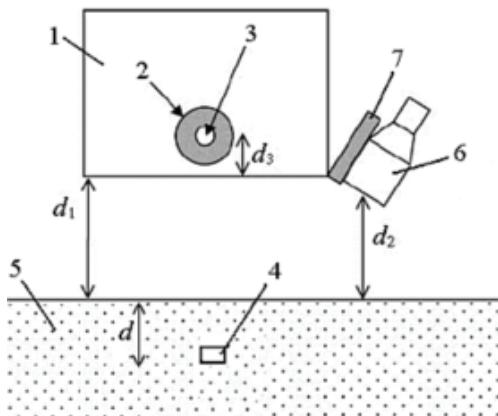


Рис. 3. Схема эксперимента по гуманитарному разминированию [5]

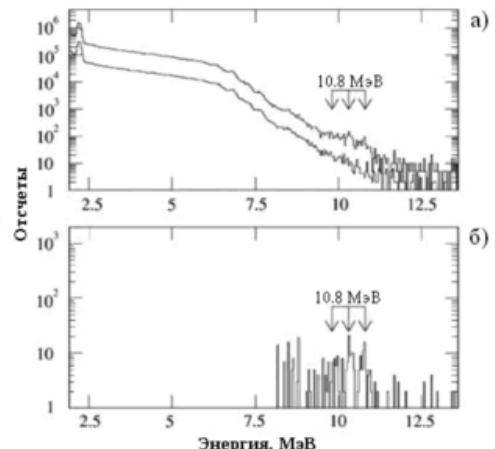


Рис. 4. Аппаратурные спектры гамма-излучения в эксперименте [5]: а) - аппаратурный спектр от образца меламина и спектр фона; б) - спектр за вычетом фона; стрелки показывают положение пиков, соответствующих гамма-излучению с энергией 10,8 МэВ

На рисунке 3 представлена схема экспериментов, моделирующих поиск скрытых ВВ в полевых условиях [5]: 1 – излучатель тепловых нейтронов в виде цилиндрического блока из полистиолена ( $\varnothing 19 \times 26,5$  см), в котором размещена свинцовая сфера 2 размером  $RR 1,5-4,5$  см с изотопным источником нейтронов ( $^{252}\text{Cf}$ ) 3 интенсивностью  $\sim 10^7$  нейтронов на расстоянии  $d_3 = 6,5$  см от нижнего торца излучателя; 4 – имитатор ВВ из меламина весом 800 г, размещененный в грунте 5 на глубине  $d = 10$  см; 6 – сцинтиляционный  $\gamma$ -спектрометр с кристаллом на основе NaI размером  $\varnothing 7,5 \times 7,5$  см, удаленный от поверхности грунта на расстояние  $d_2 = 15$  см и защищенный от  $\gamma$ -квантов излучателя свинцовой плитой 7 толщиной 2 см. Расстояние между излучателем и грунтом в эксперименте равно  $d_1 = 20$  см.

\* Проект EXPLODET ориентирован на решение проблемы так называемого "гуманитарного разминирования" огромного количества противопехотных мин, оставшихся в земле многих стран, где происходили вооруженные конфликты. По оценкам экспертов полное их число превышает 60 миллионов мин, от чего ежегодно погибает около 26 тысяч человек.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ

Полученные в этих экспериментах типичные аппаратурные спектры  $\gamma$ -излучения представлены на рис. 4.

Как видно из приведенных данных, полезный сигнал на общем фоне незначителен, что ограничивает чувствительность и надежность обнаружения значимых закладок ВВ нейтронно-радиационным методом при использовании NaI-детекторов.

Основной недостаток подобных устройств для обнаружения ВВ обусловлен характеристиками блока детектирования: активация детектора тепловыми нейтронами; высокая чувствительность детектора к мягкому  $\gamma$ -излучению, приводящая к высокой загрузке тракта регистрации; сравнительно низкое временное и энергетическое разрешение, следствием чего является наложение импульсов от  $\gamma$ -квантов, образованных при взаимодействии нейтронов с материалом детектора и окружающей средой, и, в конечном счете, низкое отношение полезного сигнала к фону ( $\sim 10^{-1}$ ) в области энергий  $\gamma$ -квантов 9–11 МэВ. В результате, по оценкам авторов [5], чувствительность обнаружения ВВ при гуманитарном разминировании рассматриваемым методом с применением NaI детектора составит  $\sim 1$  кг за несколько минут измерений, что не позволит обнаруживать противопехотные мины, содержащие ВВ весом  $\sim 40$  граммов. Заметим, что по указанным выше причинам переход к другим широко известным неорганическим сцинтилляционным детекторам, таким как CsI(Tl) и BGO, не изменит эту ситуацию, поскольку их временное и энергетическое разрешение не лучше, чем у NaI-детекторов.

В то же время, применение в рассматриваемом устройстве блока детектирования жесткого  $\gamma$ -излучения на основе гетерогенного сцинтилляционного детектора, слабо чувствительного к фону нейтронов и низкоэнергетических  $\gamma$ -квантов, позволит повысить мощность используемого источника нейтронов, качественно улучшить отношение полезного сигнала к фону в области энергий  $\gamma$ -квантов 9–11 МэВ и тем самым снизить порог обнаружения ВВ.

Проведенные оценки показали, что замена NaI-детектора  $\gamma$ -излучения в рассматриваемом в [5] устройстве на ГСД со входным окном  $\sim 50 \times 50$  см, состоящего из 10-ти конвертирующих (Pb,  $\Delta_k = 0,015$  см) слоев и, соответственно, 10-ти сенсорных (полистирол,  $\Delta_c = 0,2$  см), с учетом селекции сигналов с кратностью регистрации  $K > 3$  увеличит чувствительность такого устройства для обнаружения ВВ более, чем в  $\sim 100$  раз (табл. 1) при отношении эффект/фон  $\sim 1,5$ .

Таблица 1  
**Характеристики обнаружения закладок ВВ нейтронно-радиационным методом с применением детекторов NaI и ГСД**

Детектор	NaI [5]	ГСД
Площадь входного окна, см <sup>2</sup>	44	$2,5 \cdot 10^3$
Интенсивность источника, н/с	$1 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$
Временное разрешение детектора, нс	250	$\sim 30$
Время измерений, с	500	500
Глубина залегания ВВ в грунте, см	10	10 (грунт-SiO <sub>2</sub> )
Кол-во отсчетов детектора, соответствующих "эффекту"	10	$\sim 2,9 \cdot 10^3$
Масса имитатора ВВ, г	800 (меламин)	800 (меламин)

Эффект наложения импульсов, в значительной степени определяющий фон в рассматриваемом устройстве при использовании NaI-детекторов, при применении ГСД практически исключается выбором достаточно узкого временного окна схемы совпадений, используемой для селекции регистрируемых сигналов по параметру  $K$ . Отметим также и такое важное обстоятельство, что ГСД со схемами совпадений в рассматриваемом устройстве работает в более простом (счетном) режиме, а не в режиме амплитудного анализа импульсов в случае использования в нем NaI-детекторов.

В перспективе чувствительность рассматриваемой методики обнаружения закладок ВВ при соответствующем выборе источника нейтронов и дальнейшей оптимизации состава ГСД может быть доведена до  $\sim 100\text{--}200$  г тротиля при времени измерений меньше одной минуты.

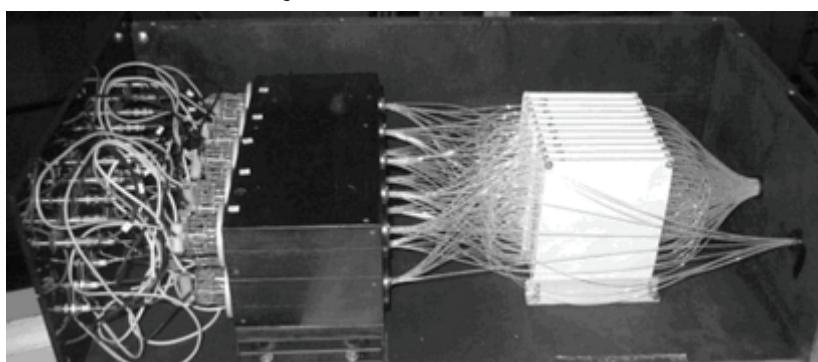


Рис. 5. Внешний вид модели гетерогенного сцинтилляционного детектора

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИТФ имеется модель ГСД (рис. 5), изготовленная в ГНЦ ИФВЭ (г. Протвино). Она представляет собой блок пластических сцинтилляторов, набранный из 10-ти пластин, каждая из которых имеет размер  $100\times120\times5$  мм. В пластине имеется по шесть канавок с каждой стороны глубиной 2,5 мм, шириной 1,1 мм, в которые при сборке укладываются переизлучающие WLS- (WaveLength Shifting) волокна (по три волокна в пластину). Светосбор с пластин из пластических сцинтилляторов осуществляется переизлучающими волокнами. Концы волокон, выходящие из каждой пластины, собраны в жгут и подсоединенены кциальному ФЭУ-85. Концы волокон, выходящие из блока (10 пластин), подсоединены к общему ФЭУ-85.

Каждая пластина детектора обернута светоотражающим покрытием. Выбор отражающего покрытия играет важную роль для увеличения светосбора. В изготовленном приборе в качестве покрытия использована офисная бумага, имеющая коэффициент отражения 77%.

Волоконный съем света из сцинтиллятора допускает, в отличие от традиционного метода, использующего пластические сцинтилляторы в прямом оптическом контакте с ФЭУ, переносить характеристики конкретного детектора на детектор любых размеров и конфигурации (ограниченных только прозрачностью волокна) без каких-либо поправок на его параметры.

В качестве примера на рис. 6 приведены расчетные энергетические зависимости вероятностей  $K$ -кратной регистрации  $\gamma$ -квантов  $W^{(K)}(E)$  для двух моделей детекторов: ГСД-7 ( $\Delta_k = 0,08$  см,  $\Delta_c = 0,5$  см,  $M = 15$ ,  $\varepsilon_{\text{пор}} = 0,2$  МэВ) и ГСД-8 ( $\Delta_k = 0$  см,  $\Delta_c = 0,5$  см,  $M = 10$ ,  $\varepsilon_{\text{пор}} = 0,2$  МэВ) [2] и соответствующие зависимости эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов в этих детекторах

$$W_D(E) = \sum_K W^{(K)}(E)$$

при пороговом значении поглощенной в их сенсорных слоях энергии  $\varepsilon_{\text{пор}} = 0,2$  МэВ.

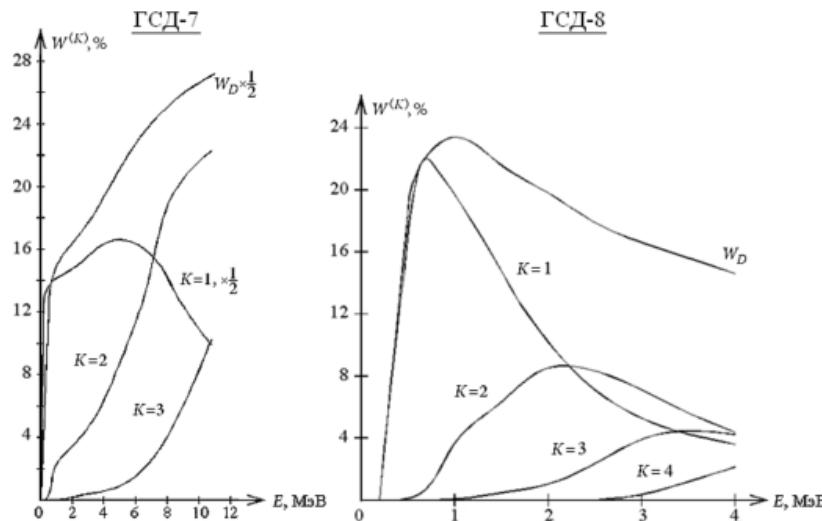


Рис. 6. Энергетические зависимости вероятностей  $K$ -кратной регистрации  $\gamma$ -квантов детекторов ГСД-7 и ГСД-8

Из рисунка 6 следует, что зависимости  $W^{(K)}(E)$ ,  $K = 1, 2, 3\dots$  у ГСД носят существенно различный характер: максимумы вероятностей  $K$ -кратной регистрации с ростом параметра  $K$  сдвигаются в область все более высоких энергий  $E$ , что является основой селекции  $\gamma$ -квантов с помощью ГСД по кратности их регистрации в его сенсорных слоях.

Для ГСД со сравнительно толстыми конвертирующими слоями ( $Pb$ ,  $D_k \sim 0,1$  см) основной вклад в эффективность детектора при  $E < 10$  МэВ вносят акты с кратностью регистрации  $K \leq 3$ , при этом роль событий с  $K \geq 4$  можно считать пренебрежимо малой. С уменьшением толщины конвертирующих слоев и увеличением энергии  $\gamma$ -квантов роль событий с кратностями регистрации более высокого порядка существенно возрастает.

Выделение событий  $K$ -кратной регистрации  $\gamma$ -квантов в ГСД и последующая селекция  $\gamma$ -источников различного спектрального состава по соотношениям между ними может быть проведена с помощью широко используемых в экспериментальной технике схем совпадений сигналов от каждого сенсорного слоя. Однако для моделей, в которых доля четырех- (и более) кратной регистрации  $\gamma$ -квантов пренебрежимо мала, эта задача может быть решена более простыми средствами. Как отмечено в [2], в этом случае имеет место соотношение

$$R = \frac{W^{(1)} - W^{(3)}}{W^{(2)} + 2W^{(3)}} \approx \frac{2-K}{K-1} , \quad (1)$$

где

$$K = W_D^{-1} \sum_K KW^{(K)} = W_D^{-1} \sum_{i=1}^M W_i \quad (2)$$

– средняя кратность регистрации  $\gamma$ -квантов исследуемого спектра;  
 $W_i$  – вероятность их регистрации в  $i$ -ом сенсорном слое.

Согласно (2), величина  $\bar{K}$  и, следовательно, параметр  $R$  могут быть найдены по результатам измерений счетности суммирующего регистратора сигналов со всех сенсорных слоев ГСД ( $W_D$ ) и измерений счетности сигналов от каждого сенсорного слоя  $W_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$  без применения схем совпадений.

В таблице 2 приведены расчетные величины  $W_X^{(K)}$ ,  $K = 1, 2, 3$  для модели детектора ГСД-7 при регистрации  $\gamma$ -квантов радиационного захвата тепловых нейтронов ( $n, \gamma$ ) на водороде ( $H$ ), азоте ( $N$ ), железе ( $Fe$ ) и никеле ( $Ni$ ), найденные по соотношению

$$W_X^{(K)} = \int W_{\text{ГСД}}^{(K)}(E) \Psi_X(E) dE, \quad (3)$$

где  $X$  – индекс ( $n, \gamma$ )-реакции, а  $\Psi_X(E)$  – нормированный на единицу спектр рожденных в ней  $\gamma$ -квантов, и соответствующие им значения параметров  $W_{D,X}$ ,  $\bar{K}_X$ ,  $R_X$ .

В вычислениях по формулам (1)–(3) функции  $\Psi_X(E)$  принимались в соответствии со справочными данными [6], а функции  $W_{\text{ГСД}}^{(K)}(E)$  – в соответствии с данными, приведенными на рис. 6 для ГСД-7.

Таблица 2

**Расчетные характеристики регистрации  $\gamma$ -квантов радиационного захвата тепловых нейтронов на водороде, азоте, железе и никеле детектором ГСД-7.**

$\gamma$ -источник ( $X$ )	$W_X^{(K)}, \%$			$W_{D,X}, \%$	$\bar{K}_X$	$R_X$
	$K=1$	$K=2$	$K=3$			
$H(n, \gamma)$	14,9	3,5	0,2	18,6	1,21	3,77
$N(n, \gamma)$	15,6	9,19	1,59	26,4	1,47	1,13
$Fe(n, \gamma)$	12,9	9,40	1,65	24,0	1,53	0,89
$Ni(n, \gamma)$	10,6	12,9	2,95	26,5	1,71	0,41

Из приведенных в таблице данных следует, что наиболее надежным признаком идентификации с помощью ГСД рассматриваемых  $\gamma$ -источников является соотношение между одно-, двух- и трехкратными актами регистрации  $\gamma$ -квантов в его сенсорных слоях, характеризуемое параметром  $R$ . Отличия в других параметрах ( $W_D$  – соответственно эффективности и средней кратности регистрации) сравнительно невелики.

В то же время найденные параметры  $R$  рассматриваемых ( $n, \gamma$ )-реакций существенно различаются между собой. Наиболее близкими среди них являются параметры  $R$  для реакций радиационного захвата нейтронов на азоте и железе: для этой пары  $\gamma$ -источников различие параметров  $R$  составило  $\sim 25\%$ , что при умеренной точности измерений ( $2\sigma \sim 10\%$ ) позволит их надежно идентифицировать.

Проведенный анализ показывает, что селекция  $\gamma$ -квантов по кратности регистрации в ГСД является достаточно эффективным средством различения  $\gamma$ -источников по спектральному признаку. Этот фактор наряду с высокой чувствительностью ГСД ( $\sim W_D \cdot P$ ) делает такие детекторы перспективными для решения задачи обнаружения ВВ нейтронно-радиационным методом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гетерогенный сцинтилляционный детектор (ГСД) открывает широкие возможности для изменения его спектральной чувствительности применительно к решаемым задачам и достижения других качественных показателей, во многом превы-

## ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ

---

шающих соответствующие показатели традиционных сцинтилляционных детекторов [1, 2].

Уникальной особенностью ГСД является возможность определения кратности ( $K$ ) регистрации  $\gamma$ -квантов в сенсорных слоях и связанная с этим возможность их селекции по энергии. Она является следствием того, что  $\gamma$ -квант в зависимости от его энергии может быть зарегистрирован более чем в одном сенсорном слое ( $K > 1$ ).

Отмечено, что селекция  $\gamma$ -квантов по кратности регистрации в ГСД является достаточно эффективным средством различения  $\gamma$ -источников по спектральному признаку.

Указанные факторы ведут к повышению отношения эффект/фон при измерениях с ГСД, что делает такие детекторы перспективными для использования в разнообразных детектирующих устройствах, предназначенных для регистрации  $\gamma$ -квантов.

Показано, что одним из практически важных приложений ГСД может стать их применение в ядерно-физических методиках обнаружения азотосодержащих ВВ, основанных на регистрации высокогенергетического  $\gamma$ -излучения ( $E > 10$  МэВ), в частности, в нейтронно-радиационной методике [4–6].

### **Литература**

1. Терехин В.А. Гетерогенный сцинтилляционный детектор гамма-излучений / В. А. Терехин, Ю. И. Чернухин, С. И. Стрельцов // Атомная энергия. – 2006. – Т. 101, вып. 2. – С. 130–135.
2. Чернухин Ю. И. Гетерогенный сцинтилляционный детектор гамма-излучения с регулируемой спектральной чувствительностью / Ю. И. Чернухин, В. А. Терехин, С. И. Стрельцов // Атомная энергия. – 2011. – Т. 111, вып. 3. – С. 169–171.
3. Siciliano E.R., Ely J.H., Kouzes R.T. Comparison of PVT and NaI(Tl) Scintillator for Vehicle Portal Monitor Applications. – Nuclear Instruments and Methods, A550 (2005). P. 647–674.
4. Viesti G. et al. The EXPLODET project: Advanced Nuclear Techniques for Humanitarian De-mining. – Nuclear Instruments and Methods, A422, (1999). P. 918–921.
5. Cinausero M., Deak F. , Fabris D. et al. Characterization of a Gamma Spectroscopy Tool for Humanitarian De-mining. – Interciencia, v. 26, №3, (2001). P. 117–121.
6. Гумма В.И., Демидов А.М. и др. Нейтронно-радиационный анализ. – М.: Энергоатомиздат. 1984.

Поступила в редакцию 26.11.2012

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИПЕРТЕРМИИ ПРИ СТАБИЛИЗИРУЮЩЕЙ ВЕРТЕБРОПЛАСТИКЕ

**Вознесенский Н.К., Богданов Н.В., Дорохович С.Л.\*, Забарянский Ю.Г.\*,  
Матусевич Е.С., Кураченко Ю.А., Левченко В.А.\*<sup>,</sup>, Мардынскии Ю.С.\*\*,  
Вознесенская Н.Н.**

*Институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*

*\* Экспериментальный научно-исследовательский и методический центр «Моделирующие системы», г. Обнинск*

*\*\* ФГБУ «Медицинский радиологический научный центр», г. Обнинск*



Для совместного моделирования комбинированного воздействия облучения и локальной гипертермии при радионуклидной вертебропластике проведено исследование температурных полей, обусловленных полимеризацией костного цемента. Выполнены две группы экспериментов по измерению нестационарного распределения температуры при полимеризации цемента: а) в изолированной кювете и б) в позвонке. Для моделирования экспериментов адаптирован 3D-нестационарный код КАНАЛ, применяемый в задачах термогидравлики ядерно-технических установок. Достигнута удовлетворительная согласованность измеренных и рассчитанных температурных характеристик – как их пространственного, так и временного распределения. Особо существенной является близость экспериментальных и расчетных значений максимума температуры при полимеризации цемента в позвонке. Выполненное исследование обеспечивает теоретическую поддержку вертебропластики в двух аспектах: а) применением созданных расчетных технологий и б) оценкой степени терапевтического воздействия в результате нагрева костной ткани.

**Ключевые слова:** стабилизирующая вертебропластика, костный цемент, нагрев при полимеризации, измеренная и рассчитанная температура, терапевтический эффект.

**Key words:** stabilizing vertebroplasty, bone cement, heating at polymerization, measured and calculated temperature, curative effect

### ВВЕДЕНИЕ

Чрескожная вертебропластика<sup>1</sup> в качестве способа стабилизации позвоночных структур была предложена в 1987 [1, 2], и сразу появились публикации о ее высокой эффективности у больных с метастатическим поражением позвоночника [3]. В результате экзотермической реакции полимеризации костного цемента,

<sup>1</sup> Вертебропластика означает укрепление поврежденного тела позвонка с помощью костного цемента ([http://www.medicina.ru/services\\_add/vert/](http://www.medicina.ru/services_add/vert/))

© Вознесенский Н.К., Богданов Н.В., Дорохович С.Л., Забарянский Ю.Г., Матусевич Е.С., Кураченко Ю.А., Левченко В.А., Мардынскии Ю.С., Вознесенская Н.Н., 2013

## ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ

вводимого в очаг литического<sup>2</sup> метастаза в теле позвонка, при локальном нагреве возможно активное разрушение опухолевых клеток, или же, при меньшей степени нагрева, подавление их активности [4–9]. Однако отсутствие опубликованных данных о температурных полях при вертебропластике не позволяет определить действительную степень нагрева окружающей очаг злокачественного роста костной ткани позвонка и, тем самым, оценить терапевтическое воздействие этого нагрева [10–14].

Опыт применения гипертермии<sup>3</sup> в лечении онкологических заболеваний позволяет сделать вывод о том, что ее эффективность зависит от обеспечения необходимой температуры в течение определенного времени [15]. При температуре 70°C некроз любых, в том числе, опухолевых клеток наступает немедленно. Температура 60°C вызывает их тепловое разрушение в течение 5 с. Прогревание при 55°C ведет к некрозу злокачественных клеток в течение 5 мин, в то время как прогревание при температуре 52°C в течение того же времени оказывается недостаточным для их гибели. Нагрев при температуре в диапазоне 47.8–48.3°C вызывает тепловой некроз злокачественных клеток и разрушение опухолей при продолжительности воздействия от 7 до 20 мин. При температуре 47°C клетки различных опухолей резистентны от 10 до 30 мин, при 46°C – от 20 до 50 мин, 45°C – от 30 до 60 мин, 44°C – от 45 до 80 мин [12, 16, 17]. Гетерогенность внутриопухолевого кровотока не позволяет рассчитывать на равномерный нагрев всей массы опухоли внутренним источником тепла выше критических температур для опухолевых клеток при недопущении перегрева окружающих тканей. Неравномерный же разогрев опухоли увеличивает риск стимуляции опухолевого роста и активации метастазирования.

В настоящее время нет надежного способа прогнозировать уровень и продолжительность разогрева от источника тепла, помещенного внутрь опухоли. Это в свою очередь не дает возможности оценить потенциальную роль гипертермии при применении ее как независимо, так и в сочетании с лучевыми, радионуклидными и химиотерапевтическими методами. Проблема оценки роли гипертермии возникла при применении стабилизирующей вертебропластики костным цементом для паллиативного лечения метастатических поражений позвоночника. При вертебропластике в ходе полимеризации полиметилметакрилата – основного компонента костного цемента – происходит разогрев поверхности цементного «ядра», заполняющего область метастаза, выше 100°C.

Для оценки разогрева костной ткани было проведено измерение тепловыделения как в модельном эксперименте с кюветой, так и непосредственно в изолированном позвонке, а также развит и апробирован расчетный аппарат, позволяющий моделировать тепловые процессы. Соответствующая расчетная технология основана на адаптации программного обеспечения, применяемого в термогидравлических расчетах ядерно-технических и других установок, к задачам локального разогрева тканей при полимеризации костного цемента.

<sup>2</sup> Все метастазы в кость делятся на литические и бластические. Остеолитические возникают наиболее часто и характеризуются «рассасыванием» кости под действием метастаза. Для остеобластических метастазов характерно избыточное образование измененной костной ткани (<http://www.euromedicine.ru/oncology/metastasis/>)

<sup>3</sup> Гипертермия (hyperthermia гипер + греч. therme теплота; син. перегревание организма) – состояние организма, характеризующееся повышенной температурой тела (Большой медицинский словарь)

## ЭКСПЕРИМЕНТ

На первом этапе («эксперимент 1») были проведены измерения максимальной температуры при полимеризации костного цемента в экспериментальных кюветах. Целью первого этапа являлось

- развитие методик измерения;
- выявление основных параметров, влияющих на энерговыделение при конкретных условиях полимеризации, моделирующих реальные условия при вертебропластике.

Экспериментальные кюветы представляли собой набор алюминиевых цилиндров (4 шт.), каждый с двумя термопарами. Одна из термопар была фиксирована на границе цемента и боковой стенки кюветы, другая – вблизи геометрического центра кюветы (рис. 1). Внутренний диаметр кювет изменялся от 1.2 до 2.2 см, высота заполняемой цементом полости в кювете – от 1.5 до 1.8 см. Применялся цемент с плотностью  $1.34 \text{ г}/\text{см}^3$  и коэффициентом теплопроводности  $0.2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Начальная температура смеси перед приготовлением цемента  $21^\circ\text{C}$ .

Для большего приближения к реальным условиям вертебропластики необходима теплоизоляция цемента при полимеризации, которая достигалась слоем пенопласта толщиной 5 см. На рисунке 2 представлена фотография устройства из пенопласта, в котором размещалась экспериментальная кювета.

Измерение температуры при полимеризации цемента выполнялось посредством дифференциального термического анализа. Основой измерительного комплекса являлся аппаратный модуль АЦП/ЦАП ZET 210 [18] с 16-ю входами, подключенный к компьютеру. В качестве первичных преобразователей использованы стандартные нормирующие усилители. Программное обеспечение модуля ZET 210 представляет собой интегрированный с графическим интерфейсом комплекс, обеспечивающий постоянную регистрацию поступающих на его входы сигналов.

Было выполнено четыре серии экспериментов по четыре эксперимента в каждой. В ходе экспериментов использован костный цемент «Curgical Cement For Vertebroplasty «CementoFixx» (OptiMed) [19]. Цемент замешивался в течение 30 с и затем при помощи шприца вводился в кювету. Эта процедура выполнялась в течение 1 мин – 1 мин 20 с.

Результаты измерений представлены в табл. 1 и на рис. 3. Из данных таблицы следует, что температура как на поверхности цементного ядра, так и в экспериментальных кюветах нелинейно зависит от объема костного цемента.

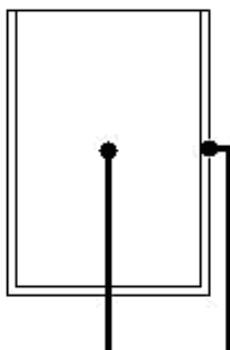


Рис. 1. Схема экспериментальной кюветы с термопарами

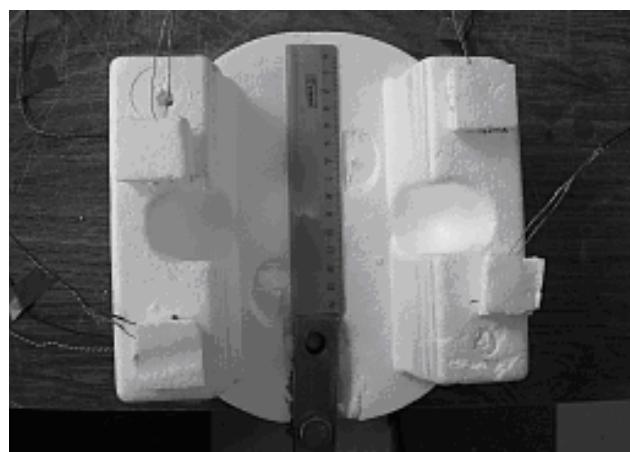


Рис. 2. Изолирующий футляр из пенопласта для кюветы в первом эксперименте

Таблица 1

**Температура (°С) цемента на оси кюветы ( $t_a$ ) и вблизи ее боковой поверхности ( $t_l$ )**

№ куветы	Геометрия кюветы*			$t_l$				$t_a$ , среднее значение	
	$h$ , см	$d$ , см	$V$ , см <sup>3</sup>	№ эксперимента					
				1	2	3	4		
1	1.6	1.2	1.8	92.2	96.1	93.2	96.1	$94 \pm 2$	
2	1.5	1.6	3.0	103.6	107.4	104.8	105.9	$105 \pm 2$	
3	1.8	1.8	4.6	107.3	109.1	108.1	109.1	$108 \pm 1$	
4	1.7	2.2	6.5	110.5	112.5	112.8	112.6	$111 \pm 1$	
Температура окружающего воздуха, °С				20	19	21	21	$20 \pm 1$	

\* $h$  – высота;  $d$  – диаметр;  $V$  – объем

Зависимость максимальных температур от объема цемента в кювете (рис. 3) носит вполне ожидаемый характер. При малом объеме кюветы большую роль в формировании температуры как на поверхности, так и в центре играет величина ее поверхности, через которую происходит теплоотдача в воздух. С ростом объема кюветы роль поверхности теплоотдачи снижается, все большее влияние на температуру оказывает собственно объем, поэтому отношение  $t_a/t_l$  увеличивается и изменяется с ростом объема не так быстро, как при малом объеме кюветы.

На втором этапе («эксперимент 2») получены зависимости температуры от времени при полимеризации костного цемента в полости позвонка. Такое приближение к реальности стало возможным в результате достижения целей первого этапа.

Для измерений на втором этапе в центре изолированного позвонка формировалась цилиндрическая полость с размерами  $d \times h = 1.8 \times 1.8 \text{ см}^2$ , моделирующая литический метастаз. Эта полость непосредственно перед измерением заполнялась костным цементом по той же процедуре, что и в первом эксперименте. Исследовалось нестационарное распределение температуры по объему губчатой кости<sup>4</sup> тела позвонка. В измерениях одна из термопар была размещена в центре цементного «ядра» (цилиндрической полости, заполненной цементом) на его оси, остальные 15 термопар располагались в кости на различных расстояниях от поверхно-

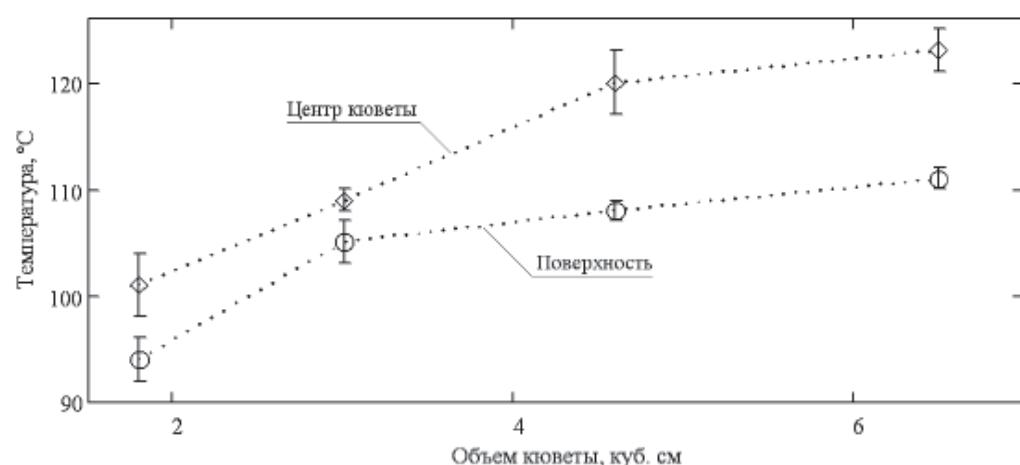


Рис. 3. Максимальная температура костного цемента на поверхности и в центре кюветы как функция ее объема

<sup>4</sup> Губчатые кости (короткие) кости скелета, сочетающие в себе прочность и компактность с ограниченной подвижностью. В отличие от трубчатых (длинных) костей, ширина губчатых приблизительно равна их длине. Губчатые кости образованы преимущественно губчатой тканью, окружённой тонким слоем компактного вещества (<http://ru.wikipedia.org/wiki>).



Рис. 4. Фотография позвонка с термопарами (слева) и 3D-реконструкция томографических снимков (справа)

сти контакта цемента с костью. Эти термопары были размещены практически в одной плоскости на середине высоты позвонка. Представление о геометрии эксперимента и расположении детекторов-термопар можно получить из рис. 4.

Наиболее существенным параметром, влияющим на показания детектора, будет его расстояние от поверхности цементного ядра. Расстояние детектора до поверхности разрыва термогидравлических свойств (т. е. до внешней границы позвонка или до какой-либо другой неоднородности) будет влиять на температурное поле в гораздо меньшей степени.

Подготовленный к эксперименту позвонок с установленными в нем термопарами помещался в чашку Петри с изотоническим<sup>5</sup> 10%-ым раствором формалина. Предварительно нижняя замыкательная пластинка<sup>6</sup> позвонка удалялась с целью



Рис. 5. Схема расположения термопар в позвонке (условно, не в масштабе)

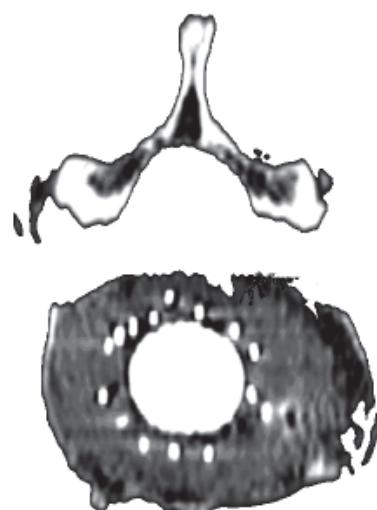


Рис. 6. Томограмма позвонка с установленными термопарами

<sup>5</sup> Изотонические растворы - водные растворы, изотоничные плазме крови. Изотония - равенство осмотического давления в жидких средах и тканях организма.

<sup>6</sup> Замыкательные (концевые) пластинки представляют собой тонкий (меньше 1 мм) слой хряща, расположенного между телом позвонка и межпозвонковым диском.

## ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ

обеспечения равномерной элевации жидкости, предотвращающей высыхание костной ткани тела позвонка. Препарат выдерживался в термостате не менее трех часов, до установления равномерной температуры в губчатой кости. Указанные процедуры должны приблизить условия эксперимента к условиям при вертебропластике и обеспечить постоянство термогидравлических условий в течение эксперимента.

Процесс полимеризации фиксировался измерительными приборами и контролировался визуально на экране дисплея. При температуре окружающего воздуха 38°C температура костной ткани устанавливалась на более низком уровне 32.6±0.1°C, что объясняется теплосъемом при испарении жидкости с поверхности тела позвонка.

На рисунке 5 условно изображены выбранные детекторы, расстояние от которых до поверхности цемента монотонно возрастает, а на рисунке 6 представлена томограмма позвонка.

На рисунке 7 приведена зависимость температуры от времени в центре ядра цемента, а также в костной ткани на разном расстоянии от поверхности цемента для выбранных детекторов. В таблице 2 приведены характеристики разогрева губчатой костной ткани в эксперименте: максимальная температура в точке расположения детектора и экспозиция при температуре выше некоторого конкретного значения.

Как следует и из измерений, и из расчетов, эффект гипертермии является «ближкодействующим» (2–5 мм от поверхности цементного ядра), поэтому влияние при полимеризации на распределение температуры как конкретной геометрии позвонка и метастазированной «полости», так и ее локализации в позвонке будет относительно невелико – не более 20–30%. Отсюда следует, что результаты измерений обладают вполне достаточной общностью и применимы для широкого диапазона геометрических характеристик, реализующихся при вертебропластике.

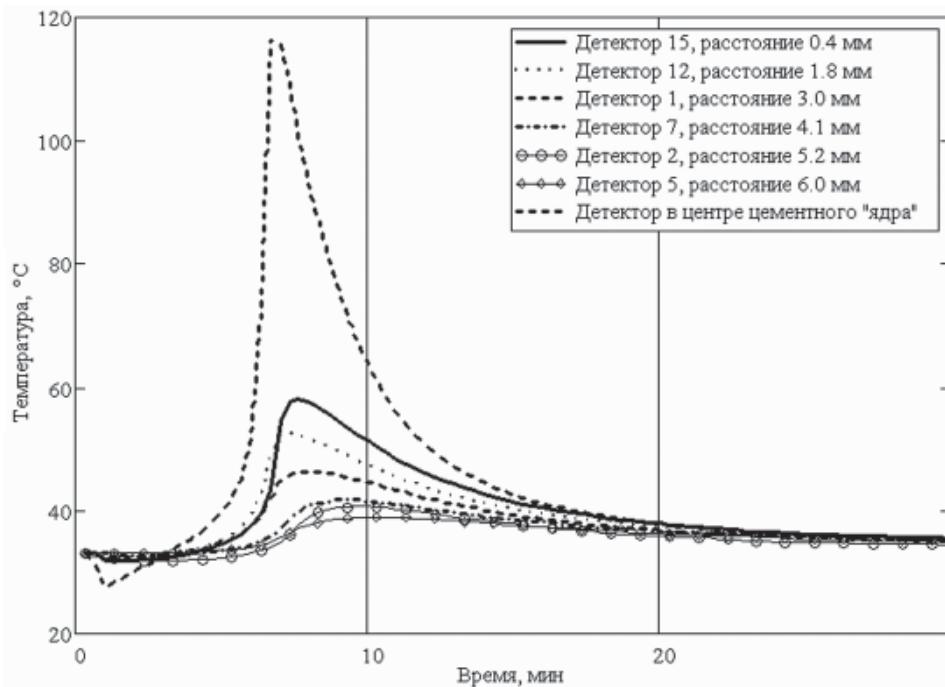


Рис. 7. Температура в центре цементного «ядра» и в костной ткани позвонка на различном расстоянии от поверхности костного цемента (эксперимент, второй этап)

Таблица 2

**Характеристика разогрева губчатой кости позвонка**

Расстояние от границы костного цемента, мм	Максимальная температура, °С	Время (мин ('), сек ('')), в течение которого температура превышает указанный уровень			
		50°	47.5°	45°	42.5°
Центр	117.7 ± 2.6				
Граница кости	80.1 ± 2.7	6'	6'	7"	8'30"
0.4	57.6 ± 2.8	3'	4'	6"	7'30"
1.8	52.4 ± 1.1	1'30"	3'	4'30"	6'30"
2.5	50.5 ± 0.8	30"	2'30"	3'20"	6'
3.0	46.3 ± 0.3	-	-	2'30"	5'
3.5	45.1 ± 0.3	-	-	< 30"	4'
4.1	41.6 ± 0.2	-	-	-	-

**РАСЧЕТ**

Расчет двумерного нестационарного поля температуры в кювете проводился с помощью программного комплекса КАНАЛ [20].

Количество тепла, выделяемое при полимеризации цемента (метилметакрилата) определяется следующим образом:

$$Q(\tau) = m \int_{t_n}^{t_0(\tau)} c(t) dt, \quad (1)$$

где  $\tau$  – текущее время эксперимента;  $m$  – масса цемента в кювете;  $c$  – удельная теплоемкость цемента при температуре  $t$ ;  $t_0$  – температура цемента на оси кюветы в текущий момент времени, определенная экспериментально;  $t_n$  – начальная температура цемента.

Величина полного энерговыделения  $Q_t$ , полученная в эксперименте для промежутка времени, включающего в себя время полимеризации и последующего остывания цемента ( $\tau \sim 5$  мин), представлена для каждой кюветы в табл. 3 вместе со значениями удельного энерговыделения.

Мощность энерговыделения в кювете

$$N(\tau) = \frac{dQ(\tau)}{dt} \quad (2)$$

измерялась в эксперименте и для использования в расчете по программе КАНАЛ временная зависимость мощности  $N(\tau)$  аппроксимировалась непрерывной функцией. Отклонение аппроксимированных значений от значений, рассчитанных по (1), не превышало 1 %.

Таблица 3

**Энерговыделение**

№ кюветы	Геометрия кюветы			Энерговыделение	
	$h$ , см	$d$ , см	$V$ , см <sup>3</sup>	полное, Дж	удельное, кДж/кг
1	1.6	1.2	1.8	350	140
2	1.5	1.6	3.0	630	150
3	1.8	1.8	4.6	1050	180
4	1.7	2.2	6.5	1440	170

## ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ

Нестационарная теплогидравлическая модель для расчета температуры кюветы строилась на основании совместного согласованного применения двух алгоритмов:

1) двумерной модели нестационарной теплопроводности в цементе и стенке кюветы; при этом численно решалось уравнение теплопроводности

$$\rho c_m \frac{\partial t}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla t) + q_v, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность материала (цемента или алюминия);  $c_m$  – удельная теплоемкость материала;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала;  $q_v$  – объемная плотность тепловыделения в цементе (в стенке кюветы  $q_v = 0$ );

2) двумерной модели расчета нестационарной гидродинамики и сопряженного теплообмена для воздуха, окружающего кювету, при его свободной конвекции у боковой поверхности кюветы; при этом решалась следующая система уравнений:

сохранения энергии

$$\frac{\partial (\rho_b u)}{\partial \tau} + \nabla (\rho_b u \vec{V}) = -p \nabla \vec{V} + q_{cb}, \quad (4)$$

неразрывности

$$\frac{\partial \rho_b}{\partial \tau} + \nabla (\rho_b \vec{V}) = 0, \quad (5)$$

сохранения импульса

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\frac{1}{\rho_b} \nabla p + \frac{c_{cb}}{\rho_b} \vec{V} |\vec{V}| + \vec{g}, \quad (6)$$

где  $\rho_b$  – плотность воздуха;  $u$  – его удельная внутренняя энергия;  $p$  – давление воздуха;  $\vec{V}$  – вектор скорости воздуха;  $q_{cb}$  – плотность потока тепла в воздухе через поверхность стенки кюветы,  $c_{cb}$  – коэффициент внутреннего трения воздуха,  $\vec{g}$  – вектор ускорения свободного падения.

Сопоставление результатов расчета распределения температуры в кюветах с экспериментальными данными (первый эксперимент) показывает, что принятая модель удовлетворительно отражает физику процесса переноса тепла (рис. 8).

С применением разработанного расчетного аппарата был выполнен двухмерный нестационарный расчет температуры в позвонке с цилиндрической полостью, заполняемой цементом. При этом температура воздуха, начальная температура цемента и позвонка принимались равными  $21^\circ\text{C}$ .

На рисунке 8 представлены графики, характеризующие во времени расчетную температуру на внутренней поверхности костной ткани, окружающей цементное ядро (второй эксперимент) в сопоставлении с данными третьей экспериментальной кюветы (первый эксперимент). Отметим высокую степень согласованности расчетных и экспериментальных данных, представленных на рис. 8. Данное обстоятельство свидетельствует об адекватной расчетной реконструкции характеристик энерговыделения и теплопереноса при полимеризации костного цемента. Отличие в абсолюте максимума температуры в двух экспериментах объясняется существенным различием термогидравлических характеристик материалов (теплопроводности и теплоемкости), а также краевых – начальных и граничных – условий. Но ключевая для связи «эксперимент-расчет» характеристика – положение максимума температуры во времени – передается вполне корректно.

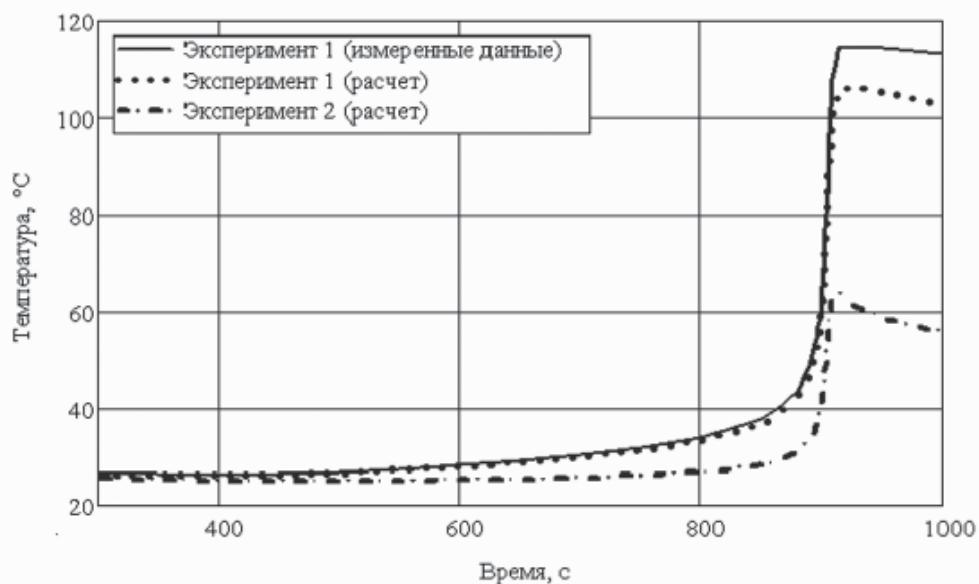


Рис. 8. Зависимость от времени температуры внутренней поверхности стенки кюветы (эксперимент и расчет) и поверхности костного цемента в позвонке (расчет)

В таблице 4 приведены исходные данные, принятые для расчета с целью сопоставления результатов с распределениями температуры в костной ткани, полученными в эксперименте на позвонке.

Полученные результаты позволили применить разработанный расчетный аппарат для прогнозирования разогрева внутренней поверхности полости в костной ткани на границе с костным цементом и на разном удалении от нее. Сопоставление данных, полученных в результате применения расчетного аппарата, с данными, полученными в серии экспериментов при заполнении костным цементом полости такого же размера, представленных на рис. 8, позволяет сделать заключение о возможности применения расчетного прогнозирования гипертермического воздействия на окружающие клетки и ткани при введении в полость метастаза костного цемента известного объема.

Основной полученный результат проиллюстрирован на рис. 9. Следует отметить, что

- экспериментальные и расчетные значения температуры вполне согласуются;
- эта согласованность тем более значима, если учесть, что экспериментальные точки расположены в различных условиях по отношению к поверхностям теплоотдачи, неоднородности свойств костной ткани имеют случайный характер и т. п.;

Таблица 4  
**Данные, принятые для расчета температуры в позвонке**

Диаметр и высота полости, заполняемой цементом, мм	18; 18
Диаметр и высота позвонка, мм	36; 24
Плотность костной ткани позвонка, кг/м <sup>3</sup>	1178
Удельная теплоемкость костной ткани, Дж/(кг×К)	2274
Коэффициент теплопроводности костной ткани, Вт/(м×К)	0.31
Начальная температура цемента, позвонка, °С	27.5; 32.6
Температура воздуха, °С	38.0

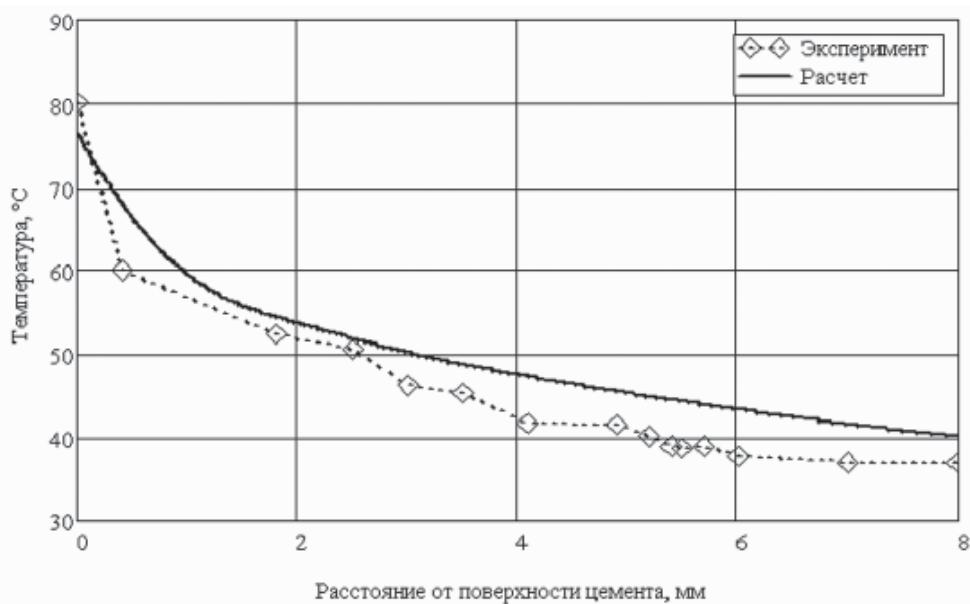


Рис. 9. Распределение максимума температуры в костной ткани тела позвонка на различном расстоянии от поверхности костного цемента

– решение задачи консервативно (устойчиво) по отношению к параметрам задачи, и развитое программное обеспечение достаточно надежно.

Представленные результаты наглядно демонстрируют высокую степень соответствия расчетных и экспериментальных данных и подтверждают прогностическую ценность применения расчетного аппарата для оценки нагрева костной ткани при вертебропластике.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы

– проведены исследования нестационарных температурных полей при полимеризации костного цемента в условиях «чистого эксперимента» – эксперименты с кюветами;

– адаптирован расчётный аппарат решения нестационарной задачи термогидравлики для описания этих экспериментов;

– созданный расчетный аппарат применен для восстановления температурного поля при полимеризации цемента непосредственно в позвонке – в условиях, приближенных к реальной вертебропластике;

– показана хорошая согласованность экспериментальных и расчетных данных в задаче с условиями, приближенными к клинической реальности, что позволяет сделать вывод о возможности надежного прогнозирования разогрева тканей при операции пластики позвонков;

– показано, что эффект гипертермии является «близкодействующим», т. е. при типичных условиях вертебропластики (объем вводимого цемента 2–6 см<sup>3</sup>, реальные размеры позвонка и др.) область возможного терапевтического эффекта невелика.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Galibert P., Deramond H., Rosat P. et al. Note préliminaire sur le traitement des angiomes vertébraux parvertebroplastie acrylique percutanée // Neurochirurgie. 1987. – Vol. 33. – P. 166 – 168.

2. Deramond H., Depriester C., Galibert P., Le Gars D. Percutaneous vertebroplasty with polymethyl methacrylate. Technique, indications, and results // Radiol. Clin. North. AM. – 1998; 36: 533–546.
3. Kaemmerlen P., Thiesse P., Jonas P. et al. Percutaneous injection of orthopaedic cement in metastatic vertebral lesions. N. Engl. J. Med.; 1989; 321:131.
4. Валиев М.А., Мусаев Э.Р., Тепляков В.В. и др. Чрескожная вертебропластика в онкологии / Под ред. М.Д. Алиева, Б.И. Долгушина – М.: ИНФРА-М, 2010, 71 с.
5. Алиев М.Д., Соколовский В.А. Высокотехнологичное лечение в онкоортопедии. – М.: 2008, 24 с.
6. Кустов А.В., Жаринов Г.М., Рудь С.Д. и др. Изучение эффективности пункционной вертебропластики и лучевой терапии в лечении агрессивных гемангиом позвоночника // Медицинский академический журнал, 2008, № 4, С. 101–114.
7. Джинджихадзе Р.С., Лазарев В.А., Горожанин А.В., Борзунов А.Н. и соавт. Перкутанная вертебропластика // Нейрохирургия. – 2005. – №1. – С 36–41.
8. San Millan R.D., Burkhardt K., Jean B. et al. Pathology findings with acrylic implants. Bone 1999; 25(2suppl):85S–90S.
9. Wetzel S.G.; Martin J.-B.; Somon T. et al. Painful Osteolytic Metastasis of the Atlas: Treatment With Percutaneous Vertebroplasty. Spine. 2002, 27(22): 493S–495S.
10. Verlaan J.J., Oner F.C., Verbout A.J., Dhert W.J. Temperature elevation after vertebroplasty with polymethyl-methacrylate in the goat spine. J Biomed Mater Res B: Appl Biomater 2003, 67(1):581– 585.
11. Anselmetti G., Manca A., Kanika Kh. et al. Temperature Measurement During Polymerization of Bone Cement in Percutaneous Vertebroplasty: An In Vivo Study in Humans // Cardiovasc Intervent Radiol (2009) 32:491–498.
12. Li C, Chien S, Branemark PI, Heat shock-induced necrosis and apoptosis in osteoblasts. J Orthop Res 1999; 17(6):891–899.
13. Li C., Kotha S., Huang C.H. et al. Finite element thermal analysis of bone cement for joint replacements // J. Biomech. Eng. 2003 Jun;125(3):315–22.
14. Po-Liang Lai, Ching-Lung Tai, Lih-Huei Chen, Nai-Yuan Nien. Cement leakage causes potential thermal injury in vertebroplasty.2011. <http://www.biomedcentral.com/1471-2474/12/116>.
15. Фрадкин С.З. Современное состояние гипертермической онкологии и тенденции ее развития.//Гипертермическая терапия в онкологии. Медицинские новости. – 2004. – №3. – С. 3–8.
16. Александров Н.Н., Савченко Н.Е., Фрадкин С.З., Жаврид Э.А. Применение гипертермии и гипергликемии при лечении злокачественных опухолей. – М.: Медицина, 1980.– 256 с.
17. Eriksson RA, Albrektsson T, Magnusson B (1984) Assessment of bone viability after heat trauma. A histological, histochemical and vital microscopic study in the rabbit. Scand J Plast Reconstr Surg 18(3):261–268.
18. Программное обеспечение ZETLab. Руководство пользователя // ЗАО «Электронные технологии и метрологические системы», [www.zetms.ru](http://www.zetms.ru) .
19. Cementofixx. Instructions for use surgical cement for vertebroplasty sterile, radiopaque. 2004. 24 p.
20. КАНАЛ. Термогидравлический код. Описание численной схемы кода КАНАЛ // Отчет о НИР. Том 7. Обнинск: ЭНИМЦ МС, 2008, 95 с.

Поступила в редакцию 17.01.2013

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.54

*Water Cooled Reactor VVER SCP (preliminary elaboration) | Kirillov P.L.; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 10 pages, 5 tables. – References, 22 titles.*

Brief review on the state of nuclear power engineering on 01.01.2013 is presented here. The project of nuclear reactor cooled with water at supercritical pressure – VVER SCP based on operation experience of such nuclear reactors as WWER, PWR, BWR, RBMK (more than 14000 reactor-years), long term experience of thermoelectric stations on fossil fuel, where steam at supercritical and super-super-critical pressures is used. Advantages of such type of reactor are listed as well as scientific and technical problems to be solved. Preliminary estimations in accordance with INPRO approach are made. Knowledge accumulated during last 10 years in this field allows reactor concept to be specified and the project of experimental reactor of small power to be launched.

### УДК 621.039.534

*Effect of the Diffusion of Metal Components out of Steel through the Oxide Coating on Mass Transfer in Flow Circuit with Heavy Lead-containing Coolants | P.N. Martynov, K.D. Ivanov, O.V. Lavrova, S.-A.S. Niasov, V.M. Shelemetev, V.V. Ulyanov, R.P. Sadovnichy, A.S. Fomin; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 5 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 3 titles.*

Article is devoted the interaction of structural steel with heavy lead-containing coolants on the definition of the diffusion effect of metal components steel output through the oxide coating on the mass transfer in the flow circuit. Based on the analysis of experimental data rendered quantitative estimates of the intensity of metallic impurities proceeds directly into the coolant. It is shown that in the non-isothermal conditions of the circulation circuit, their share could be 50% or more of the total intensity of the oxidation of the matrix of steel, which must be considered when developing systems cooling technologies.

### УДК 669-1

*Mining Conditions Passivation on Steel Pipe Heaters Steam Generator NPP | Pavlenko V.I., Lebedev L.L., Prozorov V.V., Doilnitsyn V.A.; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 8 pages, 4 tables. – References, 4 titles.*

Electrochemical studies conducted on samples of pipe heaters steam generators made of steel 08X18H10T not of used after washing with acid solutions and complexing with various additives followed by passivation or without passivation. Found that the best passivation marked processing samples in solutions containing aluminum nitrate – a stationary potential, while in comparison with the investigation of shifts to a more positive region, which indicates the high shielding of active sites on the surface of the metal.

### УДК 621.039.72

*The Titanosilicate Glass Matrix for Immobilization of the Wastes Containing f-elements | A.S. Aloy, Y.A. Barbanel, A.V. Trofimenko; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 7 pages, 5 tables, 8 illustrations. – References, 4 titles.*

The compositions of titanosilicated glasses were defined in the ternary system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{SiO}_2$ , which provide not only a perfect glassy-like structure (body) formation, but also associative groups of mineral-like compounds-fresnoite ( $\text{Ba}_2\text{TiSi}_2\text{O}_8$ ) and perovskite ( $\text{SrTiO}_3$ ) were implemented as well. These associates can incorporate f-elements very firmly. To study how these associates can incorporate f-elements europium and uranium oxides were added to the system in amount of 3 wt.%. Transformation, which took place during the presynthesis of glasses and their crystallization, were investigated by X-ray diffraction (XRD) and differential-thermo analysis (DTA). Distribution of Eu and U throughout the melts body in steady state conditions was detected using laser-fluorescence method. As a result, Eu was uniformly distributed in the volume while U has a tendency has a tendency on sedimentation at bottom part due to gravitation. Oxidation state for Eu was (+3) and U was in (+6) state. Because glass networks were based mineral-like associates, namely

fresnoite and perovskite, chemical durability of produced glasses was very high level, since equilibrium leach rate of Eu was  $3 \cdot 10^{-6}$  g/m<sup>2</sup>·day and of U was  $4 \cdot 10^{-6}$  g/m<sup>2</sup>·day.

**УДК 546.212:541.12.012.3+534-14**

*The Use of Generation of Acoustic Vibrations in Chemical Reaction and Properties of the Bubble Medium in Liquid to Reveal through Defects in Claddings of Slugs with Sodium* | Titarenko N.N., Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Polionov V.P.; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 8 pages, 5 illustrations. – References, 23 titles.

An opportunity to use the acoustic emission method to control micro-defects in the equipment is considered. In particular, for the first time it is shown experimentally that while sodium is interacting with water, the acoustic emission parameters are determined by the size of the interacting area for reacting components of the reaction. It is assumed that the major source of acoustic emission in the reaction of sodium interacting with water is generation of acoustic vibrations caused by phase transitions of sodium hydroxide. The obtained data make it possible to design a high-efficient system to control through defects in claddings of slugs with sodium.

**УДК 621.039.534**

*The Investigation of the Acoustic Level Limit Switch of Coolant in the Integrated Stand of the KV-2* | V.I. Melnikov, V.V. Ivanov, Yu.A. Kiselev, A.A. Kiselev, K.M. Mirasov; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 5 pages, 3 illustrations. – References, 4 titles.

The results of the level switch based on 24 point acoustic probes which monitored process into the testing integrated unit KV-2 three-year operation was generalized. It has been estimated that the developed level switch worked satisfactorily. They make possible monitoring the thermohydraulic processes associated with vapor phase formation due to the increase of liquid level and steam condensation into reactor.

**УДК 004.42.001.5**

*Coolant Forecasting of Nuclear Reactors* | Malovik K.N., Nikishin V.V.; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 6 pages, 7 illustrations. – References, 15 titles.

The article considers analytic forecasting of coolant and its limit condition. Shown experimental data of physical modeling of volumetric steam content via improvement of machine vision system. Proposed using theory of dynamic trends for coolant forecasting of nuclear reactor.

**УДК 621.039.517**

*Technique and Software to Calculate Temperature Field in the System of Layered Cylindrical Fuel Elements* | Starkov V.A., Marikhin N.Yu.; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 9 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 5 titles.

A technique has been proposed and thermal conductivity problem has been solved analytically for the system of layered cylindrical fuel elements. Based on the results, an algorithm and FORTRAN software for the thermo-hydraulic calculation of a channel (THCC) have been developed to calculate the temperature field and thermal flux density in a fuel assembly with layered cylindrical fuel elements. The software also provides the calculation of the surface boiling onset temperatures on the fuel elements, critical fluxes and corresponding thermotechnical margins. Two coolant circulation schemes are provided for a fuel assembly: straight flow and Field tube. The results of the THCC calculations were compared with the analogous ones. A correlation between the calculation results is shown as well as the advantages of the THCC software performance.

**УДК 519.6:621.039.5**

*The Overimplicit Scheme of Incomplete Factorization Method for Solving the Three-dimensional Difference Equations of Elliptic Type* | N.M. Troyanova, V.P. Ginkin; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 8 pages, 1 tables, 4 illustrations. – References, 8 titles.

The over-implicit scheme of the incomplete factorization method (IFM) is proposed for solving the systems of linear algebraic equations that approximate the equations for neutron transport in the multigroup diffusion approximation, and the variant of combined IFM schemes is proposed, in which the peripheral

compensation is used in the even iterations and is absent in uneven iterations. The numerical tests demonstrate high efficiency of developed IFM schemes. Proposed schemes are implemented into several 3D codes of neutron kinetics and are used in the practical calculation by the fast neutron reactor code GVA and by the code WIMS-ВОЛНА for the VVER-1000 reactor life-time calculation.

**УДК 629.76:629.78**

*On the Conversion of Thermal Energy of Nuclear Reactor into Directional Flow Energy of Electromagnetic Radiation in Nuclear-Photon Engine | A.V..Gulevich, O.F..Kukharchuk, N.I. Loginov, A.S. Mikheev; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 9 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References, 4 titles.*

Questions of direct conversion of thermal energy of the nuclear-photon engine into the energy of directional flow light radiation have been discussed. Possible design options of this converter differing in their irradiators geometrical forms have been highlighted, with comparative analysis of these options

**УДК 621.039.534.6**

*Calculation of Mass Exchangers for Providing Specific Oxygen Regime in Heavy Liquid Metal Coolant | A.Yu. Legkikh, P.N. Martynov, R.Sh. Askhadyljin; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 12 pages, 1 tables, 5 illustrations. – References, 5 titles.*

Technical implementation of solid-phase method for adjustment of oxygen content in lead alloys coolants, developed by IPPE, is realized by means of specially designed devices – mass exchangers which are a significant component of heavy liquid-metal coolant technology. On the design stage of mass exchanger it is necessary to calculate major features of mass exchanger. At this paper the calculation method of mass exchangers with solid-phase oxygen source (lead oxide) is described which allows to estimate the major features of apparatus and to predict its changes in depend on operating time.

**УДК 532.526.4:621.039.533.34**

*The Modeling of Subheated Coolant Influence on Temperature Measurement at the Exit of Fuel Rod Assamby in WWER-1000 reactor | Belozerov V.I., Varseev E.V., Kolesov V.V.; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 9 pages, 1 tables, 3 illustrations. – References, 15 titles.*

Errors in measurement of bulk temperature at the core exit of WWER-1000 reactor depends on the flow of relatively cold coolant through the control rod guide thimble tube in the fuel assemblies – so called “absorber” effect. The problem of temperature field modeling at the exit from WWER-1000 reactor core was solved in order to predict influence of such effect on thermocouple registrations along reactor radius at reactor measurements. The problem was solved in two stages. Energy release within the core elements of serial WWER-1000 reactor was calculated using the neutron transport code MCNP. The temperature field was calculated by using the OpenFOAM CFD package and heat release distribution, obtained at first stage of calculations. The results, obtained with developed methodology, are in good agreement with the reactor measurements results and researches of other authors. Obtained data allowed evaluating influence of the “absorber” effect at measurements in different position along core radius of WWER-1000 reactor.

**УДК 621.039.546**

*Numerical and Experimental Investigation of the Model Steam Generator Reactor Facility BREST-OD-300 | V.A. Grabezhnaya, A.S. Mikheev, Yu.Yu. Stein, A.A. Semchenkov; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 9 pages, 3 tables, 6 illustrations. – References, 5 titles.*

The paper presents the results of testing the 3-tubes model of steam generator reactor facility BREST-OD-300, heated by liquid lead, at subcritical (18 MPa) and supercritical (25 MPa) pressure of the water at a flowrate – 80, 100 and 120% of the nominal value. The experimental data are compared with numerical simulation using the code RELAP5/mod 3.2.

**УДК 621.039.51**

*Assessment of the Increasing in  $^{99}\text{Mo}$  Production for Different WWR-c Reactor Core Compositions | O.Yu. Kochnov, V.V. Kolesov, R.V. Fomin; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 6 pages, 3 tables, 6 illustrations. –*

*References, 3 titles.*

The possibility of increasing in  $^{99}\text{Mo}$  production with WWR-c reactor core and uranium-containing targets modernization have been discussed in this paper. We found that there is a large possibility of  $^{99}\text{Mo}$  production increasing.

**УДК 577.34**

*Study of the Dependence of Fluctuating Asymmetry in Plants of the Size of Radioactive Contamination | Gorshkova T.A., Churyukin R.S., Karaguzova O.A., Amosova N.V., Pavlova N.N., Martirosyan Y.M., Vlasova O.P., Simakova I.M.; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 9 pages, 9 tables. – References, 11 titles.*

The article is devoted investigation of the dependence fluctuating asymmetry of leaves of three plant species of background radiation and activity of radioactive cesium in the Ulyanovsk region, contaminated by the Chernobyl accident. A correlation analysis found a similar reaction of plants in the contaminated area. This suggests that the studied species can be used for biological indication of this type of anthropogenic environmental changes.

**УДК 539.1.074.3**

*Nitrogenous Explosives Detection by Neutron-Radiation Method Using Gamma Radiation Heterogeneous Scintillation Detector | Yudov A.A., Sokolov Yu.A., Chernukhin Yu.I.; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 8 pages, 2 tables, 6 illustrations. – References, 6 titles.*

This paper describes a heterogeneous scintillation detector (HSD) which can increase the sensitivity and reliability of explosives (HE) detection. The HSD consists of alternating layers of converting material where gamma quanta transform into electrons and positrons, and of detecting material where the energy of charged particles is transformed into light scintillations. Spectral sensitivity of the HSD can be varied by selecting thickness and number of layers. Thickness of the layers can be chosen so that charged particles which created in the converting layers can be registered in two or more scintillation layers. The calculations results of detection sensitivity of nitrogenous explosives by neutron-radiation method using HSD was presented. It was shown that the sensitivity of the described method using an optimal HSD would be significantly higher than in the traditional formulation of such measurements using large NaI (Tl) detectors, and in the future can be reduced to ~ 100 – 200 grams of TNT at the time of measurement less than one minute.

**УДК 621.039.52:615.849.1**

*Modeling of Hyperthermia at Stabilizing Percutaneous Vertebroplasty | N.K. Voznesensky, N.V. Bogdanov, S.L. Dorokhovich, Yu.G. Zabaryansky, Eu.S. Matusevich, Yu.A. Kurachenko, V.A. Levchenko, Yu.S. Mardynsky, N.N. Voznesenskaya; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2013. 11 pages, 9 tables, 9 illustrations. – References, 20 titles.*

For modelling of the local irradiation and hyperthermia synergistic at the radionuclide vertebroplasty, the study of the temperature fields caused by bone cement polymerization is carried out. Two groups of experiments involving the non-stationary temperatures distribution measurements were done, namely, the cement polymerization a) in the isolated cuvette, and b) in a vertebra. For experiments numerical modeling, the 3D non-stationary KANAL code applied in thermohydraulics of nuclear power installations is adapted. The consistency of measured data and simulated ones is obtained for temperature distributions, the spatial and time-dependent as well. The most important is the closeness in experimental and simulating temperature maximum value at cement polymerization in a vertebra. The executed study grants the theoretical support of vertebroplasty in two aspects: a) by providing with the developed calculation techniques, and b) by estimating the curative effect because of the bone tissue heating.

## НАШИ АВТОРЫ

**Алой А.С.** – д.т.н., директор отделения ФГУП НПО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», Санкт-Петербург, Россия. aloy@khlopin.ru

**Амосова Н.В.** – к.б.н., доцент каф. биологии ИАТЭ НИЯУ МИФИ, тел.: 8-903-814-76-27, AmosovaN@yandex.ru

**Асхадуллин Р.Ш.** – к.т.н., начальник отдела 15 института Инновационных технологий (ИИТ).

**Барбанель Ю.А.** – д.х.н., в.н.с. ФГУП НПО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», Санкт-Петербург, Россия.

**Белозеров В.И.** – к.т.н., доцент, декан ФЭФ ИАТЭ НИЯУ МИФИ,

**Богданов Н.В.** – ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск.

**Варсеев Е.В.** – студент ИАТЭ НИЯУ МИФИ.

**Власова О.П.** – к.ф.-м.н., доцент каф. ядерной физики ИАТЭ НИЯУ МИФИ. Тел.: 8-903-812-43-58, somina@inbox.ru

**Вознесенская Н.Н.** – ИАТЭ НИЯУ МИФИ.

**Вознесенский Н.К.** – ИАТЭ НИЯУ МИФИ.

**Гинкин В. П.** – д.ф.-м.н., советник директора Института радиационного материаловедения и технологий ФГУП ГНЦ-РФ ФЭИ. Тел.: +7-903-811-45-69. ginkinvp@mail.ru

**Горшкова Т.А.** – к.б.н., доцент каф. биологии ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 249035, Обнинск, Студгородок, 1, кафедра биологии. Тел.: 8-910-596-22-24, tgorshkova@yandex.ru

**Грабежная В.А.** – к.т.н., в.н.с. ГНЦ РФ-ФЭИ. Тел.: (48439) 9-42-97, 8-910-594-65-92, gva@ippe.ru.

**Гулевич А.В.** – 1960 г.р., окончил МФТИ в 1983 г. С 1983 г. в ГНЦ РФ-ФЭИ, д.ф.-м.н. с 1998 г., первый заместитель генерального директора ГНЦ РФ-ФЭИ. Область научных интересов: методы теории возмущений, физика ядерных реакторов, инженерно-физические методы анализа сложных взаимосвязанных процессов в реакторных и лазерных системах.

**Дворников П.А.** – сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Доильницаин В.А.** – Санкт-Петербургский Государственный Технологический институт (ТУ) – СПбГТИ(ТУ), к.х.н., доцент каф. инженерной радиоэкологии и радиохимической технологии.

**Дорохович С.Л.** – Экспериментальный научно-исследовательский и методический центр «Моделирующие системы», г. Обнинск.

**Забарянский Ю.Г.** – Экспериментальный научно-исследовательский и методический центр «Моделирующие системы», г. Обнинск.

**Иванов В.В.** – к.т.н., доцент каф. ядерных реакторов и энергетических установок Нижегородского государственного технического университета. 603600, Н.Новгород, ул. Минина, 24, НГТУ, им. Р.Е. Алексеева, каф. «Ядерные реакторы и энергетические установки». Тел.: (8312) 32-03-23.

**Иванов К.Д.** – д.т.н., в.н.с. лаб. 100 ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Карагузова О.А.** – студентка спец. «Биоэкология» ИАТЭ НИЯУ МИФИ, Тел.: 8-920-878-24-15; beautifuldead@mail.ru

**Кириллов П.Л.** – д.т.н., профессор, почетный доктор Обнинского университета атомной энергетики (ныне ИАТЭ НИЯУ МИФИ), член Международной и Российской инженерной академии, советник директора института ядерных реакторов и теплофизики ГНЦ РФ-ФЭИ. kirillov@ippe.ru

**Киселев А.А.** – начальник бюро ОАО ОКБМ «Африкантов». 603074, Н.Новгород, Бурнаковский проезд, 15. Тел.: (831) 246-95-79.

**Киселев Ю.А.** – ведущий инженер-конструктор ОАО ОКБМ «Африкантов». 603074,

Н.Новгород, Бурнаковский проезд, 15. Тел.: (831) 275-26-45.

**Ковтун С.Н.** – сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Колесов В.В.** – к.ф.-м.н., доцент каф. расчета и конструирования реакторов ИАТЭ НИЯУ МИФИ,

**Кочнов О.Ю.** – Обнинский филиал ГНЦ РФ НИФХИ им. Л.Я. Карпова.

**Кураченко Ю.А.** – ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск.

**Кухарчук О.Ф.** – 1965 г.р., окончил ИАТЭ в 1988 г. С 1988 г. работает в ГНЦ РФ-ФЭИ, д.ф.-м.н. с 2006 г., заместитель директора Института ядерных реакторов и теплофизики ГНЦ РФ-ФЭИ. Область научных интересов: ядерная и нейтронная физика, лазеры с ядерной накачкой, математическое моделирование быстропротекающих процессов.

**Лаврова О.В.** – с.н.с. лаб. 100 ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Лебедев Л. Л.** – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (г. Белгород), соискатель каф. неорганической химии. Тел./факс (4722) 54-96-04.

**Левченко В.А.** – Экспериментальный научно-исследовательский и методический центр «Моделирующие системы», г. Обнинск.

**Легких А.Ю.** – м.н.с. лаб. 100 ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Логинов Н.И.** – 1935 г.р., окончил вечернее отделение МИФИ в 1960 г. С 1954 г. в ГНЦ РФ-ФЭИ, д.т.н. с 1989 г., главный научный сотрудник. Область научных интересов: магнитная гидродинамика, теплофизика, ядерные энергетические установки, тепловые трубы.

**Маловик К.Н.** – к.т.н., доцент, профессор Севастопольского национального университета ядерной энергии и промышленности. Севастополь, ул. Курчатова, 7. Тел.: 0692-71-01-80.

**Мардынский Ю.С.** – ФБГУ «Медицинский радиологический научный центр», г. Обнинск.

**Марихин Н.Ю.** – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Научно-исследовательского института атомных реакторов (ОАО «ГНЦ НИИАР»), 433510 Ульяновская область, г. Димитровград. Тел.: (84235) 6-58-61. Область научных интересов: моделирование нейтронно-физическими процессов в ядерном реакторе.

**Мартиросян Ю.М.** – к.ф.-м.н., доцент каф. ядерной физики ИАТЭ НИЯУ МИФИ, Тел.: 8-910-707-43-10, martirosyan@iate.obninsk.ru

**Мартынов П.Н.** – д.т.н., зам. ген. директора ГНЦ РФ-ФЭИ, директор Института инновационных технологий (ИИТ).

**Матусевич Е.С.** – ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск.

**Мельников В.И.** – д.т.н., профессор, профессор каф. ядерных реакторов и энергетических установок Нижегородского государственного технического университета. 603600, Н.Новгород, ул. Минина, 24, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки». Тел.: (831) 432-03-23. Дом. адрес: 603074, Н.Новгород, ул. Куйбышева, д. 17, кв. 25. Тел.: (831) 275-24-20, 8-902-780-49-92.

**Мирясов К.М.** – инженер-конструктор ОАО ОКБМ «Африкантов». 603074, Н.Новгород, Бурнаковский проезд, 15. Тел.: (831) 246-94-33.

**Михеев А.С.** – 1965 г.р., окончил Ленинградский политехнический институт в 1989 г. С 1989 г. в ГНЦ РФ-ФЭИ, начальник лаборатории. Область научных интересов: теплофизика, ядерные энергетические установки, физическая химия, тепловые трубы. Тел.: (48439) 9-89-34 (рабочий), 8-910-912-77-46, mikheev@ippe.ru.

**Никишин В.В.** – преподаватель каф. технологии измерений и оценивания Севастопольского национального университета ядерной энергии и промышленности. Севастополь, ул. Курчатова, 7. Тел.: 0692-71-01-80.

**Ниязов С.-А. С.** – инженер, 100 ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Павленко В.И.** – Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (г. Белгород), д.т.н., профессор, директор Института строительного материаловедения и техносферной безопасности. Тел./факс: (4722) 54-96-04. kafnx@mail.ru,

natalipv13@mail.ru,

**Павлова Н.Н.** – к.б.н., доцент каф. биологии ИАТЭ НИЯУ МИФИ, Тел.: 8-905-585-17-52, nadpavl@yandex.ru

**Полионов В.П.** – сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ, г. Обнинск, Россия.

**Прозоров В.В.** – Сосновоборский проектно-изыскательский институт «Всероссийский проектный и научно-исследовательский институт комплексной энергетической технологии» (г. Сосновый Бор Ленинградской области), к.х.н., главный специалист по НИОКР.

**Садовничий Р.П.** – м.н.с. лаб. 100 ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Семченков А.А.** – вед. инженер ОАО «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежаля». Тел.: 499-763-46, 8-916-571-49-08, a.sem@nikiet.ru

**Симакова И.М.** – зав. лаб. каф. экологии ИАТЭ НИЯУ МИФИ. Тел.: 8-953-310-60-90, ecology-lab@iate.obninsk.ru

**Соколов Ю.А.** – к.т.н., начальник лаборатории ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» им. акад. Е.И. Забабахина», Россия, 456770, г.Снежинск, Челябинской области, ул.Васильева, 13, d5@vniiitf.ru .

**Старков В.А.** – к.т.н., начальник отдела Научно-исследовательского института атомных реакторов (ОАО «ГНЦ НИИАР»), 433510 Ульяновская область, г. Димитровград, доцент каф. ядерных реакторов Димитровградского инженерно-технологического института – филиала НИЯУ МИФИ. Тел.: (84235) 6-55-72. sva@niiar.ru. Область научных интересов: теплофизика и реакторная физика.

**Титаренко Н.Н.** – сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Трофименко А.В.** – к.х.н., ведущий научный сотрудник ФГУП НПО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», Санкт-Петербург, Россия.

**Троянова Н.М.** – советник ректора НИЯУ МИФИ. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ). +7-903-635-53-62, n\_troyanova@mail.ru

**Ульянов В.В.** – с.н.с., к.т.н., ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Фомин А.С.** – м.н.с. лаб. 100 ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Фомин Р.В.** – ИАТЭ НИЯУ МИФИ.

**Чернухин Ю.И.** – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник СФТИ НИЯУ МИФИ г. Снежинск, sfti.science@gmail.com.

**Чурюкин Р.С.** – аспирант, м.н.с. ВНИИСХРАЭ, 249020, Калужская обл., Обнинск, Киевское шоссе, 109. Тел.: 8-910-520-82-76, churukin\_1990@mail.ru

**Шелеметьев В.М.** – н.с. лаб. 100, ГНЦ РФ-ФЭИ.

**Штейн Ю.Ю.** – с.н.с. ГНЦ РФ-ФЭИ. Тел.: (48439) 9-41-71, 8-910-608-16-92.

**Юдов А.А.** – инженер ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» им. акад. Е.И. Забабахина», Россия, 456770, Снежинск, Челябинской области, ул. Васильева, д. 13. Yudoff@mail.ru

## OUR AUTHORS

**Aloy A.S.** – Dr. Sci. (Engineering), Department Director FSUE «RPA V.G. Khlopin Radium Institute», Saint-Petersburg. [aloy@khlopin.ru](mailto:aloy@khlopin.ru)

**Amosova N.V.** – Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Askhadullin R. Sh.** – Cand. Sci. (Engineering), Head 15 Institute for Innovative Technologies State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering.

**Barbanel Yu.A.** – Dr. Sci. (Chem.), Leading Scientist, FSUE «RPA V.G. Khlopin Radium Institute», Saint-Petersburg, Russia.

**Belozerov V.I.** – Cand. Sci. (Engineering), Decan of Energy Department of the Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Bogdanov N.V.** – Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Chernukhin Yu.I.** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher of SPTI «NRNU-MEPhI». 456770, Snezhinsk, Chelyabinsk region. [sfti.science @ gmail.com](mailto:sfti.science@gmail.com)

**Churyukin R.S.** – Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, Obninsk.

**Doilnitsyn V.A.** – Cand. Sci. (Chem.), St. Petersburg State Institute of Technology (TU) – SPbSTI (TU). Associate Professor of Engineering Technology Radioecology and Radiochemical Department.

**Dorokhovich S.L.** – Experimental Scientific-Research and Methodology Center «Simulation Systems»

**Dvornikov P.A.** – State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering.

**Fomin A.S.** – Junior Researcher, Lab. 100, State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering.

**Fomin R.V.** – Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Ginkin V.P.** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), adviser of Director of the Institute of radiation materials science and technologies FSUE «SSC RF-IPPE» Federal State Unitary Enterprise «State Scientific Centre of the Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering n. a. A.I. Leypunsky» (FSUE «SSC RF-IPPE»). +7-903-811-45-69. [ginkinvp@mail.ru](mailto:ginkinvp@mail.ru)

**Gorshkova T.A.** – Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Grabezhnaya V.A.** – State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering. Tel.: (48439) 9-42-97, 8-910-594-65-92. [gva@ippe.ru](mailto:gva@ippe.ru).

**Gulevich A.V.** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), year of birth 1960; graduated from the Moscow Institute of Physics and Technology in 1983. First Deputy Director General of State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering. Research interests: perturbation theory, physics of nuclear reactor, methods of engineering and physical analysis for complex related processes in reactor and laser systems.

**Ivanov K.D.** – Dr. Sci. (Engineering), Leading Researcher Lab. 100, State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering

**Ivanov V.V.** – Nizhni Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev, Russia, N. Novgorod, Minin str., h. 24, 603600, tel. 8312-320-323

**Karaguzova O.A.** – Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Kirillov P.L.** – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Honorary Doctor of the Obninsk Institute of Atomic Energy (now NIYU MEPhI), Member of International and Russian Engineering Academies, adviser of

Director Institute Nuclear Reactor and Thermophysics State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering. kirillov@ippe.ru

**Kiselev A.A.** – Russia, N. Novgorod. 831-246-95-79

**Kiselev Yu.A.** – Russia, N. Novgorod. 831-275-26-45

**Kochnov O.Yu.** – Cand. Sci. (Engineering), Director of the Obninsk Branch of FSUE Karpov Institute of Physical Chemistry (KIPC).

**Kolesov V.V.** – Associated Professor Reactor Design & Constructing Department of the Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Kovtun S.N.** – State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering.

**Kukharchuk O.F.** – Dr. Sci. (Phys.-Math.), year of birth 1965; graduated from the Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering in 1988. Deputy Director of Institute for Nuclear Reactors and Thermal Physics, State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering. Research interests: nuclear and neutron physics, nuclear pumped lasers, mathematical modeling of fast processes.

**Kurachenko Yu.A.** – Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Lavrova O.V.** – Leading Researcher Lab. 100, State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering.

**Lebedev L.L.** – Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. Seeker of Inorganic Chemistry Department. Tel. / Fax: (4722) 54-96-04.

**Legkikh A.Yu.** – Junior Researcher, Lab. 100, State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering.

**Levchenko V.A.** – Experimental Scientific-Research and Methodology Center «Simulation Systems»

**Loginov N.I.** – Dr. Sci. (Engineering), year of birth 1935; graduated from the Moscow Institute of Engineering and Physics (evening department) in 1960. Principal Scientist, State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering. Research interests: thermophysics, magnetohydrodynamics, nuclear power plants, heat pipes.

**Malovik K.N.** – Cand. Sci. (Engeneering), Associated professor, Head of Institute for «Nanotechnology, measurement and special computer systems in energetic», Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry. Sevastopol, Kurchatova, 7. 0692-71-01-80.

**Mardynsky Yu.S.** – Federal State Institution MRRC of the Russian Ministry of Health.

**Marikhin N.Yu.** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Scientist, JSC «SSC RIAR», 433510, Ulyanovsk region, Dimitrovgrad. Contacts: +7-842-356-58-61. Research interests: simulation of neutron-physical processes in a nuclear reactor.

**Martirosyan Y.M.** – Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Martynov P.N.** – Dr. Sci. (Engineering), Deputy Director of the General State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering, Director of the Institute for Innovative Technologies SSC RF-IPPE.

**Matusevich Eu.S.** – Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Melnikov V.I.** – Nizhni Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev, Russia, N. Novgorod, Minin str., h. 24, 603600, tel. 8312-320-323, E-mail: melnikov@nnntu.nnov.ru

**Mikheyev A.S.** – Year of birth 1965; graduated from the Leningrad Politechnical Institute in 1989, Head of Laboratory, State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering. (48439) 9-89-34, 8-910-912-77-46. mikheev@ippe.ru. Research interests: thermophysics, nuclear power plants, physical chemistry, heat pipes.

**Miriasov K.M.** – Russia, N. Novgorod. 831-246-94-33.

**Niasov S.-A.S.** – engineer, Lab. 100, State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and

Power Engineering.

**Nikishin V.V.** – lecturer, Department of «Theory of measurements and evaluation», Sevastopol national university of nuclear energy and industry. Sevastopol, Kurchatova, 7. 0692-71-01-80.

**Pavlenko V.I.** – Dr. Sci. (Engineering), Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov. Professor, Director of the Institute for Building Materials and Technosphere Safety. Tel. / Fax: (4722) 54-96-04. kafnx@mail.ru, natalipv13@mail.ru.

**Pavlova N.N.** – Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Polionov V.P.** – State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering.

**Prozorov V.V.** – Cand. Sci. (Chem.), Sosnovoborskiy Design Institute «All-Russian Design and Scientific-Research Institute for Power Engineering Technology» (Sosnovy Bor, Leningrad region), chief research and development.

**Sadovnichy R.P.** – Junior Researcher, Lab. 100, State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering.

**Semchenkov A.A.** – OJSC NIKIET. 499-763-46, 8-916-571-49-08, a.sem@nikiet.ru.

**Shelemetev V.M.** – Researcher, Lab. 100, State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering.

**Simakova I.M.** – Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Sokolov Yu.A.** – Cand. Sci. (Engineering), Head of Laboratory FSUE «Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics», 456770, Snezhinsk, Chelyabinsk reg., Vasileva st., 13. d5@vniitf.ru .

**Starakov V.A.** – Cand. Sci. (Engineering), Head of Department, JSC «SSC RIAR», 433510, Ulyanovsk region, Dimitrovgrad, Associated Professor in Nuclear Reactors at the Dimitrovgrad Engineering&Technological Institute – the Branch of NRNU MEPhI. Contacts: +7-842-356-55-72. sva@niiar.ru. Research interests: thermal and reactor physical.

**Stein Yu.Yu.** – State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering. Tel.: (48439) 9-41-71, 8-910-608-16-92. gva@ippe.ru.

**Titarenko N.N.** – State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering.

**Trofimenko A.V.** – Cand. Sci. (Chem.), Leading Scientist, FSUE «RPA V.G. Khlopin Radium Institute», Saint-Petersburg, Russia.

**Troyanova N.M.** – adviser to the NRNU MEPhI Rector National Research Nuclear University MEPhI (NRNU MEPhI), mob.: +7-903-635-53-62. n\_troyanova@mail.ru

**Ulyanov V.V.** – Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher Lab. 100, State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and Power Engineering.

**Varseev E.V.** – graduated from the Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Vlasova O.P.** – Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Voznesenskaya N.N.** – Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Voznesensky N.K.** – Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Yudov A.A.** – Engineer of FSUE «Zababakhin All-Russia Research Institute of Technical Physics», 456770, Snezhinsk, Chelyabinsk reg., Vasilyeva st., 13. Yudoff@mail.ru,

**Zabaryansky Yu.G.** – Experimental Scientific-Research and Methodology Center «Simulation Systems»

## ЩЕБНЕВ ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ

4 января 2013 г. на 65-м году жизни скончался профессор, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Ветеран атомной энергетики и промышленности Владимир Сергеевич Щебнев.

Вся трудовая деятельность В.С. Щебнева связана с атомной энергетикой. После окончания Ивановского государственного энергетического института и службы в рядах Советской Армии он 15 лет проработал в «Атомтехэнерго». Здесь он последовательно занимал должности старшего инженера, руководителя группы, главного специалиста и главного инженера. За плечами Владимира Сергеевича участие в пуске 10-ти энергетических блоков в России, Армении, на Украине, Германии, Словакии и Чехии. Он принимал активное участие в модернизации пускаемых блоков, в подготовке и аттестации специалистов для зарубежных и отечественных АЭС. Научно-педагогическую деятельность в Ивановском государственном энергетическом университете (до 1992 г.– Энергетическом институте) В.С. Щебнев начал с 1987 г., пройдя путь от старшего преподавателя до профессора, заведующего кафедрой АЭС, которую он бессменно возглавлял с 2002 г. до последних дней жизни.

В.С. Щебнев был разносторонне талантливым и целеустремленным человеком. За годы работы в университете он создал коллектив единомышленников, увлеченных общим делом подготовки специалистов высокого уровня для атомной энергетики. Зная хорошо промышленность, Владимир Сергеевич быстро находил слабые места в вузовской подготовке студентов и решительно занялся модернизацией процесса обучения. С одной стороны, он расширил теоретическую базу специальности, создав для этого на кафедре АЭС группу физиков и математиков. С другой стороны, для скорейшей адаптации выпускников кафедры в атомную энергетику, он разработал систему сквозной подготовки «вуз – предприятие», связав в одну цепочку кафедру АЭС и атомные станции. Для реализации этой программы на кафедре установлены полномасштабный тренажер блока АЭС с реактором ВВЭР–1000, и функциональный аналитический тренажер, создана лаборатория «Диагностика и неразрушающий контроль», организован «Научный образовательный центр высоких технологий в сфере тепловой и атомной энергетики», функционирует лаборатория компьютерных обучающих систем.

Заслуги В.С. Щебнева в области подготовки специалистов для атомной энергетики неоднократно были отмечены почетными званиями и знаками отличия Минатома России, Росатома, концерна «Росэнергоатом» и Минобразования.

Благодаря широкому кругозору, эрудиции, авторитету и связям с атомной энергетикой В.С. Щебнев вывел кафедру в число ведущих в системе подготовки кадров для отрасли. Выпускники кафедры работают не только на всех АЭС России, но и в ближнем и дальнем зарубежье.

В.С. Щебнев был интеллигентным, веселым, порядочным, добрым и очень мужественным человеком. Он относился к тем немногим людям, которые рано осознали, что самые прекрасные переживания и наибольшее удовлетворение в жизни человек получает не извне, не от умножения мирских благ и своего состояния, а на основании собственных чувств, мыслей и поступков. Он мужественно принял все вызовы судьбы, сохранив до последней минуты твердость духа.

Добрая память о Владимире Сергеевиче Щебневе сохранится на многие годы в сердцах его товарищей, сотрудников, учеников и всех тех, кто имел радость общения с этим замечательным человеком.

Коллеги

## ОТ РЕДАКЦИИ

Уважаемые авторы! В последнее время многие статьи направляются к нам без должного оформления. Это существенно затрудняет работу редакции. Редколлегия приняла решение не принимать к рассмотрению такие статьи.

Материалы, предназначенные к опубликованию в журнале «Ядерная энергетика», должны удовлетворять следующим требованиям.

1. Рукопись статьи направляется в редакцию по рекомендации кафедр вузов или НТС отделов и должна сопровождаться экспертным заключением о возможности опубликования, а также лицензионным договором и актом приема–передачи для каждого автора (тексты договора и акта размещены по адресу <http://journal.iate.obninsk.ru/node/7>).

К рассмотрению принимаются только статьи, которые нигде не публиковались и не передавались в редакции других журналов.

2. Объем статьи (с иллюстрациями и списком литературы) не должен превышать 10 страниц формата А4. Для основного текста используется шрифт Times New Roman, размер не менее 12 пт, полуторный интервал, автоматическая расстановка переносов, запрет висячих строк. К печатному варианту статьи обязательно прилагается файл с полным текстом статьи, сохраненный как документ MS Word 2003. Файл и документы, указанные в п. 1, можно передать в редакцию по электронной почте.

3. Рукопись статьи содержит

- УДК;
- заголовок, предельно кратко и конкретно отражающий тему статьи;
- сведения об авторах (фамилии, имена и отчества авторов, их ученая степень и должность, полное указание места работы и контактная информация);
- аннотацию;
- ключевые слова;
- основной текст;
- список литературы.

Заголовок, сведения об авторах, аннотация и ключевые слова представляются на русском и английском языках.

4. Единицы физических величин следует приводить в Международной системе единиц (СИ).

5. В статью можно включать не более восьми графических файлов, представляющих черно–белые рисунки с градациями серого цвета. Рисунки должны быть четкими, размерами не более 13 см по горизонтали и 21 см по вертикали. На рисунки и таблицы обязательны ссылки в тексте. Подписи и обозначения внутри рисунков и таблиц должны быть только на русском языке.

6. Математические формулы даются в минимальном количестве, необходимом для понимания сути изложения.

7. В таблицах следует точно обозначать единицы физических величин. Давать полные наименования без сокращений. Громоздких таблиц не приводить. Допускается одинарный межстрочный интервал и шрифт до 9 пт с интервалами *перед*: и *после*: по 2 пт каждый.

8. Стили шрифта при оформлении формул, таблиц и рисунков:

- латинские переменные – курсив –  $kT$ ;
- греческие переменные – прямое написание –  $\sigma_t$ ;
- кириллица – прямое написание –  $k_{\text{эфф}}$ ;
- химические элементы – прямое написание – Na;
- цифры – прямое написание –  $R^2, t_1$ .

9. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ и содержать все упомянутые в тексте статьи работы.

При несоблюдении указанных требований статьи возвращаются авторам без рассмотрения.

---

---

**Внимание!** В связи со сложившимися обстоятельствами, редакция не имеет возможности бесплатной рассылки номеров журнала каждому из авторов статей.

Нам удалось оставить возможность направлять только один номер журнала коллективу авторов статьи.

Отдельный номер журнала можно приобрести в соответствии с правилами, размещенными на нашем сайте.